Tampereen yliopisto

Pauli Karjala

# TIILIVERHOUKSEN KAPILLAARISEN TASAPAINOKOSTEUSKÄYRÄN MÄÄRITYS PAINELEVYLAITTEISTOLLA

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Elokuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Pauli Karjala: Tiiliverhouksen kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määritys painelevylaitteistolla
(Determination of the Capillary Equilibrium Moisture Curve of Brick Veneer Using a Pressure Plate Apparatus)
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Elokuu 2024

---

Tässä kandidaatintyössä määritetään reikätiiliverhouksen tasapainokosteuskäyrä kapillaarisella alueella. Kokeiden yhteydessä suoritetaan painelevylaitteiston käyttöönotto uudessa laboratoriossa. Tutkimus on rajoitettu olemassa olevien koerakennusten kahteen reikätiilituotteeseen, sekä niiden muurauksessa käytetyn laastin testaukseen.

Painelevykokeessa vedellä kyllästetystä materiaalista poistetaan kosteutta ylipaineen avulla, kapillaarisen kontaktin kautta. Saatu tasapainokosteuskäyrä on materiaalin desorptio- eli kuivumiskäyrä. Reikätiilen testaus toteutetaan tiilen pinnasta porattuja, kiinteitä tiilikiekkoja käyttäen. Laastikappaleet valmistetaan muuratusta rakenteesta irrotettua laastia käyttäen.

Desorptiokäyrän määrityksen lisäksi tutkimuksessa arvioidaan toistuvien kuivaus- ja kyllästyssyklien vaikutusta materiaalien kuivatiheyteen ja kyllästyskosteuspitoisuuteen. Laastin kuivatiheys ja sen muutokset liittyvät materiaalin kemiallisesti sitoutuneeseen eli hydratoituneeseen kosteuteen. Kyllästyskosteuspitoisuus on materiaalin huokoisuudesta – sekä laastin tapauksessa hydrataatiosta – riippuvainen suure.

Ensimmäisen tiilierän kosteuspitoisuus kapillaarisella alueella on noin kolminkertainen toiseen erään verrattuna. Tiilierällä ei ole merkittävää vaikutusta laastin desorptiokäyrään. Muutokset tiilierien kyllästyskosteuspitoisuudessa ja kuivapainossa kokeiden aikana eivät olleet tilastollisesti merkittäviä. Saumalaastin kyllästyskosteuspitoisuus kasvoi keskimäärin 3,2 % kokeiden aikana, kun taas kuivapaino laski noin 0,4 %.

Tutkimus toteutettiin osana Tampereen yliopiston, VTT:n sekä yhdeksän yrityksen Future Spaces yhteishanketta.

Avainsanat: rakennusfysiikka, painelevykoe, tasapainokosteuskäyrä, tiiliverhous

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO ..... 1
1.1 Työn tausta ..... 1
1.2 Työn tavoitteet ..... 1
2.TEORIA ..... 3
2.1 Kosteus ilmassa ..... 3
2.2 Kosteus huokoisessa materiaalissa ..... 3
2.3 Huokosalipaine ..... 4
3.NÄYTTEIDEN VALMISTELU ..... 6
2.1 Koekappaleiden dimensiot ja valmistus ..... 6
3.2 Näytteiden kuivaus ..... 7
2.3 Koekappaleiden säilytys ..... 8
4.KOKEET ..... 9
4.1 Painelevylaitteisto ja paineentuottojärjestelmä ..... 10
4.2 Kokeiden aikana ilmenneet ongelmat ..... 11
5.TULOKSET ..... 13
5.1 Saumalaasti ..... 13
5.2 Tiilet ..... 14
6.LAITTEISTON YLLÄPITO ..... 17
6.1 Laitteiden varastointi ..... 17
6.2 Muunnos paineilmaverkkoon ..... 17
LÄHDELUETTELO ..... 18

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | | |
|---|---|---|
| $P_g$ | ilmanpaine | Pa |
| $T$ | lämpötila Kelvin | K |
| t | lämpötila Celsius | °C |
| $v$ | vesihöyrypitoisuus | kg/m$^3$ |
| $v_{sat}$ | vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus | kg/m$^3$ |
| φ | suhteellinen vesihöyrypitoisuus | % RH |
| $p_v$ | vesihöyryn osapaine | Pa |
| $p_{v,sat}$ | vesihöyryn kyllästysosapaine | Pa |
| $n$ | huokoisuus | - |
| $V_{pores}$ | huokostilavuus | m$^3$ |
| $V_{tot}$ | kokonaistilavuus | m$^3$ |
| $w$ | kosteuspitoisuus | kg/m$^3$ |
| $u$ | kosteuspitoisuus paino-osina | kg/kg |
| $\sigma$ | kaarevan pinnan pintajännitys | N/m |
| θ | kontaktikulma | ° |
| r | vesipinnan kaaren säde | m |
| $s$ | huokosalipaine | Pa |
| $R$ | moolinen kaasuvakio | 8,314 J/(Kmol) |
| $M$ | veden moolimassa | 18,016 g/mol |

# 1. JOHDANTO

Rakennusmateriaalien kosteusteknisellä käyttäytymisellä on merkittävä vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen, elinkaareen sekä sisäilman laatuun. Huokoisissa materiaaleissa kosteuden ja kaasujen sitoutuminen ja kulkeutuminen tapahtuu huokosverkostossa.

Tasapainokosteuskäyrä on oleellinen osa rakennusmateriaalien kosteusteknistä käyttäytymistä. Hygroskooppinen, eli materiaalia ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta riippuva tasapainokosteuskäyrä voidaan määrittää 98 % RH suhteelliseen kosteuteen asti (Hagentoft 2001). Painelevylaitteistoa käytetään tasapainokosteuskäyrän desorptiokäyrän määritykseen kapillaarisella alueella, eli 95–100 % RH suhteellisessa kosteudessa (ASTM C1699-09).

## 1.1 Työn tausta

Painelevylaitteistolle on kehitetty kokeen toteutusohje aikaisempien diplomitöiden (Vainio 2016) (Vänttinen 2017) (Tuominen 2020) yhteydessä. Näihin töihin perustuva ohjeistus on paikoin puutteellinen kokoelma materiaalikohtaisia huomioita, jotka eivät välttämättä päde kaikissa tilanteissa. Lisäksi laitteistoa on uusittu, ja kaikkia opinnäytetöissä mainittuja parannuksia tai huomioita ei ole kirjattu ohjeeseen.

