Betonin kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien määrittäminen

Kari Vänttinen, Eero Tuominen ja Juha Vinha
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Tämä artikkeli on laadittu Tampereen teknillisessä yliopistossa tehdyn diplomityön pohjalta, joka on osa Combi-hanketta. Diplomityössä tutkittiin sisäkuoribetonin rakennusfysikaalisia kosteusominaisuuksia. Tutkittavia betonin kosteusominaisuuksia olivat vedenimeytymis- ja vedentunkeutumiskerroin, vesihöyrynläpäisevyys, hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus sekä maksimikosteuspitoisuus. Tutkittavia betonielementin sisäkuoressa käytettäviä betonilaatuja oli kolme, joista jokainen eri betonivalmistajalta. Tässä artikkelissa esitetään keskeisimmät saadut tutkimustulokset.

Tutkimuksessa havaittiin, etteivät hygroskooppisen tai kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän testausstandardien mukaiset tutkimusmenetelmät ole kaikilta osin toimivia ainakaan lujilla betonilaaduilla; tasapainokosteuskäyrien testausajat muodostuivat pitkiksi ja koekappaleet eivät saavuttaneet maksimikosteuspitoisuutta kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittämiseksi laaditun standardin mukaisella vedellä kyllästämisellä.

1. Johdanto

Rakentamisen suurimpia ongelmia ovat kosteusvauriot ja niiden aiheuttamat sisäilmaongelmat. Rakenteen toimivuutta ja rakenneosien kuivumisaikoja voidaan tarkastella laskennallisesti, jolloin rakennusmateriaalien tarkkojen kosteusteknisten ominaisuuksien tunteminen on tärkeää. Betonin ominaisuuksia on aiemmin tutkittu paljon. Tällä tutkimuksella haluttiin tarkentaa sisäkuoressa käytettävien betonien kosteusteknisiä ominaisuuksia.

2. Tutkitut materiaalit

Tutkittavana oli kolmen suuren Suomessa toimivan betonivalmistajan sisäkuorielementissä käyttämää betonia. Betonivalmistajat on nimetty ”Betoni 1”, ”Betoni 2” ja ”Betoni 3”. Betoni 1 ja Betoni 2 toimitettiin elementteinä elementtitehtaalta. Elementeistä porattiin koekappaleet. Betoni 3:n betoni tuotiin läheiseltä valmisbetoniasemalta betoniautolla Tampereen teknilliselle yliopistolle, jossa valettiin sisäkuorielementtejä. Kaikkien elementtien paksuudet olivat 150 mm. Taulukossa 1 on esitetty tutkittujen betonien ominaisuuksia.

Taulukko 1. Tutkittujen betonien ominaisuudet.

Valmistaja	Lujuus	Sementti	V/S	Notkeus	Vesimäärä	Huokostin	Notkistin
Betoni 1	K40	Superrapid	0,484	IT	174,4 kg/m³	Kyllä	Kyllä
Betoni 2	K50	Rapid	0,390	S3	158,6 kg/m³	Kyllä	Kyllä
Betoni 3	K50	Superrapid	0,449	S3	193 kg/m³	Ei	Kyllä

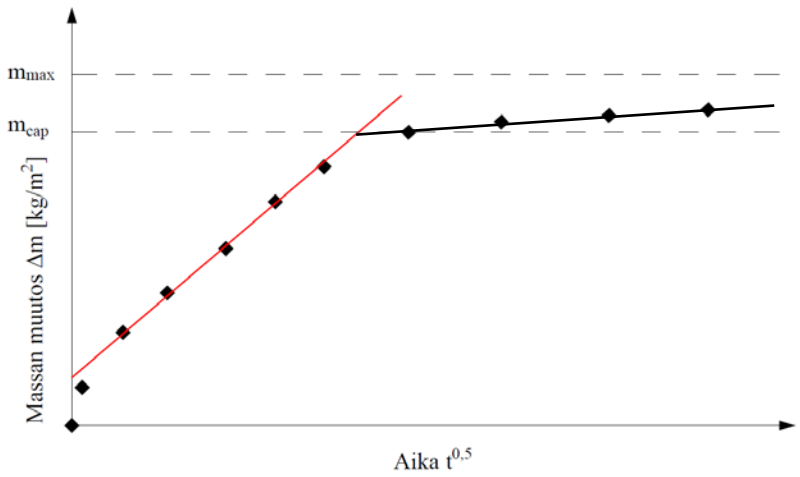
Jokaiselle betonilaadulle oli määrätty suurimmaksi runkoaineen raekooksi 16 mm. Betoni 3:n seassa havaittiin myös 32 mm runkoainetta. Betoni 3:n lujuudeksi todettiin taulukossa 1 esitetystä

ominaislujuudesta poiketen standardin SFS-EN 12390-3 [1] mukaisessa puristuskokeessa 28 vuorokauden jälkeen K40.