Painelevykokeet tehdään osana Future Spaces hanketta, jonka tavoitteena on luoda palvelukonsepti palvelu- ja liikerakennusten ennakoivaan korjaukseen. Tämä työ kuuluu työpakettiin 4, jossa tutkitaan muun muassa puu- ja tiiliverhoiltujen ulkoseinärakenteiden sekä tuuletettujen yläpohjien rakennusfysikaalista toimintaa. Selvitettyjä kosteusteknisiä materiaaliominaisuuksia käytetään rakenteiden mallinnuksen tarkentamiseen.

## 1.2 Työn tavoitteet

Työssä tutkitaan Future Spaces hankkeen tiiliverhousten kaksi reikätiilierää, sekä niiden muurauksessa käytettyä laastia. Painelevykokeilla määritetään valittujen materiaalien tasapainokosteuden desorptiokäyrä kapillaarisella alueella. Kokeiden toteutuksessa sovelletaan standardeja (ASTM C1699-09 2009) ja (NT BUILD 481 1997), sekä näiden standardien pohjalta laadittua Rakennusfysiikan tutkimusryhmän sisäistä toimintatapa-

ohjetta. Materiaalikokeiden lisäksi tässä työssä listataan laitteiston käytön kannalta oleellisia toimenpiteitä ja muutoksia, joita ei ole mainittu alkuperäisessä toimintatapaohjeessa.

# 2. TEORIA

## 2.1 Kosteus ilmassa

Kostea ilma määritellään rakennusfysiikassa kolmella muuttujalla, jotka ovat ilmanpaine $P_g$ [Pa], lämpötila T [K] tai t [°C] ja vesihöyrypitoisuus v [kg/m$^3$]. Ilman vesihöyrypitoisuus voidaan esittää kolmella suureella: vesihöyrypitoisuus v [kg/m$^3$], suhteellinen vesihöyrypitoisuus φ [% RH] ja vesihöyryn osapaine $p_v$ [Pa]. Vesihöyrypitoisuuden ja vesihöyryn osapaineen suhde voidaan esittää yksinkertaistetulla ideaalikaasun tilanyhtälöllä 2.1. (Hagentoft 2001)

$$p_v = 461{,}4 \cdot (\mathrm{t} + 273{,}15) \cdot v \tag{2.1}$$

Ilman sisältämää suurinta mahdollista vesihöyrymäärää kutsutaan kyllästyskosteuspitoisuudeksi $v_{sat}$ [kg/m$^3$] tai kyllästysosapaineeksi $p_{v,sat}$ [Pa]. Kyllästysosapaineen ja lämpötilan suhteelle on kehitetty useita korrelaatiokaavoja, joista kaavoissa 2.2 ja 2.3 on esitetty standardin SFS-EN ISO 13788 mukaiset funktiot.

$$p_{v,sat} = 610{,}5e^{\frac{17{,}269\,\mathrm{t}}{237{,}3+\mathrm{t}}}, kun\ \mathrm{t} \geq 0\ °\mathrm{C} \tag{2.2}$$

$$p_{v,sat} = 610{,}5e^{\frac{21{,}876\,\mathrm{t}}{265{,}5+\mathrm{t}}}, kun\ \mathrm{t} < 0\ °\mathrm{C} \tag{2.3}$$

Ilman suhteellinen kosteus määritetään vesihöyrypitoisuuden ja kyllästyskosteuspitoisuuden perusteella käyttäen kaavaa 2.4 (Pinterić 2017).

$$\phi = \frac{p_v}{p_{v,sat}} = \frac{v}{v_{sat}} \tag{2.4}$$

## 2.2 Kosteus huokoisessa materiaalissa

Huokoisuus n [-] kuvastaa materiaalin ilmataskujen osuutta kokonnaistilavuudesta. Huokoisuus on määritetty kaavassa 2.5.

$$n = \frac{V_{pores}}{V_{tot}} \tag{2.5}$$

jossa $V_{pores}$ = Huokostilavuus [m$^3$]

$V_{tot}$ = Kokonaistilavuus [m$^3$].

Vesi voi sitoutua materiaaliin fysikaalisesti tai kemiallisesti. Fysikaalisesti sitoutunut kosteus esiintyy vesihöyrynä, nesteenä ja jäänä. Sitoutuneen veden määrä on riippuvainen ilman suhteellisesta kosteudesta φ sekä lämpötilasta T. Materiaalin kosteuspitoisuus w

[kg/m$^3$] voidaan ilmoittaa tilavuuden suhteen tai paino-osana u [kg/kg tai %] käyttäen kaavaa 2.6

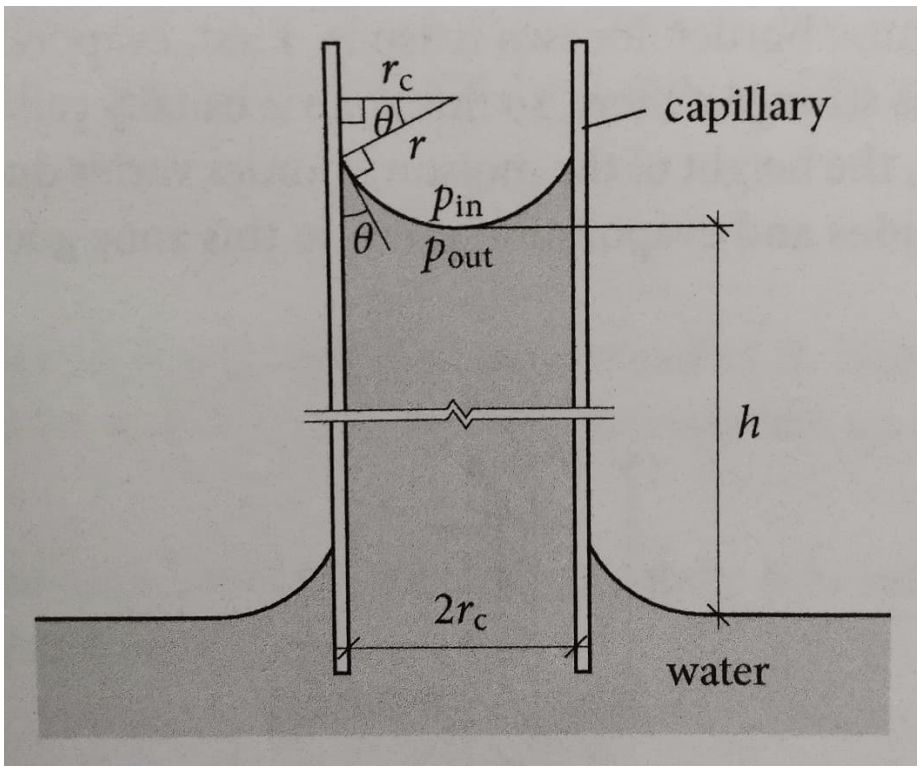
$$u = \frac{w}{p_{dry}}, \tag{2.6}$$

jossa $p_{dry}$ on materiaalin kuivatiheys [kg/m$^3$]. (Hagentoft 2001)

Kemiallisesti vettä sitovia molekyylejä kutsutaan hydraateiksi. Yleisiä hydraatteja sisältäviä rakennusmateriaaleja ovat kipsilevyt ja sementit. Kipsin eli kalsiumsulfaattihydraatin kemiallisesti sitoutunut vesi haihtuu pääasiassa 95–170 °C lämpötilassa (Strydom 1995), kun taas sementin ettringiitin hajoamistuotteita alkaa esiintyä jo 50 °C lämpötilassa (Zhou 2001). Pääasiassa ettringiitin dehydrataatio tapahtuu kuitenkin 60–80 °C asteen lämpötilassa (Ghorab 1985), (Shimada 2004).