3. Tutkimusmenetelmät

3.1 Vedenimeytymisominaisuudet, vedenimeytyskoe

Vedenimeytyskoe toteutettiin Eero Tuomisen kehittämällä automaattisella vapaan veden imeytyslaitteistolla [2] ja vedenimeytymiskertoimen määrittämiseksi laaditun standardin SFS-EN ISO 15148 [3] mukaisesti. Kokeesta tuloksena saatiin painonmuutoskuvaaja ajan funktiona, jota korjattiin laskennallisesti veden haihtumisesta johtuvan nosteen pienenemisen vuoksi. Laskennallisesti korjatusta painonmuutoskuvaajasta määritettiin regressiosuorat alun lineaariselle osalle ja osuudelle, joka alkaa kapillaarisesti nousevan veden yltäessä koekappaleen yläpintaan. Esimerkki painonmuutoskuvaajasta ja regressiosuorista on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Veden imeytyskokeen painonmuutoskuvaaja.

Vedenimeytymiskerroin A_w on kuvassa 1 ensimmäisen regressiosuoran kulmakerroin. Vedentunkeutumiskerroin B_w voidaan määrittää tiedettäessä koekappaleen korkeus ja regressiosuorien leikkauskohdan ja vesiupotuksen alkamisen välinen aika. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus saavutetaan regressiosuorien leikkauskohdan ajanhetkellä

Betoni 3:lla tutkittiin vedenimeytymiskertoimen ja vedentunkeutumiskertoimen muuttumista ajanfunktiona alkaen vuorokausi koekappaleiden valamisesta, olettaen vedenimeytymisominaisuuksien pienenevän betonin lujuuden kasvaessa. Lisäksi Betoni 3:lla vertailtiin putkeen valetun betonin ja laataksi valetun betonin veden imeytymisominaisuuksien eroa. Betoni 1:n ja Betoni 2:n betoneista tehtiin kaksi koesarjaa.

3.2 Vesihöyrynläpäisevyys, märkäkuppikoe

Koemateriaalien vesihöyrynläpäisevyyttä tutkittiin märkäkuppikokeella. Koejärjestelyt suoritettiin Elina Maneliuksen materiaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeen kehittämistä käsittelevän diplomityön [4] mukaisesti ja materiaalien vesihöyrynläpäisevyyden tutkimiseksi laaditun standardin SFS-EN 12572 [5] mukaisesti. Koejärjestelyssä käytettiin standardista poiketen 20 mm korkeita koekappaleita, koska kosteusvirta betonin läpi on hyvin pientä. Kokeessa asetettiin alumiinisen koekupin pohjalle kylläinen suolaliuos muovisastiassa ja

koekappale tiivistettiin alumiinikupin reunoja vasten. Koekupin sisäpuolisena suhteellisen kosteuden arvoksi valittiin RH 93 %, joka saatiin aikaan käyttämällä suolana kaliumnitraattia (KNO_3). Koekupit säilytettiin olosuhdehuoneessa, jonka suhteellinen kosteus oli RH 50 % ja lämpötila 23 ºC. Koekuppien painon muutosta seurattiin tasaisin väliajoin, jonka perusteella pystyttiin laskemaan kosteusvirran tiheys g (kg/m^{2}s). Kosteusvirran tiheyden avulla pystytään ratkaisemaan myös tutkittavan aineen vesihöyrynläpäisevyys σ_v (m^2/s).

3.3 Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, kosteuskaappi

Hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän tutkimus toteutettiin standardin SFS-EN ISO 12571 [6] mukaisesti. Kokeessa uunikuivatut ja kuivana punnitut koekappaleet asetettiin tasaantumaan tiettyyn ilman suhteelliseen kosteuteen. Tietty koetilan suhteellinen kosteus saatiin aikaan kylläisellä suolaliuoksella ja tiiviillä koekaapilla. Tasapainokosteudet päätettiin tutkia kuudessa suhteellisen kosteuden pitoisuudessa adsorptiossa ja desorptiossa. Standardin mukaan tasaantuminen tiettyyn suhteellisen kosteuden arvoon on tapahtunut, kun kolmen peräkkäisen 24 tunnin välein tehdyn punnituksen aikana massan muutos on enintään 0,1 %. Massan muutos oli ensimmäisistä päivistä alkaen alle 0,1 %, joten betonikoekappaleita punnittiin tasaisin väliajoin ja seurattiin koekappaleiden tasapainokosteuden saavuttamista kosteuspitoisuus–aika –kuvaajalla.

Standardista poikettiin koekappaleiden paksuuden osalta tutkimusajan lyhentämiseksi. Standardissa on esitetty koekappaleiden paksuudeksi vähintään 3 kertaa suurin raekoko, joten koekappaleiden paksuudeksi olisi tullut vähintään 48 mm. Tässä kokeessa käytettiin noin 20 mm paksuja koekappaleita. Kokeen ajallinen kesto todettiin pitkäksi standardin mukaisia koekappaleita ohuemmillakin koekappaleilla. Esimerkiksi tasapainokosteuden saavuttaminen suhteellisessa kosteudessa 33 RH %:a kesti noin 200 vuorokautta.

Pitkästä tasaantumisajasta johtuen hygroskooppiset tasapainokosteuskäyrät pyrittiin määrittämään murskattujen koekappaleiden avulla. Murskattavat koekappaleet olivat lieriöitä, joiden korkeus oli noin 15 mm ja halkaisija noin 70 mm. Koekappaleet uunikuivattiin 105 ºC:n lämpötilassa. Uunikuivista koekappaleista mitattiin kuivapaino. Koekappaleet murskattiin siten, että kaikki kappaleet läpäisevät 12 mm seulan. Hienoaineksen määrä pyrittiin pitämään murskauksessa mahdollisimman vähäisenä. Murskatut koekappaleet uunikuivattiin uudelleen alumiiniastioissa, jonka avulla voitiin todeta murskauksessa tapahtunut painon menetys. Murskattujen koekappaleiden tasapainokosteuksien määritys toteutettiin muilta osin kuten kokonaisilla koekappaleilla.

3.4 Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä, painelevykoe

Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määritys toteutettiin painelevykokeella standardin NT BUILD 481 [7] mukaisesti. Kokeita varten tehtiin jokaisesta betonista kolme 12 koekappaleen sarjaa. Koekappaleiden halkaisija oli noin 52 mm ja korkeus hiottuna noin 6-9 mm. Standardin mukaan koekappaleet tulee kuivata uunissa 105 ºC:n lämpötilassa ennen vedellä kyllästämistä. Kokeessa käytettiin kuitenkin 60 ºC:n kuivatuslämpötilaa, ettei betoni pääse vaurioitumaan kuivatuksessa. Kuivatuslämpötilan vaikutus koekappaleiden kyllästymisasteeseen testattiin ja todettiin vähäiseksi.

Uunikuivatut koekappaleet asetettiin vakumilaitteen alipaineistusastiaan vakumoitavaksi. Vakumoinnilla pyritään poistamaan ilma huokosista, jolloin huokoset pääsevät täyttymään vedellä. Vakumointiaika oli 6–24 tuntia, jonka jälkeen koekappaleet asetettiin vesiupotukseen de-

ionisoituun veteen vähintään vuorokaudeksi. Standardin mukainen vakumointiaika on kolme tuntia, jonka jälkeen koekappaleet saatetaan vesiupotukseen, ja vakumointia jatketaan vesiupotuksessa tunnin ajan.

Kyllästetyt koekappaleet asetettiin painekammioon de-ionisoidulla vedellä kyllästetyn ja kokeessa käytettävässä paineessa paineistetun painelevyn päälle. Koekappaleen ja painelevyn välille muodostui kapillaarikontakti. 31 bar:n ja 100 bar:n kokeissa käytettiin painelevyn tilalla selluloosakalvoa. Painekammiot saatettiin tiettyyn paineeseen, jolloin ulkoinen paine tasaantui koekappaleiden huokostilaan. Paineen tasaantuessa huokosissa vaikuttava alipaine pienenee ja kosteutta poistuu koekappaleesta painelevyn kautta. Tuloksena saatiin koekappaleen kosteuspitoisuus tietyssä huokostilan paineessa. Tutkitut painetasot olivat 0,316 bar, 1 bar, 3,16 bar, 10 bar, 31,6 bar ja 100 bar. Kapillaarinen tasapainokosteus voidaan esittää joko huokosalipaineen *s* (Pa) tai huokosten säteen *r* (m) funktiona. Kaavassa 1 on esitetty huokosten säteen laskeminen.