## 2.3 Huokosalipaine

Materiaalin huokosalipaine syntyy kapillaari-imun vaikutuksesta. Kuvassa 1 esitetään kapillaariputken avulla kapillaari-imussa vaikuttavat voimat.




***Kuva 1.*** *Kapillaarisuus ohuessa lasiputkessa. (Pinterić 2017)*

Huokosalipaine s [Pa] voidaan esittää Young–Laplace yhtälöllä, joka määrittää kahden staattisen fluidin välisen kapillaaripaineen. (Hagentoft 2001) (Pinterić 2017)

$$s = \Delta p = p_{in} - p_{out} = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{\mathrm{r}} \tag{2.7}$$

Jossa $\sigma = \text{kaarevan pinnan pintajännitys}$

$\theta = \text{kontaktikulma}$

$\text{r} = \text{kaaren säde}$

Painelevykokeen standardien (ASTM C1699-09 2009) (NT BUILD 481 1997) mukaiset paineet ja niitä vastaavat suhteelliset ilmankosteudet määritetään termodynamiikkaan perustuvalla Kelvinin yhtälöllä 2.8.

$$RT \ln\left(\frac{p_v}{p_{v,sat}}\right) = -\frac{2\sigma}{r} M \tag{2.8}$$

Jossa $R = 8{,}314463 \ \frac{J}{K \cdot mol}$ (moolinen kaasuvakio)

$p_v = \text{vesihöyryn osapaine}$

$p_{v,sat} = \text{vesihöyryn kyllästyspaine}$

$M = 18{,}016 \ \frac{g}{mol}$ (veden moolimassa)

Täysin kostean materiaalin kontaktikulma θ on 0° (Wang 2020). Yhdistämällä kaavat 2.4, 2.7 ja 2.8 saadaan kammion ilmanpaineen ja ilman suhteellisen kosteuden yhtälö.

$$s = -\frac{RT}{M} \ln(\phi) \tag{2.9}$$

# 3. NÄYTTEIDEN VALMISTELU

Future Spaces hankkeen testiseinät on valmistettu poltetusta reikätiilestä ja muurauslaastista. Koska seiniä lisättiin tutkimuksen edetessä, on rakenteissa käytetty kahta saman julkisivutiilen tuote-erää. Kokeissa tutkitaan molemmat tiilierät. Laastina käytetään kuivamuuratusta rakenteesta irrotettua laastia. Materiaalien tiedot on esitetty Taulukossa 1.

***Taulukko 1.*** *Materiaalit.*

| Materiaali | Nimi | Valmistaja | Muuta |
|---|---|---|---|
| Reikätiili | MRT Punainen sileä | Wienerberger | 75 x 85 x 285 $mm^3$ |
| Muurauslaasti | ML 5 M100/600 | Weber | |

Taulukossa 2. esitetään tutkittavan rakenteen, materiaalien ja koekappaleiden tiheys. Laastin valmistuksessa käytettiin 0,12 litraa vettä laastikiloa kohden. Koekappaleet muurattiin kesäkuussa kuivia tiiliä käyttäen. Muurauksen kovettuminen tapahtui sateelta suojattuna ulkoilmassa.

***Taulukko 2.*** *Materiaalien tiheys.*

| Materiaali | Tiheys [kg/$m^3$] |
|---|---|
| Muurattu rakenne 300 x 300 $mm^2$ | 1592 |
| Kokonainen tiili - erä I[a] | 1422 |
| Kokonainen tiili - erä II[a] | 1495 |
| Umpitiilikiekko - erä I[b] | 1952 |
| Umpitiilikiekko - erä II[b] | 2021 |
| Laasti | 1757 |

[a] Tiilen reiät osana tilavuutta.
[b] Tiilen tiheys ilman reikiä. Laskettu tiilestä poratuille kiekoille.

## 2.1 Koekappaleiden dimensiot ja valmistus

Painelevykokeet tehdään vähintään kymmenen koekappaleen sarjoina käyttäen kiekkoja, joiden pinta-ala on vähintään 15 $cm^2$ ja paksuus 5–15 mm (NT BUILD 481 1997). Koekappaleen paksuus on verrannollinen kokeen kestoon. Reikätiilten geometria rajoittaa kappaleiden paksuuden noin kymmeneen millimetriin, kun taas laastin tapauksessa sauman korkeus (15 mm) määrä kappaleiden maksimikorkeuden.

Tiilten pinnalta porattiin 52 mm halkaisijaltaan olevia kiekkoja, joiden lasittunut pinta poistettiin ja molemmat pinnat hiottiin suoraksi. Laastikappaleiden valmistuksessa märkäsahattiin timanttilaikalla muuratusta seinästä sauma, josta porattiin näytekappaleet.

Myös laastikappaleiden pinnat hiottiin suoriksi ja mahdollisimman tasaisiksi. Laastin haurauden vuoksi jouduttiin käyttämään suhteellisen paksuja kappaleita, mikä pidentää kokeiden kestoa.

***Kuva 2.*** *Koekappaleita.*

Kuvassa 2. järjestyksessä ylhäältä tiilierä 1, tiilierä 2 sekä laasti. Kuvassa 3. materiaalit tarkemmin.

***Kuva 3.*** *Koekappaleet läheltä kuvattuna.*

## 3.2 Näytteiden kuivaus

Sementtien kuivauksessa on huomioitava kuivausmenetelmän vaikutus materiaalin huokoisuuteen. Sementin kovettumisessa tapahtuu hydrataatio reaktio, jossa vettä sitoutuu kemiallisesti molekyyleihin. Yleisesti käytetyissä kuivauslämpötiloissa (60 ja 105 °C) hydratoitunutta vettä poistuu materiaalista, jonka seurauksena huokoisuus kasvaa ja sementtiin syntyy mahdollisesti mikrohalkeamia. Matalampaa kuivauslämpötilaa käytetään yleisesti materiaaleihin, joissa on hydraatteja.