Standardin mukaan tasaantumisaika on riittävä, kun painelevyyn liitetyn putken kautta tulee kosteutta vähemmän kuin 0,05 cm^3 48 tunnin aikana. Kokeissa ei tullut vettä poistoputken kautta aivan ensimmäisiä tunteja lukuun ottamatta, joten koeaikaa jatkettiin 14 vuorokauden pituiseksi. Kokeeseen liittyen oli aikaisempia tuloksia standardin mukaisen koeajan riittämättömyydestä [8]. 14 vuorokauden paineistuksen jälkeen koekappaleet punnittiin ja laskettiin kosteuspitoisuudesta keskiarvo. Koekappaleet uunikuivattiin ja kyllästettiin vedellä ennen seuraavaa koetta.

4. Tutkimustulokset

4.1 Veden imeytyskoe, tulokset

Koesarjojen koekappaleet on porattu vaakaan valetuista betonielementeistä. Betoni 1:stä tehtiin kaksi koesarjaa, jotka testattiin betonin ollessa 147 ja 278 vuorokauden ikäistä. Betoni 2:n betonielementistä testattiin myös kaksi koesarjaa, jotka testattiin 245 ja 370 vuorokauden ikäisestä betonista. Betonista 3 tehdystä betonielementistä testattiin yksi koesarja 215 vuorokauden kuluttua valamisesta. Kokeista saadut vedenimeytymiskertoimien ja vedentunkeutumiskertoimien arvot on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 1. Vedenimeytymiskertoimen ja veden tunkeutumiskertoimen tulokset.

Kapillariteettikerroin A_w [kg/(m²s^{0,5})]			
	Keskiarvo	Keskihajonta	90 %:n luottamusväli
Betoni 1	1,90E-03	1,25E-03	1,03E-03
Betoni 2	1,26E-03	4,84E-04	3,98E-04
Betoni 3	5,65E-03	9,45E-04	1,59E-03
Veden tunkeutumiskerroin B^w [mm/s^{0,5}]			
	Keskiarvo	Keskihajonta	90 %:n luottamusväli
Betoni 1	4,74E-02	3,54E-02	2,91E-02
Betoni 2	4,36E-02	8,63E-03	7,10E-03
Betoni 3	9,11E-02	1,03E-02	1,74E-02

Taulukosta 1 voidaan havaita eri betonilaaduilla hajontaa tuloksissa keskenään. Myös koekappaleiden välillä on paljon hajontaa, josta kertoo suuri 90 %:n luottamusväli tuloksissa.

Kapillaarinen kyllästyskosteus w_{cap} (kg/m^3) tutkittiin jokaisen tutkitun betonin osalta ensimmäisestä koesarjasta. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

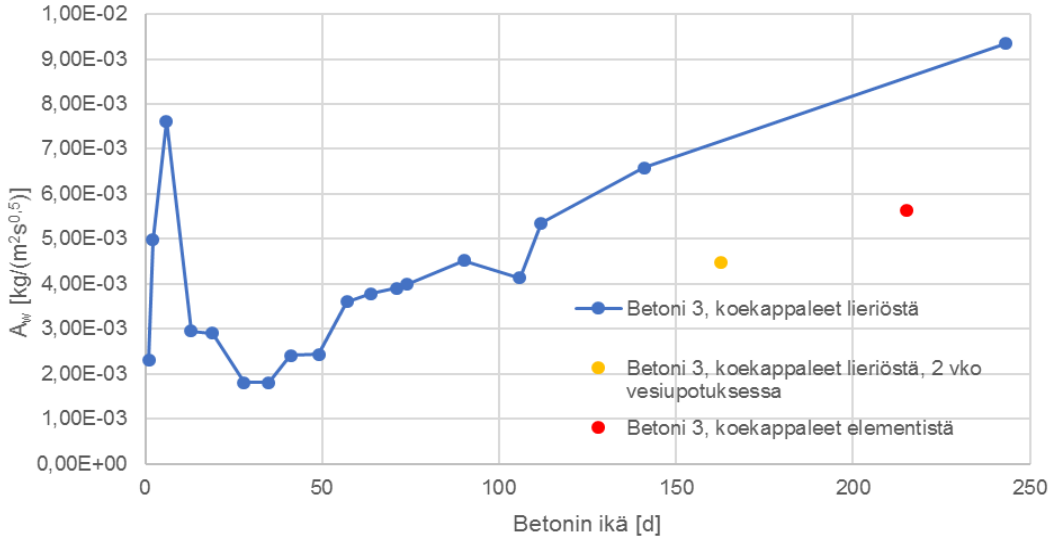
Taulukko 2. Tutkittujen betonien kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus. Taulukossa on esitetty myös tutkimushetki betonin valmistuksesta, tuloksen 90 %:n luottamusväli ja luottamusvälin hajonta.