Vakuumikuivauksen vaikutus huokoisuuteen vastaa suuruudeltaan 60 °C uunikuivausta, kun taas 105 °C uunikuivaus lisää huokoisuutta noin 15 %. Kylmäkuivaus vaikuttaa kokonaishuokostilavuuteen muita menetelmiä vähemmän, mutta menetelmä aiheuttaa todennäköisesti vaurioita eri huokoskokoalueella. Vakuumi- ja kylmäkuivausmenetelmien huokoskokojakaumat poikkeavat uunikuivausmenetelmistä. (Gallé 2001)

Koska vakuumikuivaus on menetelmänä 60 °C uunikuivausta nopeampi ja toimii osana koekappaleiden kyllästysprosessia, kuivattiin kaikki kappaleet vakuumissa. Tiilten kuivaukseen riitti vuorokauden vakumointi, kun taas laasteilla prosessi kesti useita päiviä.

Tulosten tarkkuus ja luotettavuus paranee, kun koekappaleita ei siirretä suoraan seuraavaan kosteuteen: kokeen lopetuksen, punnituksen ja uuden kokeen aloituksen aikana kappale voi kuivua tulosten kannalta merkittävästi (Tuominen 2020). Hydrataatiosta johtuen laastikappaleita ei haluttu kyllästää uudelleen kokeiden välissä, joten laasteja valmistettiin kaksi vuorottelevaa koesarjaa. Näin paine-ero peräkkäisten kokeiden välillä oli suurempi, eikä ylikuivumista päässyt tapahtumaan.

Koekappaleiden vakumoinnissa ja kyllästyksessä noudatettiin standardin ASTM C1699 vähimmäisvaatimuksia. Laasteilla vakumointiaika pidennettiin yhdestä kolmeen vuorokauteen, ja vesiupotus kolmesta päivästä viikkoon. Poikkeukset standardiin tehtiin aikaisemman diplomityön (Tuominen 2020) tulosten perusteella.

## 2.3 Koekappaleiden säilytys

Aikaisempien kokeiden koekappaleita on säilytetty vesiupotuksessa läpinäkyvissä astioissa, käyttäen käänteisosmoosilla käsiteltyä eli tyypin III (ASTM D1193-06 2018) puhdasta vettä. Näiden näytteiden säilyvyys ei ole ollut erityisen hyvä edes lyhyellä aikavälillä. Pitkä-aikainen säilytys vedellä kyllästettynä vaikuttaa myös materiaalien vertailukelpoisuuteen, sillä jotkin materiaalit voivat imeä kosteutta vesiupotuksessa kuukausien ajan vakumoinnin jälkeen (Vänttinen 2017). Standardien mukaiset kyllästysprosessit kestävät muutamia tunteja tai päiviä. Lisäksi materiaalit voivat jatkaa hydratoitumista vesiupotuksen aikana.

Koekappaleiden säilyvyyttä parannettiin vaihtamalla astiat valoa läpäisemättömiksi. Pitkä-aikaissäilytyksessä voitaisiin myös käyttää tyypin I tai II puhdistettua vettä, mutta lähtökohtaisesti kappaleiden säilytys kokeiden ulkopuolella voidaan toteuttaa tehokkaasti kuivaamalla kappaleet. Kuivauksessa tulee kuitenkin huomioida, että hydratoituvien materiaalien uudelleenkuivaus muuttaa huokoisuutta.

# 4. KOKEET

Kokeiden alussa kappaleet kuivataan kuivapainon määrittämiseksi. Kuivaus tehdään vakumoinnilla, joka on myös kyllästysprosessin ensimmäinen vaihe. Punnituksen jälkeen kappaleet vakumoidaan uudelleen ilman poistamiseksi, ja tämän jälkeen kappaleet upotetaan veteen kyllästyskosteuspitoisuuden saavuttamiseksi. Kyllästetyt koekappaleet punnitaan ja asetetaan painekammioon. Ylimääräisen kosteuden poistuttua kappaleista kappaleet punnitaan uudelleen.

Kokeet toteutetaan 23 °C (NT BUILD 481 1997) tai 22 °C (ASTM C1699-09 2009) ± 1 °C lämpötilassa. Tutkimustilan olosuhteidenhallinnan rajoissa kesällä on käytetty 23 °C tavoitelämpötilaa, ja talvella 22 °C. Lämpötilavaihtelun vaikutus tuloksiin on alle promillen suuruusluokkaa. Koesarjassa käytetään standardin NT BUILD 481 mukaisia painetasoja. Kuvassa 4. esitetään standardin mukaiset paineet.

| S<br>Pa | S<br>bar | $\phi^*$<br>- |
|---|---|---|
| $10^2$ | 0.001 00 | 0.999 999 27 |
| $10^{2.5}$ | 0.003 16 | 0.999 997 7 |
| $10^3$ | 0.010 0 | 0.999 992 7 |
| $10^{3.5}$ | 0.031 6 | 0.999 977 |
| $10^4$ | 0.100 | 0.999 927 |
| $10^{4.5}$ | 0.316 | 0.999 77 |
| $10^5$ | 1.00 | 0.999 27 |
| $10^{5.5}$ | 3.16 | 0.997 7 |
| $10^6$ | 10.0 | 0.992 7 |
| $10^{6.5}$ | 31.6 | 0.977 |
| $10^7$ | 100 | 0.927 |

The relative humidity is calculated from the suction using the Kelvin equation with properties for water at 25 °C.

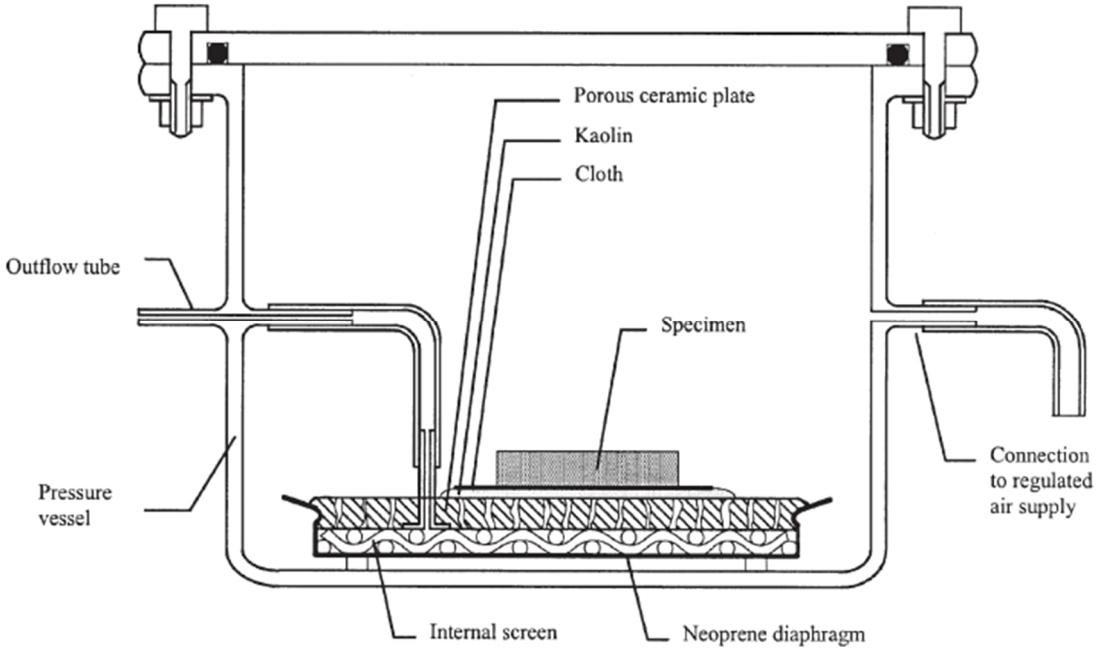
***Kuva 4.*** *Standardin NT BUILD 481 mukaiset huokosalipaineet ja niitä vastaavat ilmankosteudet.*

Aikaisempien tutkimusten yhteydessä on valikoitu testattavaksi painetasot 0,316–100 bar alueelta, laitteiston tarkkuuteen perustuen.

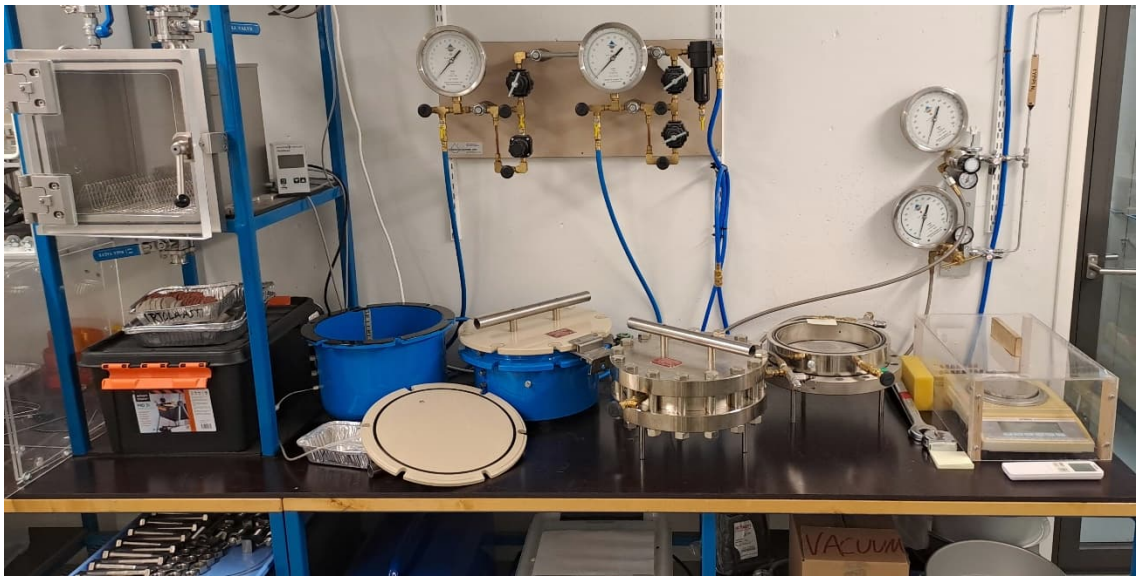
## 4.1 Painelevylaitteisto ja paineentuottojärjestelmä

Painelevylaitteistoon kuuluvat 5, 15 ja 100 baarin painekammiot, joista 5 ja 15 baarin kammioissa käytetään keraamisia painelevyjä. 100 baarin kammiossa levyt on korvattu selluloosakalvolla. Paineentuotossa käytetään 20 baarin ilmakompressoria, sekä isoimman painetason kammiossa typpikaasua.

Painekammion toimintaperiaate on esitetty Kuvassa 5. Kuvasta poiketen kokeet toteutettiin ilman suodatinkangasta (cloth) tai kaoliinisavea (kaolin). Kokeessa käytettävä keraaminen levy tai selluloosakalvo kyllästetään vedellä ennen kokeen aloitusta. Kokeen aikana kammiossa olevan kaasun ylipaine työntää kappaleessa olevaa kosteutta keraamiseen levyyn, ja sitä kautta ulos kammiosta. Koetta jatketaan, kunnes keraamisen levyn ja koekappaleiden huokospaineet vastaavat kammion painetasoa. Kokeen etenemistä seurataan mittaamalla kammiosta poistuvaa vettä.




***Kuva 5.*** *Laitteiston toimintaperiaate. (Janz 2001)*




***Kuva 6.*** *Painelevylaitteisto ja vakuumikammio.*

Kuvassa 6. esitetty painelevylaitteisto siirrettiin nykyiseen paikkaansa ennen kokeiden aloitusta. Kokeiden yhteydessä suoritettiin siis laitteiston uudelleenkäyttöönotto uudessa tilassa useamman vuoden tauon jälkeen. Kumitiivisteet ja -letkut tarkastettiin ja vaihdettiin tarpeen mukaan ennen kokeiden aloitusta.

## 4.2 Kokeiden aikana ilmenneet ongelmat

Keraamisilla levyillä suoritettavia matalamman painetason kokeita tehtiin yhtä aikaa kahdessa painekammiossa. Pitkien kokeiden aikana paineilmaventtiilistön vedenerottimeen alkoi kertyä kosteutta, joka myös siirtyi kammioihin erottimen yli. Säännöllinen veden poisto kompressorin vedenpoistohanan kautta ei vähentänyt ongelmaa. Kokeet jouduttiin keskeyttämään toisen koesarjan aikana.

Seuraavissa kokeissa osa mekaanisista paineensäätöventtiileistä alkoi vuotaa huomattavasti, mikä johti kompressorin käyntitahdin tihenemiseen ja lopulta kokeiden keskeytykseen. Vuodot johtuivat luultavasti kondenssiveden päätymisestä venttiileihin, sillä ongelma ei jatkunut kuukauden tauon jälkeen.