Betonilaatu	**Aika valusta** (d)	**w_{cap}** (kg/m^3)	**90% luottamusväli** (kg/m^3)	**luottamusvälin hajonta**
Betoni 1	147	130,1	3,0	2,27 %
Betoni 2	245	131,1	3,4	2,61 %
Betoni 3	215	134,5	9,6	7,11 %

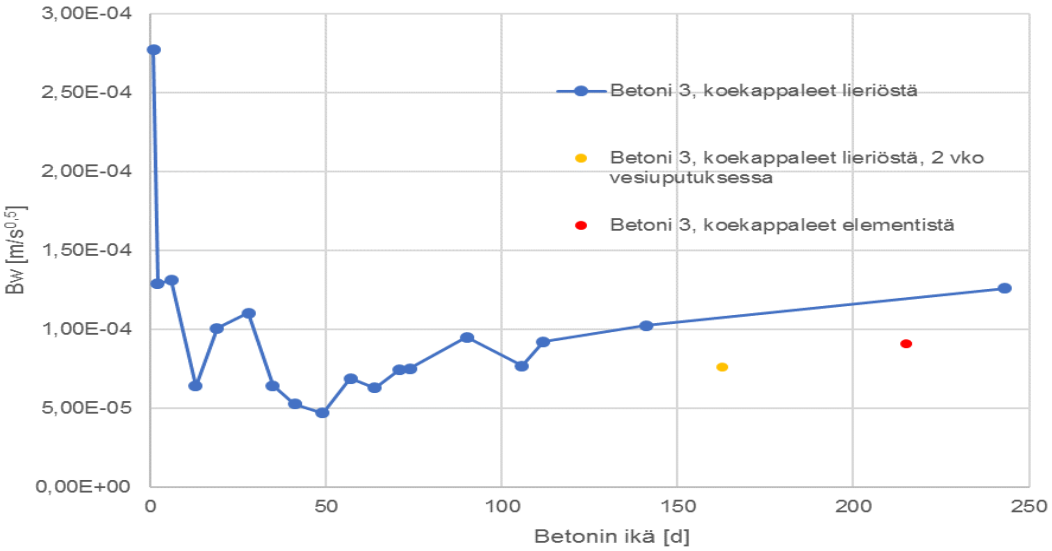
Taulukosta 3 voidaan havaita kapillaaristen kyllästyskosteuspitoisuuksien olevan tutkituissa betoneissa suuruusluokaltaan lähellä toisiaan.

4.1.1 Veden imeytymisominaisuuksien kehittyminen

Betoni 3:n betonilla tutkittiin veden imeytymisominaisuuksien kehittymistä ajan funktiona. Tulokset on esitetty kuvissa 4 ja 5.



Kuva 2. Betonin 3 vedenimeytymiskertoimen A_w kehittyminen ajan funktiona. Koekappaleet on sahattu 50 cm korkeasta lieriöstä noin 20 mm korkeiksi lieriöiksi. Taulukossa on esitetty myös tulokset koesarjasta, jossa koekappaleet kasteltiin vedellä kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen ja annettiin tasaantua RH 50 % suhteelliseen kosteuteen ennen veden imeytyskoetta sekä tulokset 150 mm korkeasta elementistä valmistetuista koekappaleista.