Paineilmaongelmien lisäksi kokeiden aikana ilmeni erinäisiä vuotoja kammioiden vedenpoistoliitoksissa sekä kannen tiivisteiden alueilla. Osa ennen käyttöönottoa hyväksi arvioiduista kumitiivisteistä mureni käytössä, ja toisen kammion maali alkoi kupruilla kansitiivisteen kohdalta.

Kokonaisuudessaan keskeytyneiden kokeiden määrä oli sellainen, ettei laasteille saatu kuin yksi onnistunut koe ilman uudelleen kyllästystä. Laastikokeita voidaan pitää epäonnistuneina. Parille laastisarjalle testattiin kuitenkin painetasot 0,316–10 bar kyllästäen koekappaleet uudelleen kokeiden välissä.

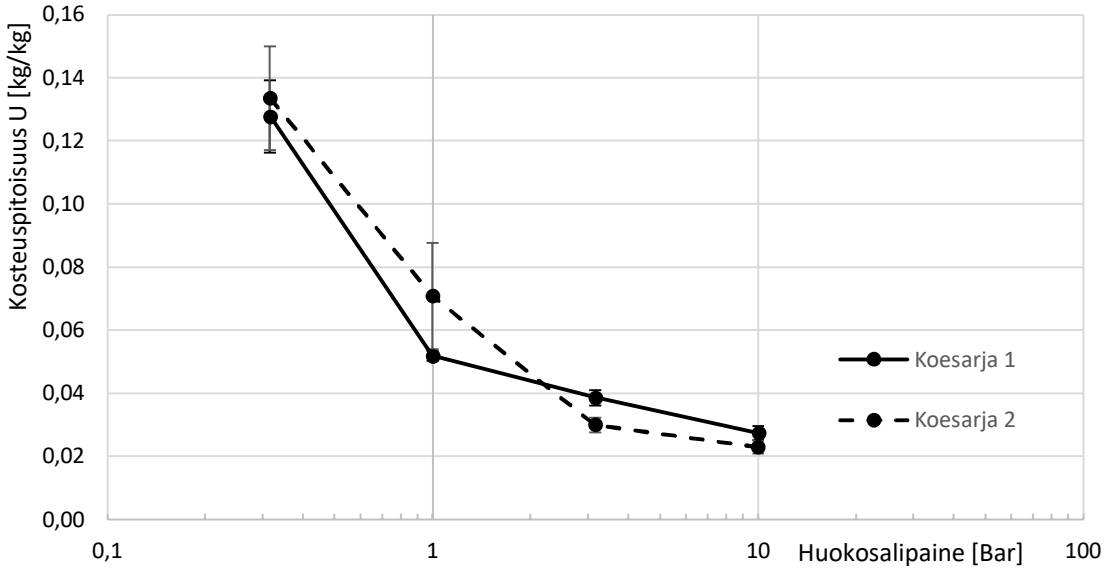
Laiteongelmien vuoksi koekappaleet altistuivat useille kuivaus—kyllästys sykleille. Näiden vaikutusta tuloksiin arvioitiin vertaamalla syklien välillä kappaleiden kuiva- ja märkäpainoja. Rasituksen mahdollista vaikutusta huokosverkostoon arvioitiin tekemällä 10 bar koe uudelleen koesarjan jälkeen.

# 5. TULOKSET

Kahdesta kymmenen kappaleen laastisarjasta saatiin onnistuneesti mitattua seitsemän ja yhdeksän kappaleen sarjat 0,316—10 baarin painetasoissa. Tiilten nopeamman tasapainottumisen ansiosta tiilierille ehdittiin tekemään kokeet 0,316—31,6 baarin painetasoissa. Tiilisarjoista saatiin mitattua kaikki kymmenen koekappaletta. Tulosten lisäksi graafeissa on esitetty 90 % luottamusväli tuloksille.

## 5.1 Saumalaasti

Laastisarjojen desorptiokäyrä paineen suhteen on esitetty Kuvassa 7. Lisäksi laastisarjoille laskettiin märkätiheydet kokeiden alussa sekä viimeisen painetason kyllästyksen yhteydessä.




***Kuva 7.*** *Laastisarjojen kosteuspitoisuus ylipaineen funktiona.*

Laastisarjojen kyllästyskosteuspitoisuus, kosteuspitoisuuden muutos sekä merkittävyys on esitetty Taulukossa 3. Kosteuspitoisuuden muutoksella tarkoitetaan eroa kyllästyskosteuspitoisuudessa kokeiden alussa, ja viimeisen kokeen yhteydessä. P-arvo laskettiin riippuvien otosten t-testillä, olettaen perusjoukko normaalijakautuneeksi. P-arvo kuvaa todennäköisyyttä, jolla sarjojen poikkeama johtuu vain otantavirheestä.

***Taulukko 3.*** *Laastisarjojen kyllästyskosteuspitoisuuden muutos kokeiden aikana.*

| Testi-sarja | Kyl-läs-tys-ajan-kohta | Kosteuspitoi-suus U [kg/kg] | Kosteuspitoisuu-den 90 % luotta-musväli [kg/kg] | Kosteus-pi-toisuuden muutos [%] | P-arvo |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1/2023 | 0,177 | 0,003 | 3,80 | 0,0003 |
| | 2/2024 | 0,184 | 0,004 | | |
| 2 | 4/2023 | 0,182 | 0,003 | 2,65 | 0,000004 |
| | 2/2024 | 0,187 | 0,002 | | |

Saumalaastin kyllästyskosteuspitoisuus muuttui ensimmäisen ja viimeisen kokeen välillä noin kolme prosenttia. Kosteuspitoisuuden muutos ei ollut varianssiin nähden erityisen suuri. P-arvojen perusteella molempien testisarjojen vesipitoisuuden muutos on kuitenkin tilastollisesti erittäin merkittävä (Tietoarkisto n.d.), eli materiaalissa on tapahtunut muutoksia. Oletettavasti laastin huokoisuus on kasvanut.