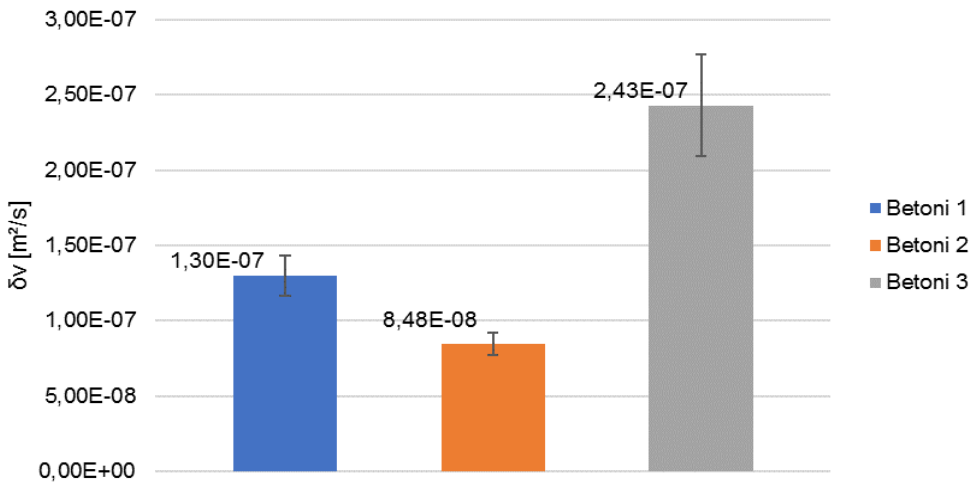


Kuva 3. Betonin 3 veden tunkeutumiskertoimen B_w:n kehittyminen ajan funktiona. Koekappaleet on sahattu 50 cm korkeasta lieriöstä noin 20 mm korkeiksi lieriöiksi. Taulukossa on esitetty myös tulokset koesarjasta, jossa koekappaleet kasteltiin vedellä maksimikosteuspitoisuuteen ja annettiin tasaantua RH 50 % suhteelliseen kosteuteen ennen veden imeytyskoetta sekä tulokset 150 mm korkeasta elementistä valmistetuista koekappaleista.

Kuvien 4 ja 5 perusteella vedenimeytymiskerroin ja vedentunkeutumiskerroin lähtevät kasvamaan noin kuukauden kuluttua valamisesta. Tulokset eivät vastanneet tältä osin hypoteesiä. Alun korkeisiin tuloksiin voi vaikuttaa alun voimakas hydrataatio betonissa ja korkea valamisen jälkeinen kosteuspitoisuus.

4.2 Märkäkuppikoe, tulokset

Märkäkuppikokeella testattiin tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevyys ominaisuuksia. Tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevyydet on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 4. Tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevyydet. Jana esittää 90 %:n luottamusväliä.

Kuvasta 6 voidaan havaita Betonin 3 läpäisevän eniten vesihöyryä tutkituista betoneista. Betonin 3 suurempi vesihöyrynläpäisevyys voi selittyä suuremmalla runkoaineen koolla. 32 mm runkoaine voi läpäistä koekappaleen, jolloin vesihöyrynläpäisy kasvaa runkoaineen ja sementtipastan rajapinnan kautta.

4.3 Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, tulokset

Pitkästä tasaantumisajasta johtuen adsorptiokäyrältä tutkittiin kolme pistettä ja desorptiokäyrältä kaksi pistettä tämän tutkimuksen yhteydessä. Tulokset on esitetty taulukoissa 6 ja 7.

Taulukko 6. Tutkitut pisteet adsorptiokäyrältä.

RH %	**Betoni 1** kg/m³	**Betoni 2** kg/m³	**Betoni 3** kg/m³
11,7	16,5	16,7	16,6
33	42,4	44,1	48,0
97	139,1	132,0	151,9

Taulukko 7. Tutkitut pisteet desorptiokäyrältä.

RH %	**Betoni 1** kg/m³	**Betoni 2** kg/m³	**Betoni 3** kg/m³
93	123,3	119,2	130,1
85	117,7	115,8	122,7

Taulukosta 6 voidaan huomata korkeat lukemat adsorptiosta suhteellisessa kosteudessa 97 RH %. Tuloksiin vaikuttivat pienet lämpötilan muutokset olosuhdehuoneessa, jolloin betonikoekappaleiden pinnalle pääsi kondensoitumaan vettä. Tästä johtuen tulos ei vastaa hygroskooppisella alueella olevaa tulosta.

4.3.1 Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, murskatut koekappaleet

Murskatuilla koekappaleilla tehtyjen tasapainokosteuskokeiden perusteella tasapainokosteudet jäävät matalalle tasolle verrattuna kokonaisiin koekappaleisiin. Taulukkoon 8 on koottu vastaavien adsorptiokäyrän tutkimuspisteiden tasapainokosteudet, kuin kokonaisilla koekappaleilla tutkittiin.

Taulukko 8. Murskattujen koekappaleiden tasapainokosteudet adsorptiosta.

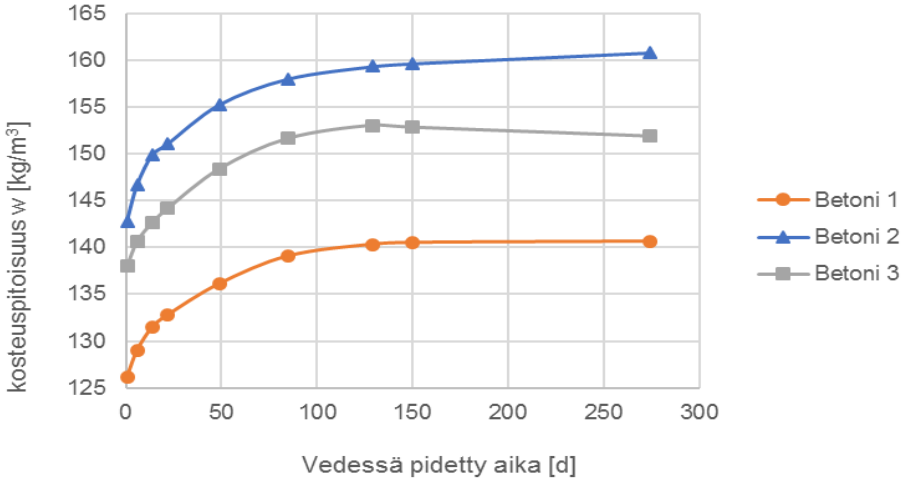
RH %	**Betoni 1** kg/m³	**Betoni 2** kg/m³	**Betoni 3** kg/m³
11,7	11,4	12,1	12,0
33	29,6	28,2	35,4
97	95,5	100,8	108,7