***Taulukko 4.*** *Laastisarjojen kuivapainon muutos kokeiden aikana.*

| Testisarja | Kokeen ajan-kohta | Kuivapainon muu-tos [%] | Muutoksen 90 % luottamusväli [kg/kg] |
|---|---|---|---|
| 1 | 6/2023 | -0,72 % | 0,14 % |
| | 2/2024 | | |
| 2 | 4/2023 | -0,11 % | 0,02 % |
| | 2/2024 | | |

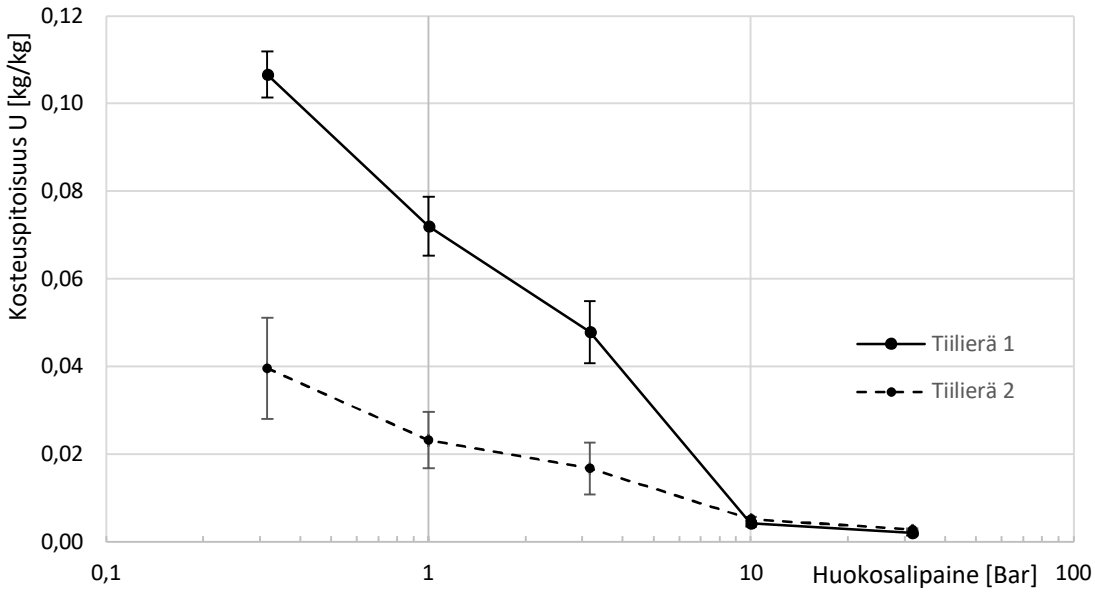
Taulukossa 4. esitetään laastisarjojen kuivapainon muutos. Kuivapaino mitattiin ensimmäisen ja viimeisen kyllästyksen yhteydessä. Kaksi suurinta syytä kuivapainon muutokseen ovat hydratoituneen kosteuden poistuminen materiaalista, sekä koekappaleista kokeiden sekä käsittelyn aikana murentuneet hiukkaset. Koekappaleista keraamiselle levylle tai vakuumikammioon irronneiden hiukkasten määrää ei voida mitata. Silmämääräisesti arvioituna laastin murenemista tapahtui enemmän kuin tiilikappaleilla, muttei kuitenkaan moninkertaisesti. Laastisarjojen 1 ja 2 kuivapainojen muutos oli 36 ja 5,5 kertainen tiileen verrattuna. Laastista on siis oletettavasti myös poistunut hydratoitunutta kosteutta, tosin ero sarjojen välillä on sitäkin merkittävämpi.

## 5.2 Tiilet

Tiilierien desorptiokäyrät on esitetty Kuva 8. Tiilierien kosteuspitoisuus ylipaineen funktiona. Kapillaarisen alueen korkeammissa kosteuspitoisuuksissa tiilierien välillä on mer-

kittävä ero kosteuskapasiteetissa. Hygroskooppista (<98 % RH) aluetta lähestyessä tiilierien kosteuspitoisuus laskee nopeasti, ja samalla erien välinen suhteellinen ja absoluuttinen ero pienenevät. Kapillaarisesta alueesta poiketen Tiilierän 1 kosteuspitoisuus oli alhaisempi 10 ja 31,6 bar painetasoissa. Näitä painetasoja vastaavat suhteelliset ilmankosteudet ovat 99,3 % ja 97,7 % RH.

Samoille materiaaleille määritettiin hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä suhteellisen ilmankosteuden arvoille 0—94 % RH erillisessä diplomityössä, jossa Tiilierälle 1 mitattiin korkeammat kosteuspitoisuudet.




***Kuva 8.*** *Tiilierien kosteuspitoisuus ylipaineen funktiona.*

Tiilille toteutettujen kokeiden ja kuivapainopunnitusten aikataulu on esitetty Taulukossa 5. 10 baarin painetason ensimmäisessä kokeessa osa kappaleista oli silminnähden kuivunut kammion tuloilmareiän läheisyydessä. Kolmannella mittauskerralla saatiin kuitenkin hyvin vastaavat tulokset kuin ensimmäiselläkin mittauksella.

***Taulukko 5.*** *Tiilikokeiden aikataulu.*

| Kokeen ajankohta | Suure | Tila |
|---|---|---|
| 1/2023 | Kuivapaino | Onnistunut |
| 1/2023 | 0,316 bar | Onnistunut |
| 1/2023 | 1 bar | Epäonnistunut |
| 2/2023 | 3,16 bar | Epäonnistunut |
| 4/2023 | 10bar | Epäselvä |
| 7/2023 | 1 bar uusinta | Onnistunut |
| 8/2023 | 3,16 bar uusinta | Onnistunut |
| 9/2023 | 10 bar uusinta | Epäonnistunut |
| 11/2023 | 31,6 bar | Onnistunut |
| 1/2024 | Kuivapaino | Onnistunut |
| 1/2024 | 10 bar uusinta | Onnistunut |

Ensimmäisen ja viimeisen 10 baarin kokeiden tulokset, kosteuspitoisuuden muutos sekä muutoksen P-arvo on esitetty Taulukossa 6. Tiilierien tasapainokosteuspitoisuuden muutos kokeiden aikana on erisuuruista ja suuntaista. Tulosten 90 % luottamusväli on erittäin suuri, eikä muutos ole P-arvon mukaan tilastollisesti merkittävä. Tulosten perusteella ei voida olettaa tiilten huokoisuuden muuttuneen kokeiden aikana.

***Taulukko 6.*** *Muutos tiilen kosteuspitoisuudessa 10 bar painetasossa.*

| Erä | Kokeen ajankohta | Kosteuspitoisuus U [kg/kg] | Kosteuspitoisuuden 90 % luottamusväli [kg/kg] | Kosteus-pitoisuuden muutos [%] | P-arvo |
|---|---|---|---|---|---|
| Tiilierä 1 | 4/2023 | 0,0052 | 0,0005 | -1,97 | 0,31 |
| | 1/2024 | 0,0051 | 0,0007 | | |
| Tiilierä 2 | 4/2023 | 0,0042 | 0,0007 | 6,14 | 0,10 |
| | 1/2024 | 0,0045 | 0,0006 | | |

Tiilten kuivapainon muutos kokeiden aikana on esitetty Taulukossa 7. Kappaleiden painonpudotus on hyvin vähäinen, ja johtuu luultavasti kokeiden aikana kappaleista irronneista pienistä murusista.