Verrattaessa taulukoita 6 ja 8 huomataan tasapainokosteuksien eron olevan suuri kaikissa tutkituissa suhteellisen kosteuden pitoisuuksissa.

4.4 Painelevykoe, tulokset

4.4.1 Maksimikosteuspitoisuus

Kosteuspitoisuus kasvoi koekappaleissa vesiupotuksessa yli neljän kuukauden ajan standardin NT BUIL 481 [7] mukaisen kyllästämisen jälkeen. Kuvassa 7 on esitettynä koekappaleiden kosteuspitoisuuden lisääntyminen vesiupotuksessa standardin mukaisen kyllästämisen jälkeen.



Kuva 5. Kosteuspitoisuuden kasvaminen koekappaleilla vesiupotuksessa koesarjalla 3.

Kuvan 7 perusteella kosteuspitoisuus nousee noin 10–20 % standardin mukaisen kyllästämisen jälkeen. Tämän perusteella lujilla betoneilla tarvitaan standardin mukaista pidempää vesiupotusaikaa maksimikosteuspitoisuuden w_{max} saavuttamiseksi. Taulukossa 9 on esitettynä koekappaleiden vedellä kyllästämisessä saavutetut suurimmat kosteuspitoisuudet.

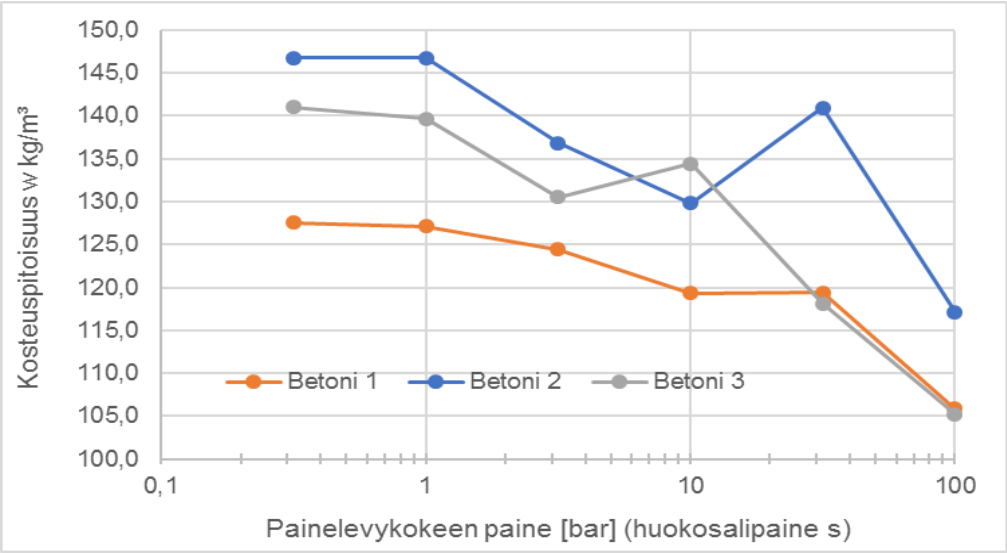
Taulukko 9. Tutkittujen betonilaatujen maksimikosteuspitoisuudet w_{max} koesarja 1:llä.

Betonilaatu	**Keskiarvo** kg/m³	**Keskihajonta** kg/m³	**90 % luottamusväli** kg/m³	**Vedessä** d
Betoni 1	144,3	8,7	4,5	275
Betoni 2	164,4	13,1	6,8	275
Betoni 3	157,5	8,6	4,5	275

Taulukon 9 perusteella Betonilla 2 on korkein maksimikosteus tutkituista betonilaaduista. Tuloksissa on koesarjan eri koekappaleiden välillä varsin paljon hajontaa johtuen pienestä koekappaleen koosta. Koekappaleiden määränä oli kuitenkin jokaisessa koesarjassa 12, joten 90 % luottamusväli on suhteellisen pieni.