***Taulukko 7.*** *Muutos tiilten kuivapainossa.*

| Erä | Kokeen ajankohta | Kuivapainon muutos [%] | Muutoksen 90 % luottamusväli [kg/kg] |
|---|---|---|---|
| Tiilierä 1 | 1/2023 | -0,019 % | 0,010 % |
| | 1/2024 | | |
| Tiilierä 2 | 1/2023 | -0,021 % | 0,023 % |
| | 1/2024 | | |

# 6. LAITTEISTON YLLÄPITO

Laitteiston käyttöönotossa on huomioitava vakuumi- ja painelevylaitteistojen kunto. Vakuumipumpun öljynvaihtojen ja -lisäysten lisäksi tulee tarkastaa poistoilman suodatin (Oil mist eliminator), joka estää öljyhiukkasten siirtymisen laboratorioilmaan. Painelevylaitteiston käyttöönotossa on tarkastettava kumiletkujen, kumirenkaiden, maalipintojen sekä läpivientien kunto.

## 6.1 Laitteiden varastointi

Kokeiden jälkeen levyt varastoidaan ja säilötään kuivattuina ja puhdistettuina. Vesisäilytys tummentaa keramiikan ja mahdollistaa mikrobikasvun levyn sisällä. Keraamiset painelevyt puhdistetaan seoksella, jossa on de-ionisoitua vettä sekä 5 % natriumhypokloriittia (Soilmoisture 2020). Levyjä liotetaan vuorokausi nesteessä, jonka jälkeen ne puhdistetaan puhtaalla vedellä ja ilmakuivataan. Keramiikkalevyjä voi tarvittaessa putsata hiomalla käyttäen vesihiomapaperia.

Painelevylaitteiston oman kompressorin säiliö sekä paineensäätöventtiilistö kannattaa tyhjätä vedestä pidempien koetaukojen välillä. Lisäksi kaikki kammioiden kumiosat tulee rasvata kumiosille tarkoitetulla silikonirasvalla kokeiden lopuksi.

## 6.2 Muunnos paineilmaverkkoon

Laitteiston uudessa sijainnissa on saatavilla myös Rakennushallin yleinen paineilmaverkosto. Hallin 7 bar paineilma riittää kolmeen neljästä paineilmalla toteutettavasta kokeesta. Vain 10 bar kokeeseen tarvitaan laitteiston oma 20 bar kompressori.

Laitteiston kiinteä paineilmaliitäntä kompressorille korvattiin pikaliittimillä, ja hallin verkosta vedettiin uusi liitäntä painelevylaitteistolle. Hallin verkkoa käyttämällä vähennetään laboratorion kompressorin kosteuskuormaa erityisesti kesällä, sekä kompressorin aiheuttamaa meluhaittaa laboratoriotiloissa. Myös järjestelmän vikasietoisuus kasvaa vaihtoehtoisen painelähteen myötä.

# LÄHDELUETTELO


ASTM C1699-09. 2009. *Standard Test Method for Moisture Retention Curves of Porous Building Materials Using Pressure Plates.* American Society for Testing and Materials.

ASTM D1193-06. 2018. *Standard Specification for Reagent Water.* ASTM International. doi:https://doi.org/10.1520/D1193-06R18.

Fischer, H. Morrow, N.R. Mason, G. 2007. ”Water adsorption/desorption isotherms for characterization of microporosity in sandstone and carbonate rocks.” *Studies in Surface Science and Catalysis* (Elsevier) 160: 295-302. doi:https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80039-5.

Gallé, C. 2001. ”Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry.” *Cement and Concrete Research* 1467–1477. doi:https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00594-4.

Ghorab, H.Y. Kishar, E.A. Abou Elfetouh, S.H. 1985. ”Studies on the stability of the calcium sulfoaluminate hydrates.” *Cement and Concrete Research* Volume 15, Issue 1: 93-99. doi:https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90013-4.

Hagentoft, C.-E. 2001. *Introduction to Building Physics.* Malmö: Studentlitteratur AB.

Hens, H.S.L. 2017. *Building Physics - Heat, Air and Moisture 3e Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises.* Wilhelm Ernst & Sohn eBooks. doi:https://doi.org/10.1002/9783433608548.

Janz, M. Johannesson, B. 2001. ”Measurement of the Moisture Storage Capacity Using Sorption Balance and Pressure Extractors.” *Journal of Building Physics* 24: 316-334. doi:http://dx.doi.org/10.1106/VRU2-LNV1-ME9X-8KKX.

NT BUILD 481. 1997. *Building materials: Retention curve and pore size distribution.* Espoo: Nordtest.

Pinterić, M. 2017. *Building Physics.* Springer International Publishing.

Shahreza, S.K. Niklewski, J. Molnár, M. 2022. ”Novel water penetration criterion for clay brick masonry claddings.” *Construction and Building Materials* Volume 353 (129109). doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129109.

Shimada, Y. Young, J.F. 2004. ”Thermal stability of ettringite in alkaline solutions at 80 °C.” *Cement and Concrete Research* Volume 34, Issue 12: 2261-2268. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.008.

Slapø, F. Kvande, T. Bakken, N. Haugen, M. Lohne, J. 2017. ”Masonry’s Resistance to Driving Rain: Mortar Water Content and Impregnation.” *Buildings* 7(3):70. doi:https://doi.org/10.3390/buildings7030070 .

Soilmoisture. 2020. *Soilmoisture's Blog - How to clean your Pressure Plate Cells or other ceramics.* Haettu 1.2.2024. https://soilmoisture.wordpress.com/2020/08/23/how-to-clean-your-pressure-plate-cells-or-other-ceramics/.

Strydom, C.A. Hudson-Lamb, D.L. Potgieter, J.H. Dagg, E. 1995. ”The thermal dehydration of synthetic gypsum.” *Thermochimica Acta* 631–638. doi:https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02521-9.

Tietoarkisto. n.d. *Hypoteesien testaus.* https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/hypoteesi/testaus/.

Tuominen, O. 2020. *Sisäkuori- ja ontelolaattabetonien rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet.* Tampereen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Vainio, M. 2016. *Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet.* Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Vänttinen, K. 2017. *Sisäkuoribetonin rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet.* Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Wang, Y. Shardt, N. Chang, L. Huazhou, L. Janet, A.W. Elliott, Zhehui, J. 2020. ”Validity of the Kelvin equation and the equation-of-state-with-capillary-pressure model for the phase behavior of a pure component under nanoconfinement.” *Chemical Engineering Science* 226 (0009-2509). doi:https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115839.

Zhou, Q. Glasser, F.P. 2001. ”Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120°C.” *Cement and Concrete Research* Volume 31, Issue 9: 1333-1339. doi:https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00558-0.