4.4.2 Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä

Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tulokset on esitetty kuvassa 8.



Kuva 6. Painelevykokeista saadut kapillaariset tasapainokosteudet.

Kuvasta 8 voidaan havaita Betonin 1 omaavan alhaisemmat tasapainokosteudet kapillaarisella alueella Betoniin 2 tai Betoniin 3 verrattuna. Betonien 1 ja 2 kapillaarisessa tasapainokosteuskäyrässä on havaittavissa selvästi trendistä poikkeavan korkeita tuloksia 31 barin kokeen osalta. 31 barin ja 100 barin kokeissa käytettiin paineastian ja koekappaleiden välissä selluloosakalvoa. On mahdollista, että tiiviin selluloosakalvon läpi ei ole betonin kosteus päässyt tasapainottumaan 14 vuorokauden aikana 31 barin kokeessa Betonien 1 ja 2 koekappaleista. Betoneissa 1 ja 2 oli Betonia 3 pienemmät kapillaariset vedensiirtymisominaisuudet vedenimeytyskokeen perusteella, joka osaltaan hidastaa kosteuden poistumista koekappaleista.

0,316 barin ja 1 barin kokeissa koekappaleilla keskipaino nousi kokeen aikana. Betonista 1 tehdyssä kokeessa myös 3,16 barin kokeessa tapahtui painonnousua koekappaleiden keskipainossa. Ennen pienillä paineilla tehtäviä kokeita ei saavutettu maksimikosteuspitoisuutta, koska koekappaleiden kyllästäminen tehtiin standardia NT BUILD 481 [7] mukaillen. Koekappaleiden kosteuspitoisuudet olivat ennen kyseisiä kokeita keskimäärin Parmalla 122,7 kg/m^3, Lujabetonilla 143,3 kg/m^3 ja Ruduksella 134,2 kg/m^3. Painon nousu koekappaleissa johtuu todennäköisesti kosteuden siirtymisestä vedellä kyllästetystä painelevystä kapillaarisesti koekappaleisiin.

5. Yhteenveto

Tuloksien perusteella rakennusmateriaalien hygroskooppisen ja kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittämistä ohjaavia standardeja tulisi kehittää lujien betonilaatujen tutkimisen osalta. Hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän määrittämisessä tulisi tutkia standardin mukaista pienempiä koekappaleiden soveltuvuutta kokeeseen, jolloin kosteuspitoisuuden tasaantumisajat olisivat lyhyemmät. Koekappaleiden tulee olla kuitenkin kokonaisia, murskatuilla koekappaleilla tasapainokosteus ei vastaa kokonaisilla koekappaleilla saatuja tuloksia. Tutkimuksen perusteella koekappaleen tasaantumista olisi suositeltavaa seurata painonmuutoskuvaajan avulla

Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittämisessä standardin mukainen koekappaleiden vedellä kyllästäminen ja standardin mukainen kokeen kesto eivät tämän tutkimuksen perusteella ole ajallisesti riittävän pitkiä betonille. Maksimikosteutta pienemmällä koekappaleiden

kosteuspitoisuudella tulokset ovat virheellisiä varsinkin pienillä paineilla. Painelevykokeen toteuttaminen vaatii lisätutkimusta betonin osalta.

Tuloksista on havaittavissa, että eri valmistajien betoneiden kosteudensiirtymisominaisuuksissa on suuria eroja niin vesihöyryn, kuin myös kapillaarisesti siirtyvän kosteuden osalta. Huomion arvoista on myös vedenimeytymiskertoimen ja vedentunkeutumiskertoimen kasvaminen ensimmäisten kuukausien aikana, mikä ei ollut oletettavaa, koska korkealujuuksisen betonin tulisi lujittuessaan tiivistyä. Syynä tulokseen voi olla mikrohalkeilu, jonka tiedetään kasvattavan veden tunkeutumista betoniin. Asia vaatii lisätutkimusta myös betonin mikrorakenteen kehittymisen osalta.

Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 12390-3. 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

[2] Tuominen, E. 2016. Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määritys vapaan veden imeytyskokeella. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

[3] SFS-EN ISO 15148/A1. 2016. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Amendment 1 (ISO 15148:2002, modified). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

[4] Manelius, E. 2013. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehittäminen. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

[5] SFS-EN ISO 12572. 2001. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Brussels, European Committee for Standardization.

[6] SFS-EN ISO 12571. 2014. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties (ISO 12571:2013). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

[7] Nordtest method. Retention curve and pore size distribution. 1997. NT BUILD 481. Espoo, Nordtest.

[8] Vainio, M. 2016. Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto.