

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Joona Miinin & Tommi Nuutinen

HAMPPU-KALKKIKOMPOSITIN VALMISTUS SUOMALAISISTA RAAKA-
AINEISTA JA SEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA SEINÄRAKENTEENA

Opinnäytetyö
Toukokuu 2014



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2014
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80100 JOENSUU
(013) 260 6800

Tekijät
Joonas Miinin & Tommi Nuutinen

Nimeke
Hamppu-kalkkikomposiitin valmistus Suomalaisista raaka-aineista ja sen kosteustekninen toiminta seinärakenteena

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia hamppu-kalkkikomposiitin valmistusta Suomesta saatavista raaka-aineista ja tutkia sen kosteusteknistä toimintaa. Opinnäytetyössä käydään läpi hamppu-kalkkikomposiitin raaka-aineita, rakennustapoja, eri seosvaihtoehtoja ja tutkitaan materiaalin fysikaalisia ominaisuuksia. Fysikaalisten ominaisuuksien pohjalta on tehty mallinnus WUFI Pro 5.1 -ohjelmistolla, josta saatujen tietojen perusteella on tutkittu hamppu-kalkkikomposiitin kosteusteknistä käyttäytymistä ja homehtuvuutta Suomen ilmastossa.

Tutkimuksen taustatieto perustuu pääosin kirjallisuuteen ja aiempiin tutkimuksiin hamppu-kalkkikomposiitista. Materiaalin fysikaalisista ominaisuuksista on tutkittu kokeiden avulla lämmönjohtavuutta, vesihöyrynläpäisevyyttä ja palonkestoa. Materiaalin homehtumisherkyyttä on tutkittu homeviljelyn avulla. WUFI-mallinnuksessa on keskitytty materiaalin kosteustekniseen käyttäytymiseen, jonka pohjalta on tehty laskennallista tarkastelua rakenteen homehtumisen mahdollisuuksista.

Tutkimusten perusteella käy ilmi, että hamppu-kalkkikomposiittia olisi mahdollista tuottaa Suomesta saatavilla raaka-aineilla. Erilaisten seosten valmistamisen huomattiin olevan helppoa, eikä materiaalin käsittely vaadi erikoistaitoja. Kosteusteknisesti hamppu-kalkkikomposiitin huomattiin toimivan hyvin Suomen ilmastossa, eikä tutkitussa rakenteessa todettu laskennallisesti olevan homehtumisen mahdollisuutta.

Kieli
suomi

Sivuja 76
Liitteet 8
Liitesivumäärä 24

Asiasanat
Hamppu, kalkki, kosteus, home, hamppu-kalkkikomposiitti, hamppubetoni



THESIS
May 2014
Degree Programme in Civil Engineering

Karjalankatu 3
FI 80100 JOENSUU
FINLAND
(013) 260 6800

Authors

Joona Miinin & Tommi Nuutinen

Title

Manufacturing Hemp-lime Composite from Finnish Raw Materials and Its Moisture Behavior in Wall Structures

Abstract

The purpose of this thesis was to examine manufacturing of hemp-lime composite made of Finnish raw materials and research the moisture behavior of the material. The thesis handles raw materials, building methods and versatile mixtures of hemp-lime composite and moreover, examines the physical features of the material. Modeling with WUFI Pro 5.1 –software was carried out on the basis of the physical features and moisture behavior and mildewing of hemp-lime composite in Finnish climate was researched by utilising information obtained from the modeling.

The background of this study is based mostly on literature and previous studies of hemp-lime composite. The tested physical features of the material are thermal conductivity, moisture permeability and fire resistance. Mildewing of the material was examined by mold culture. WUFI –modeling focused on moisture behavior of the material and mathematical analysis of mildewing was based on the modeling.

The research indicates that hemp-lime composite could be produced with raw materials available in Finland. Manufacturing of different mixtures was discovered to be easy and the material processing does not require special skills. Moisture behavior of hemp-lime composite was discovered to be well functional in Finnish climate and mildewing of the researched structure was found to be mathematically impossible.

Language

Finnish

Pages 76

Appendices 8

Pages of Appendices 24

Keywords

Hemp, lime, moisture, mold, hempcrete, hemp-lime composite

Sisältö

| | |
|--|----|
| 1 Johdanto | 7 |
| 2 Hamppu ja kalkki..... | 9 |
| 2.1 Hamppu | 9 |
| 2.1.1 Hampun viljely Suomessa | 11 |
| 2.1.2 Hampun varren koostumus | 13 |
| 2.1.3 Hampun kuitu | 13 |
| 2.1.4 Päistäre | 14 |
| 2.2 Kalkki | 15 |
| 2.2.1 Hydraulinen kalkki | 17 |
| 2.2.2 Hydraulisesti toimivat aineet..... | 17 |
| 3 Hamppu-kalkkikomposiitti rakentamisessa | 19 |
| 3.1 Hamppu-kalkkikomposiitin kaltaiset rakennusmateriaalit..... | 19 |
| 3.1.1 Opus caementicium..... | 19 |
| 3.1.2 Savirakentaminen..... | 19 |
| 3.1.3 Olkipaalirakentaminen | 20 |
| 3.2 Hamppu-kalkkikomposiitin alkuajat..... | 21 |
| 3.3 Hamppurakentaminen maailmalla | 21 |
| 3.4 Hamppu-kalkkikomposiitti osana ekologista ja terveellistä rakentamista | 22 |
| 3.5 Tekniset ominaisuudet..... | 24 |
| 3.6 Rakennustavat..... | 24 |
| 3.6.1 Liukuvalu | 25 |
| 3.6.2 Ruiskuvalu | 26 |
| 3.6.3 Muuraus harkkoina..... | 26 |
| 3.6.4 Elementtirakentaminen..... | 27 |
| 3.7 Käyttökohteet..... | 28 |
| 4 Seokset..... | 28 |
| 4.1 Suhteitus..... | 30 |
| 4.2 Havainnot sidos- ja lisäaineista..... | 31 |
| 4.3 Kuivuminen | 33 |
| 4.4 Johtopäätökset | 34 |
| 5 Fysikaaliset ominaisuudet..... | 35 |
| 5.1 Palonkestävyys..... | 35 |
| 5.1.1 Palokoe | 36 |
| 5.1.2 Palokokeen tulokset | 37 |
| 5.1.3 Tulosten tarkastelu | 38 |

| | |
|--|----|
| 5.2 Vesihöyrynläpäisevyys | 38 |
| 5.2.1 Vesihöyrynläpäisevyyskokeet..... | 38 |
| 5.2.2 Koejärjestelyt..... | 40 |
| 5.2.6 Laskennallinen tarkastelu | 42 |
| 5.3 Lämmönjohtavuus | 46 |
| 5.3.1 Lämmönjohtavuuskokeet..... | 46 |
| 5.3.2 Lämmönjohtavuuskokeiden tarkastelu | 46 |
| 6 WUFI-mallinnus | 48 |
| 6.1 Materiaalien lähtöarvot | 48 |
| 6.2 Hygrotermiset funktiot..... | 51 |
| 6.3 Ilmasto-olosuhteet | 53 |
| 6.4 Tarkastelupisteet | 53 |
| 6.5 WUFI-mallinnuksen tulokset | 55 |
| 6.5.1 Kosteussisältö | 55 |
| 6.5.2 Kosteuden ja lämmön jakautuminen sekä siirtyminen rakenteessa .. | 55 |
| 6.5.3 Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelu rakenteen eri syvyyksissä | 56 |
| 7 Homehtuvuus..... | 57 |
| 7.1 Homeviljely | 60 |
| 7.1.2 Koekappaleet | 61 |
| 7.1.3 Homeviljelyn tulokset..... | 62 |
| 7.6 Homehtumisen mahdollisuus seinärakenteessa..... | 64 |
| 7.6.1 Homeen kasvun alkamisen laskennallinen tarkastelu | 65 |
| 7.6.2 Laskennan tulokset..... | 66 |
| 8 Johtopäätökset..... | 67 |
| 8.1 Valmistus Suomalaisista raaka-aineista | 67 |
| 8.2 Kosteustekninen käyttäytyminen | 68 |
| 8.3 Homehtuminen | 69 |
| 9 Pohdinta..... | 70 |
| Lähteet..... | 73 |

Liitteet

- Liite 1 Hamppu-kalkkiseoksen lämmönjohtavuuden mittaus
- Liite 2 Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kuvaajat eri lähtöarvoilla
- Liite 3 Kokonaiskosteusmäärä ajan suhteen
- Liite 4 Kosteuden ja lämmön siirtyminen kylmimpänä ja kuumimpana aikana
- Liite 5 Hamppu-kalkkikomposiitin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden käyrät eri mittauspisteissä
- Liite 6 Lämpötila ja suhteellinen kosteus koko tarkasteluaikana eri tarkastelupisteissä
- Liite 7 Kriittisen suhteellisen kosteuden käyrät ja sen ylittävät ajat
- Liite 8 E-mail Hemprefine Oy

1 Johdanto

Kosteus- ja homeongelmat rakennuksissa ovat Suomessa mittavia. Eduskunnan rakennusten kosteus- ja homeongelmat -raportin mukaan kosteus- ja homevaurioille altistuu asuintaloissa noin 320 000–600 000 ihmistä ja päiväkohteissa, kouluissa, hoitolaitoksissa ja toimistoissa noin 240 000–360 000 ihmistä. Kosteus- ja homeongelmien laajuudeksi on raportin mukaan arvioitu vuosittain 500 miljoonaa euroa. (Reijula ym. 2012) Koko ajan kiristyvät lämmöneristysvaatimukset ovat eristepaksuuden lisääntyessä omiaan heikentämään rakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Lämmöneristyksen parantaminen viilentää rakennuksen ulkovaipan ulko-osia kasvattaen homekasvun ja kondensoitumisen riskiä. (Matalaenergiarakenteiden toimivuus 2008)

Kuivumisen kannalta ongelmallisia ovat nykyisessä rakentamisessa yhteen suuntaan kuivuvat rakenteet. Nykyiset hometalot on rakennettu oman aikansa hyvän rakentamistavan mukaan. Rakentamistavoissa ei tähän päivään mennessä kuitenkaan ole tapahtunut isoja muutoksia ja tänä päivänäkin hyvän rakentamistavan mukaan rakennetut talot voivat olla osa tulevaisuuden homeongelmaa. Nykyisessä lainsäädännössä ja rakennusten suunnittelussa keskitytään liikaa materiaalien lämmönjohtavuusominaisuuksiin ja pienemmälle painoarvolle jäävät usein muut fysikaaliset ominaisuudet.

Nykyinen rakennusten elinkaariajattelu on mielestämme riittämätön. Tämän päivän rakennusmateriaalien suunniteltu käyttöikä on usein vain 15–50 vuotta, jonka jälkeen ne usein vaativat suurempaa korjausta tai jopa purkua (RT 18-10922 2008). Vertailukohtana on hyvä pitää yli sata vuotta vanhoja hirsirakennuksia, jotka ovat säilyneet sukupolvelta toiselle ilman suurempia korjaustarpeita. Nykyinen maapallon uusiutumattomien luonnonvarojen käyttö ja ympäristön lisääntyvä kuormitus huomioon ottaen on mielestämme järjetöntä rakentaa rakennuksia, joiden elinkaari on huomattavan lyhyt verrattuna luonnonmukaisista ja hygroskooppisista materiaaleista rakennettuun taloon. Nykyrakentamisen ongelmat tiedostaen olemme opiskeluaikamme perehtyneet erilaisiin rakennusmateriaaleihin ja pyrkineet etsimään toimivampia, kestävän kehityksen mu-

kaisia materiaaleja ja tapoja, jotka voisivat tulevaisuudessa korvata nykyisiä rakennusmateriaaleja. Eri materiaaleja etsiessämme vastaamme tuli Euroopassa laajalti käytetty ja toimivaksi rakenteeksi todettu hempcrete eli hampukkalkkikomposiitti. Tämä tunnetaan myös nimellä hamppubetoni. Tässä materiaalissa yhdistyvät erittäin nopeakasvuisen ja ekologisen hampun hyvät ominaisuudet yhdessä kalkin kanssa, josta löytyy rakennusperinteestämme hyviä kokemuksia esimerkiksi kosteiden maakellareiden maalina sekä historiallisten kivirakennusten laastina ja rappauksena. Hampu-kalkkikomposiitti toimii tiiviinä ja eristävänä massiivirakenteena yhdessä kantavan rungon kanssa, korvaten nykyisiä monikerrosrakenteita. Vaikka muualla maailmassa on jo suurtakin teollisuutta hampukkalkkikomposiitin parissa, Suomessa kyseiseen materiaaliin ei tietojemme mukaan ole vielä juurikaan perehdytty.

Lähtökohtana opinnäytetyössä oli selvittää, minkälaisia seosvaihtoehtoja Suomesta saatavista raaka-aineista olisi mahdollista valmistaa ja kuinka materiaali toimisi Suomen ilmastossa. Seosaineiden tuli olla terveydelle vaarattomia, helposti tuotettavia, edullisia ja mielellään ekologisia. Pääkysymykseksi nousi hampukkalkkikomposiitin kosteustekninen toiminta ja homeen kasvun mahdollisuus seinärakenteessa.

Opinnäytetyö on osittain Karelia-ammattikorkeakoulun Draft-ohjelman rahoittama. Toivomme opinnäytetyömme olevan hyödyksi ekologisista ja terveellisistä rakennusmateriaaleista kiinnostuneille ja tulevaisuuden hampukkalkkirakentajille.

2 Hamppu ja kalkki

Hamppu-kalkkikomposiitti on biokomposiitti, joka koostuu runkoaineesta (hamppun päistäre), sidosaineesta (kalkki), lisäaineista (esim. pozzolaanit) ja vedestä. Aineksista sekoitetaan massa, jonka annetaan kuivua ja kovettua ilman vaikutuksesta. Valmis hamppu-kalkkikomposiitti on kova ja huokoinen massiivirakenne. Hamppu-kalkkikomposiittia voidaan käyttää mm. yksikerroksisena seinämateriaalina kantavan rungon kanssa, lämmöneristeenä ylä- ja alapohjissa tai lisälämmöneristeenä vanhan rakenteen pinnassa. Hamppu-kalkkikomposiitin koostumus määräytyy käyttökohteen mukaan. Seuraavassa on kerrottu hamppu-kalkki-komposiitin yleisimmistä raaka-aineista, niiden historiasta, tuotannosta ja soveltuvuudesta.

2.1 Hamppu

Hamppu (*Cannabis sativa* L.) on yksi maapallon vanhimmista ja ihmiskunnan historiassa merkittävimmistä viljelyskasveista, josta on tuhansia vuosia valmistettu mm. kankaita, purjeita, paperia, eristeitä, öljyä, lääkkeitä, ruokaa ja rehua (Ihalainen 1993).

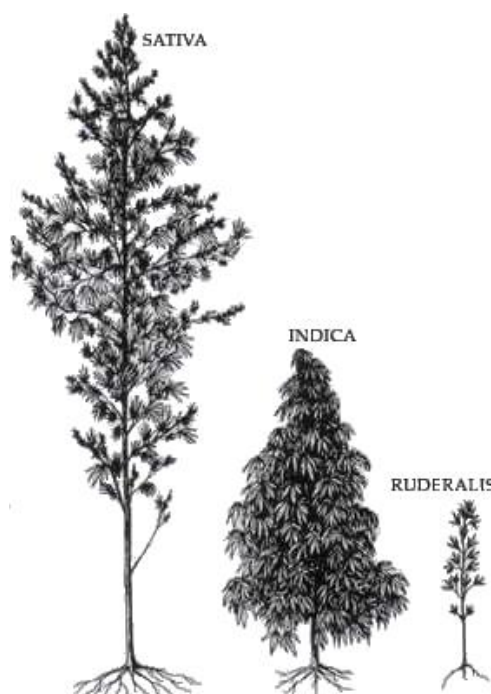
Viljelyskasvina hamppu on yksivuotinen, erittäin nopeakasvuinen eikä se vaadi voimakasta lannoittamista. Sen viljely ei vaadi kasvinsuojeluaineita, koska nopean kasvurytminsä ansiota se varjostaa rikkaruohot hengiltä. Tämän takia hamppu soveltuu hyvin luomuviljelyyn. Hampusta saatavat sadot Pohjois-Euroopassa ovat yhtä suuret ja usein jopa paremmat verrattuna muihin samalla alueella viljeltäviin energiakasveihin (Prade, Svensson, Andersson & Mattsson 2011).

Voimakkaiden juuriensa ansioista hamppu kykenee parantamaan maaperän laatua kuohkeuttaen maata aiheuttaen kastematojen määrän lisääntymistä. Maanparannuskasvina se lisää maaperän kykyä pidättää ravinteita ja vettä, se-

kä kykenee pudistamaan maaperää raskasmetalleista. Tämän ansioista hamp-
pu soveltuu hyvin myös vesistöjen reuna-alueille ja maanteiden varsille. Ham-
pun maaperää parantava vaikutus tekeekin siitä erinomaisen esi- ja vuorovilje-
lykasvin. (Norokytö 2010)

Hamppu luokitellaan yleensä kolmeen lajiin:

- *Cannabis sativa* – Soveltuu erityisesti kuidun ja sellun tuotantoon
- *Cannabis indica* – lääke- ja päihdekäyttö
- *Cannabis ruderalis* – villihamppu, joka kasvaa yleisesti Venäjällä



Kuva 1. *Cannabis sativa*, *Cannabis indica* ja *Cannabis ruderalis*. (Wikipedia 2014).

Hamppu voidaan luokitella myös sen käyttötarkoituksen mukaan kolmeen eri tyyppiin (Norokytö 2010):

- kuituhamppu
- öljyhamppu
- Lääkehamppu

2.1.1 Hampun viljely Suomessa

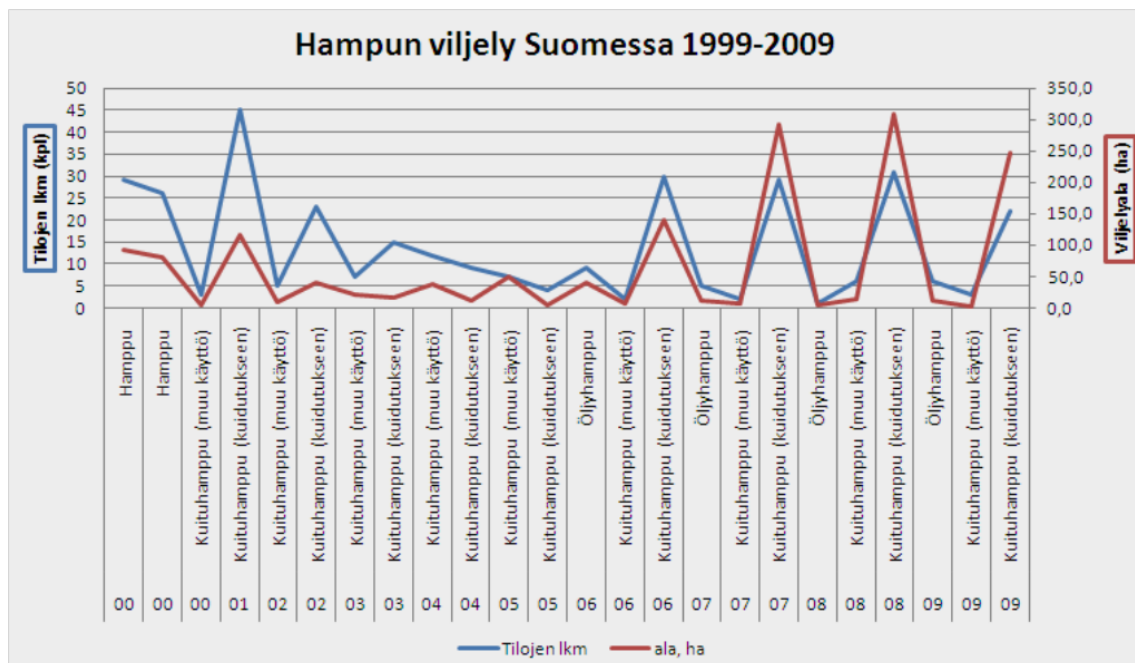
Ensimmäiset todisteet hampun käytöstä Suomessa löytyvät rautakauden ajalta. Kaukosen (1946) mukaan hamppu on ollut pellavaakin tärkeämpi kasvi maanviljelyssä itäisessä Suomessa, jossa sitä kutsuttiin liinaksi. Luokkakallion (2011) mukaan Suomessa hamppua on viljelty 1500-luvulta lähtien. Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuneet maatiaishamppulajikkeet ovat kuitenkin historian saatossa hävinneet. Hampun viljelyn ja käytön laajuudesta ja merkittävydestä Suomessa ovat todisteena hamppu-kantaiset paikannimet, joita löytyy lähes koko Suomen alueelta. (Norokytö 2010)

Hamppu sopii erittäin hyvin Suomen viljelyolosuhteisiin maalajien ja ilmaston puolesta (Luokkakallio 2011). Suomessa viljellään nykyisinkin hamppua ja sille myönnetään myös EU:n maataloustukia hehtaaritukena ja jalostustukena varsille (maa- ja metsätalousministeriö 2011). Hampun viljelyssä edellytetään sertifioidun siemenen käyttöä, eikä oman siemenen käyttö ole mahdollista (Norokytö 2010). Kuituhampun tuottaminen on Suomessa laadullisesti ja kustannuksellisesti kilpailukykyistä. Viljelykustannukset kuituhampulle ovat noin 500 €/ha ja kuituhampulle maksettava viljelytuki on 608–668 €/ha riippuen viljelyalueesta. Sopimustuotantohinta on hamppukorrella ollut 100 - 150 euroa/tn. (Luokkakallio 2012) Hamppukuitujen kauppa on vapaata eikä tuonnista peritä tulleja (Maa- ja metsätalousministeriö 2011).

Hamppu menestyy Suomen ilmasto-oloissa hyvin ja antaa lähes samanlaisia keskisatoja kuin esimerkiksi Keski-Euroopassa. Kuituhamppu voisi olla hyvä tuotantovaihtoehto erityisesti tiloille, jotka sijaitsevat lähellä jalostavaa teollisuutta. (Maa- ja metsätalousministeriö 2010) Kuituhampusta saatava sato on vaihdellut Suomessa 5–15 tonnia/ha välillä, kun taas Ruotsissa saadut sadot ovat olleet 10–20 tonnia/ha luokkaa.

Viime vuosina hamppua on viljelty Suomessa 100 – 300 hehtaaria. (Luokkakallio 2012). Kuviosta 1 on nähtävissä, että hampun viljelyala Suomessa on vaihdellut paljon vuosien 1999 ja 2009 välisenä aikana. Suureen vaihteluun on vaikuttanut muun muassa jatkojalostukseen liittyvät ongelmat ja tukijärjestelmissä tapahtuneet muutokset. Kuitukasvien tuottamiseen on kiinnostusta, mutta on-

gelmia on ollut esimerkiksi jatkojalostuksessa. (Maa- ja metsätalousministeriö 2010)



Kuvio 1. Hampun viljelyalat ja tilat Suomessa vuosien 1999–2009 välillä. (Maa- ja metsätalousministeriön tilastopalvelukeskus 2010).

Kuituhampun viljelyn yleistymisen tulevaisuus vaikuttaa kuitenkin lupaavalta. Kuidun erottelua tarjoavat Suomessa muun muassa Kauhavalla toimiva Hallinta Oy ja Turusta lähtöisin oleva HempRefine Oy. HempRefine Oy ilmoittaa Internet-sivuillaan heillä olleen vuonna 2013 kuituhampuviljelmiä 15 paikkakunnalla Suomessa ja Virossa. Viljelypinta-alan tavoitteeksi vuoteen 2016 mennessä HempRefine Oy ilmoittaa olevan 1000 hehtaaria. (Hemprefine Oy 2014)

2.1.2 Hampun varren koostumus

Hampun varsi sisältää kaksi morfologisesti erilaista aluetta, joista ulompi osa sisältää pitkiä niinikuituja ja sisempi puumainen osa lyhyitä kuituja. Hampun varren puumaista osaa kutsutaan päistäreeksi. Niinikuituja on perinteisesti käytetty tekstiilien ja köysien raaka-aineena. Nykyisin hampun niinikuituja käytetään myös komposiittiteollisuudessa lasikuidun tapaan lujittavana kuituna. Hampun kuori- ja ydinkerrokset eroavat fysikaalisesti ja kemiallisesti toisistaan. (Ihalainen 1993)



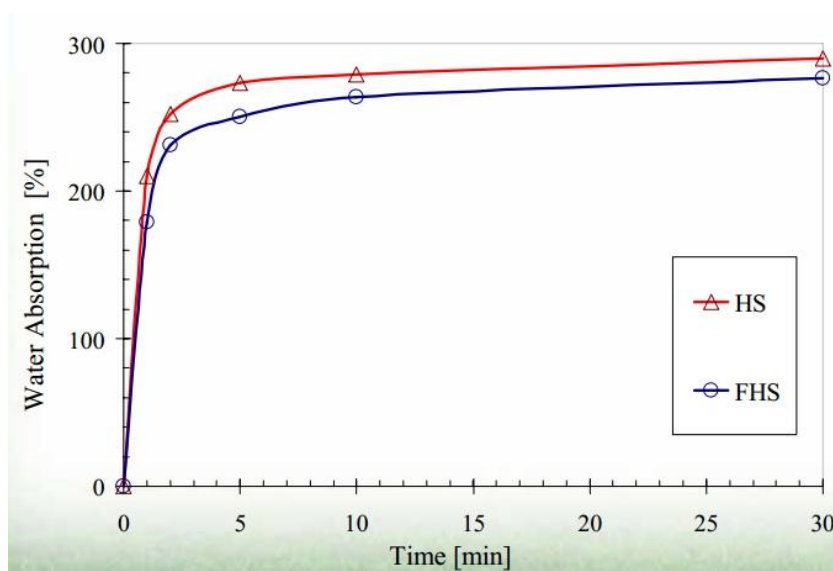
Kuva 2. Hampun varsi (Wikipedia 2014)

2.1.3 Hampun kuitu

Hampukuitu on erittäin luja luonnonkuitu ja sen vetolujuus vaihtelee 300 - 800 MPa välillä (Lehtiniemi & Järvelä 2012). Hampun kuitukimpun pituus vaihtelee 35 - 180 cm välillä ja väri on riippuvainen kuivausmenetelmästä. Kuitukimpun paksuus vaihtelee 0,5-5 mm ja se muodostuu peruskuiduista. Peruskuidut muodostuvat soluista, jotka ovat noin 20 mm pitkiä ja noin 22 μm paksuja. (Ihalainen 1993) Hampukuitua voidaan pellavakuidun tavoin käyttää rakentamisessa muun muassa eristeenä.

2.1.4 Päistäre

Päistäre on hampun varren sisin puumainen ja huokoinen osa. Hampun varren massasta 40–60 % on päistärettä (Evrard 2003). Päistärettä on yleensä pidetty hampun tuotannon sivutuotteena ja sitä on käytetty mm. hevostallien kuivikkeena. Nykyisin hampun päistärettä käytetään myös rakentamisessa hampukkalkkikomposiitin runkoaineena, mutta yhteisiä standardeja ei rakentamisessa käytetyille päistäreille ole vielä olemassa. Päistäreen raekoko vaihtelee riippuen kuidutusmenetelmästä (Allin 2012, 28) ja hampukasvin koosta. Hampun päistäre koostuu pääasiassa selluloosasta (48 %), hemiselluloosasta (21 – 25 %) ja ligniinistä (17- 19 %) (Thomsen, Rasmussen, Bohn, Kristina, Vad Nielsen, Thygesen, 2005). Hampun päistäre on hyvin huokoista materiaalia ja kuten kuviossa 2 on nähtävissä, pystyy se (HS) sitomaan vettä jopa 2,8 kertaa oman massansa verran (Picandet, Tronet, Lecompte & Baley 2011). Hampun päistärettä voidaan pitää varsin edullisena raaka-aineena sillä sen ostohinta HempRefine Oy:n mukaan on noin 400 €/tn (Neuvo 2014).



Kuvio 2. Hampun päistäreen vedenimu ajan suhteen, missä HS on alle 2 % hampukkuitua sisältävä näyte. (Picandet, Tronet, Lecompte & Baley 2011)

2.2 Kalkki

Kalkkikivi (CaCO_3) on kerrostunut kivilaji, joka syntyy kalsiumkarbonaatin saostuessa vedessä. Kivilajia, joka sisältää pääasiassa kalkkisälpää eli kalsiittia, nimitetään kalkkikiveksi, marmoriksi tai liiduksi. Kalkkikiveä, joka sisältää magnesiumoksidia enemmän kuin 5 %, nimitetään dolomiittikalkiksi. Kalsiittinen kalkkikivi on yleisempää kuin dolomiittikalkki. (Konow 2006, 12) Vaikka kalkkikivi on yksi planeettamme yleisimmistä kivilajeista, esiintyy sitä Suomessa niukasti. Suomessa olevat kalkkikiviesiintymät ovat pääosin vanhaa ja kiteistä kalkkikiveä. Oulu-Kuopio-Savonlinna-linjan koillispuolella esiintyvät kivilajit ovat yleensä dolomiittikarbonaattiä ja lounaispuolella esiintyvät kalsiittikarbonaattiä. (Konow 2006, 11)

Kalkkia on käytetty laastin sideaineena Suomessa jo keskiajalta lähtien (Museovirasto 2014). Sideainekalkkia saadaan polttamalla ja sammuttamalla kalkkikiveä. Kalkkia poltettiin ennen yleensä mäenjyrkänteeseen kaivetuissa kuoppauuneissa tai perinteisissä miiluissa, joita käytettiin hiilenpoltoon. Kalkkia ruvettiin polttamaan kuitenkin 1700–1800-luvulla tiilenpolttouuneissa. Viime vuosikymmenien aikana kiinnostus vanhoihin kalkinpolttotapoihin on herännyt uudestaan monissa maissa. (Konow 2006, 12)

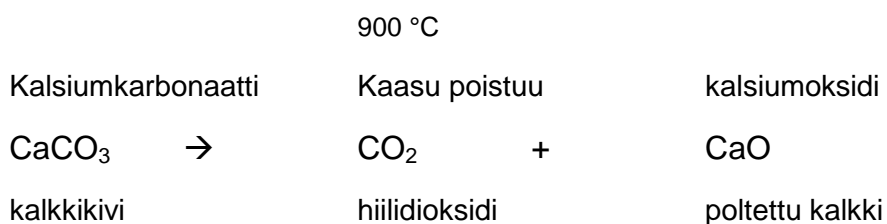
Kalkkikiven palaessa kivimineraali hajoaa poltetuksi kalkiksi ja hiilidioksidiksi ja reaktiota kutsutaan kalsinoitumiseksi. Puhdas kalsiittikivi hajoaa 890 celsiusasteessa. Lämpötilan on oltava vähintään 900 astetta ja palamisajan pari kolme päivää, jotta kalkkikivi palaisi kokonaan. (Konow 2006, 12) Teollisessa kalkin valmistuksessa poltto tapahtuu joko kierto- tai kuilu-uunissa. Teollisissa uuneissa kalsinoituminen vaatii noin 1100 asteen lämpötilan ja aikaa noin 6 tuntia tai 24–36 tuntia riippuen polttouunista. Poltettua kalkkia käytetään Suomessa mm. paperin valmistuksessa, metallurgian teollisuudessa sekä maataloudessa. Vain murto-osa poltetusta kalkista käytetään rakennusteollisuudessa. (Nordkalk 2014)

Poltettu kalkkikivi on hyvin ”janoinen” kivi, joka sitoo ilmankosteutta kaikkiin huokosiinsa. Sammutus on vahvasti eksoterminen reaktio, jossa massan lämpötila voi nousta useita satoja asteita, riippuen veden ja kalkin määrästä. (Ko-

now 2006, 13) Sammutuksessa kalsiumoksidi reagoi veden kanssa ja muuttuu kalsiumhydroksidiksi ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), eli sammutetuksi kalkiksi. (Nordkalk 2014) Kalkin sammuttamiseen on historian saatossa keksitty useita keinoja, mutta selvästi määriteltä sammutusmenetelmää ei rakennuskalkille ole olemassa. Teollisuudessa rakennuskalkki sammutetaan käyttämällä vain hiukan suurempi määrä vettä, kuin Kalsiumoksidin muuttamiseen Kalsiumhydroksidiksi teoreettisesti tarvitaan. Näin poltetu kalkki sammuu kuivaksi jauheeksi. (Konow 2006, 13-14)

Kalkin karbonatisoituminen eli kovettuminen tapahtuu hyvin hitaasti. Karbonatisoitumisessa ilman hiilidioksidi reagoi kalsiumhydroksidin kanssa. Reaktio vaatii myös vettä, joten ilman suhteellisen kosteuden tulisi olla yli 60 %. Kalkkia, joka pystyy kovettumaan ilman hiilidioksidin vaikutuksesta, kutsutaan ilmakalkiksi. Kokonaan karbonatisoituneen kalkin mineraloginen koostumus on sama kuin kalsiumkarbonaatin (Konow 2006, 14-15).

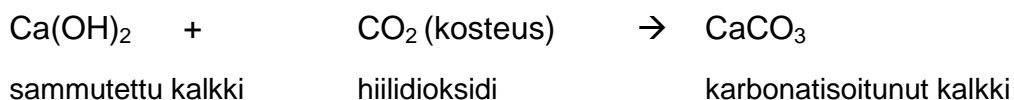
Kalkin Poltto



Kalkin sammuttaminen



Kalkin Karbonatisoituminen



Kuvio 2. Kalkin poltto, sammuttaminen ja karbonatisoituminen (Konow 2006, 14).

2.2.1 Hydraulinen kalkki

Kalkkikiveä, joka sisältää savimineraaleja, kutsutaan hydrauliseksi kalkkikiveksi, koska poltettuna ja sammutettuna se kovettuu, eli hydratoituu veden kanssa. Vaikka Suomessa ei hydraulista kalkkia juuri esiinny, on monista historiallisten rakennusten kalkkilaastinäytteistä löydetty ilmakalkin lisäksi hydraulisia komponentteja tai kalkin kanssa hydraulisesti reagoivia aineksia. (Konow 2006, 15)

Kun poltetaan epäpuhdasta kalkkikiveä, lämpötila on vähän korkeampi kuin puhtaan kalkkikiven poltossa, mutta alhaisempi kuin sementin poltossa. Hydraulisen kalkin polttoprosessissa kiven kalsiitti reagoi savimineraalien kanssa. Hydrauliset kalkit sammutetaan yleensä kuivasammutuksena, mutta hydraulisen osuuden ollessa alhainen voidaan ne sammuttaa myös märkänä. Sammutuksessa saatu tuote sisältää kalsiumhydroksidia kuten ilmakalkki ja kalsiumsiliikaattiyhdisteitä kuten sementti. Hydraulinen luonnonkalkki (Natural Hydraulic Lime, NHL) ei sisällä muita ainesosia kuin poltettua hydraulista kalkkia. Sekoittamalla ilmakalkkia ja sopivia hydraulisia aineita saadaan hydraulista kalkkia (Hydraulic Lime, HL), joka ei kuitenkaan vastaa luonnonkalkkia. (Konow 2006, 16)

2.2.2 Hydraulisesti toimivat aineet

Pozzolaani on tulivuoren tuhkaa, jota on käytetty vedenkestävissä laasteissa antiikin aikaan. Pozzolaanit sisältävät runsaasti silikaattia, eli piidioksidia (SiO_2). Amorfinen piidioksidi reagoi kalkin kanssa, mutta kiteinen piidioksidi, kuten kvartsi ei reagoi kalkin kanssa normaalilämpötilassa. Niin kauan kun kalkki ei ole karbonatisoitunut, reagoi se amorfisen piidioksidin kanssa muodostaen vastaavanlaisia silikaattiyhdisteitä kuin hydraulisen kalkin tai sementin hydrataatiossa. (Konow 2006, 17)

Pozzolaanin tavoin toimivat myös kalkin sekaan poltossa jokseenkin vahingossa joutuneet puutuhka ja kuona. Puutuhka ja kuona eivät ole hienojakoisia. Suurehkot rakeet reagoivat hitaasti kalkin kanssa. (Konow 2006, 15, 17)

Kalkkilaastiin on myös lisätty murskattua tai jauhettua tiiltä tuomaan hydraulisuutta ja väriä. Suomalaisissa vanhoissa laasteissa tiilimurske on harvinaisuus, mutta eräissä Venäjän vallan aikaisissa kalkkilaasteissa on käytetty runsaasti tiilimursketta. (Konow 2006, 15)

Kun tiiltä poltetaan yli 500 °C:ssa mutta alle 700 °C:ssa, syntyy polttoprosessissa amorfisia silikaattiyhdisteitä, jotka pystyvät toimimaan kalkin kanssa hydraulisesti. Polttolämpötilan ollessa yli 700 °C, silikaattiyhdisteet muuntuvat ja niiden reaktiokyky kalkin kanssa häviää. Nykyisin tiiliä poltetaan 1000 - 1100 °C:ssa. Polttolämpötilan ollessa korkeampi alkavat silikaattiyhdisteet sintraantua. Sintraantunut tiili on lasimaista ja sen silikaattioksidit toimivat kuten pozzolaanit tai matalapolttainen tiili. (Konow 2006, 17)

Kun Suomenlinnassa tutkittiin tiilimurskelaastin toimintaa, huomattiin tiilimurskeen toimivan toisellakin tapaa. Tiilimurske pystyy sitomaan itseensä huomattavia määriä kosteutta, jota laasti voi hyödyntää hitaan kovettumisen aikana. Tämä ominaisuus vähentää kutistumishalkeamien syntymistä. (Konow 2006, 15)

3 Hamppu-kalkkikomposiitti rakentamisessa

3.1 Hamppu-kalkkikomposiitin kaltaiset rakennusmateriaalit

Hamppu-kalkkikomposiitti on rakennusmateriaalina kehittynyt perustuen vanhoihin ja historian saatossa toimiviksi ja terveellisiksi havaittuihin rakennusmateriaaleihin. Monet vanhat rakennustavat pohjautuvat samaan periaatteeseen, jossa sidosaineeseen sekoitetaan maa-ainesta ja joukkoon lisätään luonnonkuitua tai muuta orgaanista materiaalia lisäämään eristävyyttä ja kestävyyttä.

3.1.1 Opus caementicium

Opus caementicium tai Rooman sementti on historiallinen rakennusmateriaali, jota antiikin roomalaiset käyttivät. Rooman sementissä sidosaineeseen, kuten kalkkiin sekoitettiin pozzolaania ja luonnonkuituja lisäämään lujuutta ja vähentämään halkeilua. Täyteaineena käytettiin tulivuoriperäistä hiekkaa ja kiviä. Kyseinen rakennusmateriaali on havaittu kestäväksi vuosisatojen saatossa ja joitakin antiikin Rooman aikaisia rakennuksia on olemassa vielä nykyäänkin. (Bruijn 2012)

3.1.2 Savirakentaminen

Savirakentamisen juuria voidaan jäljittää tuhansien vuosien taakse. Suomeen savirakentaminen rantautui 1700-luvulla. Savesta on rakennettu Suomessa satoja erilaisia rakennuksia joista pystyssä on vielä pari sataa. Saven sekaan

yleensä on lisätty täyteaineeksi lämmöneristävyyden parantamiseksi ja lujuutta lisäämään erilaisia luonnonmateriaaleja kuten puuta ja olkia tai kanervan varpuja. (Ranki 2007) Kevytsavi tarkoittaa rakennusmateriaalia, jossa nestemäiseen saveen on sekoitettu täyteaineeksi olkea. Materiaalissa yhdistyvät saveen hyvät ominaisuudet lämpöeristävyyteen ja helppoon työstettävyyteen. Hyvin kuivuneen saveen tasapainokosteus on vain 2 – 3 % (Ranki 2007). Kevytsavimassa voidaan valaa kantavan puurungon väliin tai siitä voi valmistaa erilaisia harkkoja tai elementtejä, joita käytetään rakentamiseen niiden kuivuttua. (Saviyhdistys 2014)

3.1.3 Olkipaalirakentaminen

Nebraskassa, Pohjois-Amerikassa on rakennettu olkipaalirakennuksia jo 1800-luvun lopulta lähtien. Vanhimmat yhä käytössä olevat rakennukset ovat yli 100-vuotiaita. Olkipaalirakentaminen on yleistynyt viime aikoina ympäri maailman seinärakenteena ekologisuutensa, hyvän lämmöneristävyytensä ja edullisuutensa takia. Olkipaaliseiniä on mahdollista käyttää kantavina rakenteina, mutta Suomessa keskitytään lumikuormien takia rakenteisiin, joissa paaleja käytetään kantavan puurungon välissä. Seinärakenne koostuu päällekkäin pinotuista olkipaaleista ja paalikerrokset voidaan tapittaa toisiinsa rauta- tai puusauvoilla, jotka lävistävät kaksi tai kolme alemmaa kerrosta. Olkipaalit on myös voitu kiinnittää muuraamalla, kun paalit on ensin kieritetty laastissa siten, että niiden pinnoille on muodostunut kova kuori. Yleensä olkipaaliseinärakenne pinnoitetaan rappaamalla, mutta se voidaan myös laudoittaa tai levyttää. Rappauksessa on käytetty kalkki-, sementti- ja savilaasteja joko sellaisenaan tai vahvistamalla rappaus paalien sivupinnoille sidotulla metallisella rappausverkolla tai harvalla juuttikankaalla. (Saviyhdistys 2014)

3.2 Hamppu-kalkkikomposiitin alkuajat

Hamppu-kalkkikomposiitin historia alkaa Ranskasta, Champagnen maakunnasta, Troyesin kaupungista. Kuten monissa kaupungeissa Ranskassa, myös Troyesin kaupungissa on useita tammirunkoisia rakennuksia, joiden seinät on täytetty oljilla, sepelillä ja kalkilla. Rakennusten vanhoja kalkkirappauksia on yritetty korjata sementtipohjaisilla rappauksilla tuhoisin seurauksin. Seinät eivät enää hengittäneet, jonka tuloksena sisusta turposi ja rappaus irtosi. (Allin 2012, 33)

Ensimmäinen ihminen, joka keksi käyttää hamppua täyteaineena oli Charles Rasetti 1980-luvulla. Tuohon aikaan kiinnostus hamppua kohtaan oli nousussa uudelleen ja kolme ihmistä näki potentiaalia kyseisessä konseptissa ja kehittivät sitä eteenpäin; France Périer (Isochanvre), Bernard Boyeux (Association Construire en Chanvre) ja Yves Kühn (Association ADAM). Jokainen käytti omaa sidosainetta luodakseen oman version hamppuseoksesta. Lukuun ottamatta Isochanvrea ovat nämä toimijat vieläkin mukana materiaalin kehittämisen edistämässä. (Allin 2012, 33-34)

Myöhemmin monet muut ammatti- ja amatöörirakentajat Ranskassa kokeilivat käyttäen hamppua rakennusten kunnostuksessa ja ekologisissa rakennusprojekteissa. Jonkin ajan kuluttua monet lähestymistavat ja kokeilut uudella teknologialla johtivat ongelmiin, joka johti alan järjestöjen kehitykseen jotta konseptin edistämässä voitaisiin ottaa huomioon mahdollisimman monen tahon kokeemukset. (Allin 2012, 33)

3.3 Hamppurakentaminen maailmalla

Vaikka hamppu-kalkkikomposiitti on rakennusmateriaalina vielä suhteellisen nuori, käytetään sitä rakennusteollisuudessa jo runsaasti eri puolilla maailmaa. Ranskasta lähtöisin oleva materiaali on levinnyt jo ympäri Eurooppaa, Pohjois-Amerikkaan ja aina eteläiselle pallonpuoliskolle saakka.

Teolliseen tuotantoon suuntautuneita yrityksiä löytyy tietojemme mukaan mm. Iso-Britanniasta (Limetechnology Ltd), Ranskasta (Technichanvre), Espanjasta (Cannabrick), Australiasta (Hempcrete Australia Pty Ltd) ja Yhdysvalloista (American Limetechnology).

3.4 Hamppu-kalkkikomposiitti osana ekologista ja terveellistä rakentamista

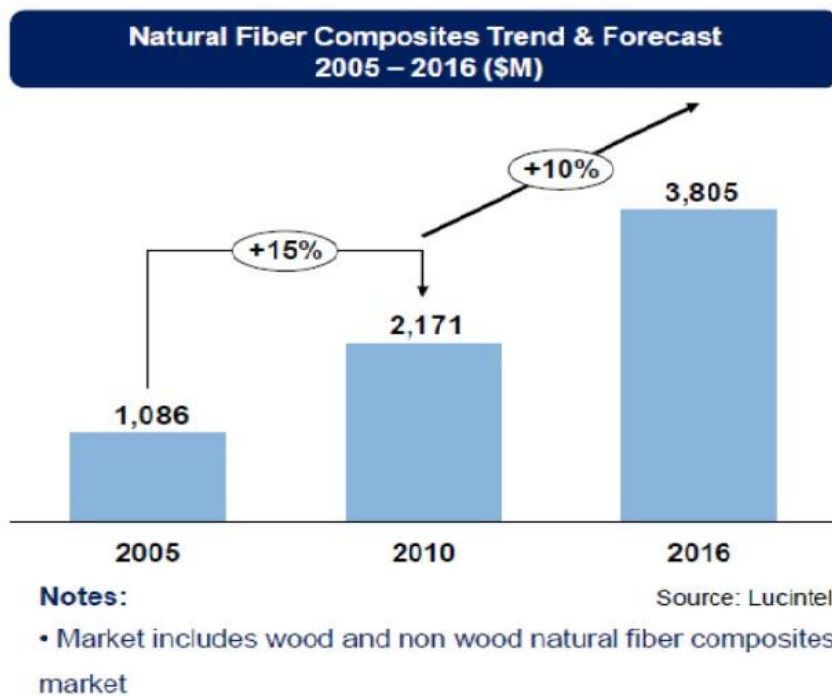
Hamppu nopeakasvuisena ja ekologisena viljelyskasvina on virkistävä lisä Suomalaiseen ekologiseen rakentamiseen. Sen niinikuidut voidaan hyödyntää rakentamisessa esimerkiksi eristemattona tai lujitemateriaalina komposiitin muodossa. Varren puumaiset päästäreet voidaan hyödyntää sekoittamalla yhdessä sammutetun kalkin ja veden kanssa saaden aikaan hygroskooppista komposiittimateriaalia, jossa yhdistyvät päästäreiden eristävyys kalkin hyvien kosteusteknisten ominaisuuksien kanssa. Hamppu-kalkkikomposiitti ei sisällä materiaaleja jotka aiheuttaisivat sisäilmaan päästöjä, heikentäen sisäilman laatua. Suomalaisessa rakentamisessa kalkki on tuttu terveellisyydestään ja sitä on käytetty mm. maakellareiden maalina desinfioivan ominaisuuden takia (Nordkalk 2014). Korkean emäksisyyden ansiosta se luo huonon kasvualustan homeisienille (Evrard & De Herde 2010)). Homeongelmien seurauksena on Suomessa alettu kiinnittämään enemmän huomiota rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Home- ja kosteusvauriot ovat yksi tärkeimmistä syistä huonoon sisäilmaan ja sitä pidetään yhtenä maamme suurimmista ympäristöterveysongelmista. (Rakennusfysiikka 2009, 210) Katse on kohdistunut takaisin luonnonomukaisiin hygroskooppisiin rakennusmateriaaleihin, joissa ei ole tarvetta höyrinsululle vaan kosteus pääsee luonnollisesti läpäisemään rakenteen (Turun Sanomat 15.5.2005).

Massiivirakenteiset ulkoseinät ja yläpohjat, joihin myös hamppu-kalkkikomposiitti lukeutuu toimivat kosteusteknisesti turvallisesti, koska niissä ei ole rajapintoja rakennekerrosten välillä, joihin kosteus voi tiivistyä tai joissa voi esiintyä homeen kasvua. (TTY 2008) Massiivirakenteilla on myös kyky tasata

lämpötila- ja kosteusvaihteluja, mikä on etuna vaihtelevissa ilmasto-olosuhteissa.

Hamppu-kalkkikomposiitin tekeminen ei vaadi suuria ja paljon energiaa kuluttavia koneita, vaan sekoitus voidaan hoitaa betonimyllyllä tai tasosekoittimella. Eniten energiaa kuluu kalkin louhimiseen ja polttamiseen. Boutin (2005) mukaan yhden puurungollisen neliömetrin (paksuus 26 cm) hamppu-kalkkikomposiittiseinän tuottaminen vaatii 394 MJ energiaa ja se sitoo 135 kg hiilidioksidia (Bruijn 2010).

Kysyntä on kasvava luonnonmukaisille materiaaleille. Luonnonkuitukomposiittialalla on ollut Lucintelin mukaan 15 % kasvua vuoden 2005 ja 2010 välisenä aikana. Seuraaville vuosille Lucintel on ennustanut 10 % kasvua. (Lucintel 2011)



Kuvio 3. Luonnonkuitukomposiittien markkinoiden kasvu (Lucintel 2011)

3.5 Tekniset ominaisuudet

Hamppu-kalkkikomposiitilla on monia etuja verrattuna tavallisiin seinien rakennusmateriaaleihin. Osasta hamppu-kalkkikomposiitin ominaisuuksista on jo suoritettu maailmalla tutkimuksia, mutta tutkittavaa riittää vielä laajasti.

Hamppu-kalkkikomposiitin etuja talon rakennusmateriaalina:

- hyvä ilmatiiveys molemminpuolisen rappauksen ja saumattoman rakenteen ansiosta (Bruijn 2012)
- hyvä paloturvallisuus
- hyvä lämmöneristävyys (Evrard & De Herde 2010)
- suhteellisen hyvä ääneneristävyys (Bruijn 2012)
- korkea pH suojelee homesieniltä (Evrard & De Herde 2010)
- ainutlaatuinen huokoisuus (Bruijn 2012)
- ajan kanssa kovettuva rakenne (Konow 2006, 14-15)
- massiivirakenne
- kustannustehokas
- muokattava

3.6 Rakennustavat

Rakentaminen hamppu-kalkkikomposiitista on vielä nuori rakennustapa maailmalla. Yleisimmät tavat rakentaa hamppu-kalkkikomposiitista ovat

- liukuvalu tampaten (Allin 2012)
- muuraus harkkoina (Allin 2012; Bruijn 2012)
- ruiskuvalu muottilevyä vasten (Allin 2012)
- elementtirakentaminen (Allin 2012)

3.6.1 Liukuvalu

Seinän valetaan liukuvaluna ja tampaten muottien väliin joko kantavan rungon ympärille tai ulkopuolelle. Tamppaus tehdään yleensä puista tamppauskapulaa apuna käyttäen. Tamppauksessa tulee käyttää sopivasti voimaa, jotta hampun päistäreet tarttuisivat riittävän hyvin toisiinsa eikä suuria ilmarakoja jäisi rakenteeseen. Liian kova tamppaus taas saa aikaan liian tiiviin rakenteen, jolloin lämmöneristävyys kärsii. Rakenne tampataan tiiviimmäksi muottien ja runkotolppien vierestä ja rakenteen sisäosa kevyemmin, luoden eristävemmän sisäosan. Muotit voidaan poistaa tarvittaessa heti tamppauksen jälkeen, sillä lopullinen kovettuminen tapahtuu vasta ilman hiilidioksidin vaikutuksesta. (Allin 2012, 153; Bruijn 2012)



Kuva 3. Hamppu-kalkkikomposiitin liukuvalu (Kuva American Limetechnology 2014)

3.6.2 Ruiskuvalu

Seinän valaminen ruiskuttamalla on tällä hetkellä kehittynein työtapa hamppu-kalkkirakentamisessa. Ruiskuttamisessa tarvitaan vai muotti jota vasten massa voidaan ruiskuttaa. Hamppurakentamisen pioneerin Steve Allinin mukaan ruiskuvalaminen on tällä hetkellä helpoin ja nopein tapa valaa seinä. (Allin 2012)



Kuva 4. Hamppu-kalkkikomposiitin ruiskuvalu (The Limecrete Company 2014)

3.6.3 Muuraus harkkoina

Muuraus valmiista hamppu-kalkkiharkoista tapahtuu tavanomaisten harkkojen tavoin joko kantavan rungon ulkopuolelle tai ympärille. Harkoista voidaan tehdä puurungolle sopivampia jättämällä niihin kolo puurunkoa varten (Bruijn 2012).



Kuva 5. Hamppu-kalkkikompositin muuraus harkkoina (Chanvribloc 2014)

3.6.4 Elementtirakentaminen

Hamppu-kalkkikompositista voi myös valmistaa elementtejä puurunkoisten seinäelementtien tavoin. Elementteinä valmistettaessa on mahdollista vaikuttaa kuivumisolosuhteisiin toisin kuin paikallavalussa. Esimerkiksi Englantilainen Limetechnology Ltd. valmistaa tuotenimellä Hemclad olevia elementtejä, joita voidaan asentaa kantavan rungon ulkopuolelle. (Limetechnology 2014)



Kuva 6. Hemclad -elementin asennusta (Limetechnology 2014)

3.7 Käyttökohteet

Hamppu-kalkkikomposiittia voidaan käyttää moneen tarkoitukseen. Erilaisia seoksia luomalla voidaan vaikuttaa hamppu-kalkkikomposiitin ominaisuuksiin ja käyttökohteeseen. Kevyempiä, vähän sidosainetta sisältäviä seoksia voidaan käyttää ylä- ja alapohjissa hyvän eristävyyden takia. Enemmän sidosainetta sisältävä seos toimii massiivirakenteena seinässä ja lisälämmöneristeenä vanhassa rakenteessa. Lisäämällä hiekkaa tai savea seokseen saadaan aikaan raskas, hyvän ominaislämpökapasiteetin omaava seos, jota voidaan käyttää väliseinissä ja ulkoseinien sisäpinnassa tuomaan lämpömassaa rakennukseen.

4 Seokset

Seosvaihtoehtoja tutkiessamme päätavoite oli luoda seos Suomesta saatavista raaka-aineista. Hamppu-kalkkikomposiitissa yleisesti käytetty luonnon hydraulinen kalkki, jota ei Suomen maaperästä löydy, tuli korvata paikallisesti tuotetuilla raaka-aineilla, jotta lopputuotteesta saataisiin mahdollisimman ekologinen ja edullinen. Päätavoitteena oli luoda toimiva seos käytettäväksi ulkoseinärakenteessa, mutta vertailussa kiinnitettiin huomiota myös toimivuuteen muissa käyttökohteissa. Tarkoituksena oli saada aikaan seos joka oli tiheydeltään sopiva ja hyvä työstettävyydeltään. Kuivatiheydeltään materiaalin tuli olla eristäväksi seinämateriaaliksi sopiva, noin 350 kg/m^3 . Jotta materiaalista saataisiin kosteusteknisesti toimiva, sidosaineen tuli koostua pääasiassa sammutetusta kalkista, eikä seokseen lisätty hygroskooppista toimintaa heikentäviä lisäaineita. Sementti päätettiin jättää pois sidosainevaihtoehtoista sen huonon vesihöyryn läpäisevyyden ja korkeamman lämmönjohtavuuden takia (Evrard 2010). Sidostai lisäaineina ei tahdottu käyttää terveydelle haitallisia tai sisäilmaan päästöjä aiheuttavia aineita. Savitiilimurskeella ja savijauholla pyrittiin lisäämään seoksen hydraulisuutta. Luonnon hydraulinen kalkki otettiin sidosaineeksi vertailun vuoksi. Seoksista tarkasteltiin työstettävyyttä ja pohdittiin sidosaineiden vaikutusta

lopputuotteeseen. Ulkoseinämateriaaliksi hyväksi havaituista seoksista tarkasteltiin myös kuivumista.

Seosten suhteet määriteltiin tilavuuden mukaan, koska seoksista pyrittiin tekemään työmaalla tapahtuvan sekoituksen kannalta mahdollisimman yksinkertaisia. Seosten suhteittamista massan mukaan ei nähty välttämättömäksi, koska seoksista ei tutkittu mekaanisia ominaisuuksia. Lähtökohdat sidos- ja lisäaineille (taulukko 1) saimme Bruijnin (2010) väitöskirjasta ja Steve Allin (2012) Building With Hemp kirjasta. Osallistuimme kesäkuussa 2013 järjestettyyn hamppurakentamisen kurssiin Turun Koroisissa, josta saimme myös pohjatietoa hampukkalkkikompositin suhteitukseen ja työstämiseen.

Seoksia tehtiin yhteensä 14 käyttäen niissä seuraavia raaka-aineita:

- hampun päistäre (Hallintaus Oy)
- sammutettu kalkki, SL 90, Nordkalk
- savitiilimurske, raekoko 0/4 mm, punainen, Raikkonen Oy
- savitiilimurske, raekoko 0/4 mm, harmaa, Raikkonen Oy
- kipsi, Telko Supraduo
- luonnon hydraulinen kalkki, NHL5, Singleton Birch
- savijauho, Seppälän Tiili Oy
- hiekka, raekoko 0/4 mm
- vesi

Taulukko 1. Seosten sidos- ja lisäaineet

| Seos | SL 90 (til.%) | NHL5 (til.%) | Savijauho (til.%) | T.murske harmaa (til.%) | T.murske punainen (til.%) | Kipsi (til.%) | Hiekka (til.%) |
|----------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------|
| A | 100 | - | - | - | - | - | - |
| B | 83,3 | - | - | - | 16,7 | - | - |
| C | 83,3 | - | 16,7 | - | - | - | - |
| D | 95,2 | - | 4,8 | - | - | - | - |
| E | 80 | 20 | - | - | - | - | - |
| F | 80 | 20 | - | - | - | - | - |
| G | 95 | - | 5 | - | - | - | - |
| H | 47,5 | - | 2,5 | - | - | - | 50 |
| I | 80 | - | - | 20 | - | - | - |
| J | 70 | - | - | - | 10 | 20 | - |
| K | 80 | - | - | - | - | 20 | - |
| L | 75 | - | 5 | - | - | 20 | - |
| M | 95 | - | 5 | - | - | - | - |
| N | 81,8 | - | - | 18,2 | - | - | - |

4.1 Suhteitus

Kuten taulukosta 2 voidaan huomata, seosten päistäre-sidosainesuhde (P/S) oli 3:2 ...4:1. Vesi-sidosainesuhde (V/S) vaihteli välillä 1:2–1,1:1. Vesi-päistäresuhde (V/P) vaihteli välillä 0,9:3,5–0,9:2,3. Sidosaaineisiin luettiin näissä tapauksissa myös hiekka ja tiilimurske. Veden määrä päätettiin tapauskohtaisesti kunkin seoksen kohdalla työstettävyyden huomioon ottaen, koska työmaatilanteessa on rakenteen pysyttävä koossa muotteja poistettaessa. Seoksen vesimäärä oli riittävä, kun kuivaa sidosainetta ei ollut näkyvissä ja massa oli käsin palloksi muovailtavissa sekä koossa pysyvä.

Sekoitus tapahtui betonimyllyllä ja yhden koekappaleen erät sekoitettiin ämpärisissä. Koekappaleiden muotteina käytettiin teräksisiä 150 mm x 150 mm x 150 mm:n muotteja. Muotit täytettiin neljässä kerroksessa ja jokaisen kerroksen lisäyksen jälkeen massa tiivistettiin kevyesti teräsnuijalla tamppaamalla. Jokaisen seoksen kohdalla pyrittiin täyttö ja tamppaaminen suorittamaan samalla tavalla, jotta tamppaamisen eroista johtuva vaihtelu saatiin minimoitua. Koe-

kappaleet olivat yön yli muotissa, jonka jälkeen muotit avattiin ja koekappaleet pääsivät kuivumaan huoneilmassa (24 °C, 20–30 % RH).

Taulukko 2. Seosten sidos- ja lisäaineiden suhteet ja kommentit

| Seos | V/S suhde (tilavuus) | V/P suhde (tilavuus) | P/S suhde (tilavuus) | Kommentit |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| A | 0,9:1 | 0,9:3 | 3:1 | Hyvä muovailtavuus |
| B | 0,9:1,2 | 0,9:3 | 3:1,2 | Hyvä muovailtavuus |
| C | 0,9:1,2 | 0,9:2,3 | 2,3:1,2 | Hyvä muovailtavuus, mahd. käyttö sisä-rakenteissa |
| D | 0,9:1,05 | 0,9:3 | 3:1,05 | Hyvä muovailtavuus |
| E | 0,9:1 | 0,9:3 | 3:1 | Hyvä muovailtavuus |
| F | 1,1:1 | 1,1:4 | 4:1 | Huono muovailtavuus, ongelmia koosapysymisessä |
| G | 1,1:1 | 1,1:4 | 4:1 | Huono muovailtavuus, ongelmia koosapysymisessä |
| H | 1:2 | 1:3 | 3:2 | Hyvä muovailtavuus, mahd. käyttö sisä-rakenteissa |
| I | 0,9:1 | 0,9:3 | 3:1 | Hyvä muovailtavuus |
| J | 0,9:1 | 0,9:3,5 | 3:1 | Hyvä muovailtavuus, mutta ei niin homogeeninen sidosaine |
| K | 0,9:1,25 | 0,9:3,5 | 3,5:1,25 | Hyvä muovailtavuus, mutta ei niin homogeeninen sidosaine |
| L | 0,9:1 | 0,9:3,5 | 3,5:1 | Hyvä muovailtavuus, mutta ei niin homogeeninen sidosaine |
| M | 0,9:1 | 0,9:3,5 | 3,5:1 | Hyvä muovailtavuus |
| N | 0,9:1,1 | 0,9:3,5 | 3,5:1,1 | Hyvä muovailtavuus |

4.2 Havainnot sidos- ja lisäaineista

Seokset joiden sidosainepitoisuus oli pieni, olivat huonosti muovattavissa, kun taas suuremmalla sidosainepitoisuudella päästiin parempaan muovattavuuteen. Liian suuri veden osuus huononsi myös muovattavuutta. Koekappaleet joiden päistäre-sidosainesuhde oli 3:1 ...3,5:1 välillä vaikuttivat huokoisuuden ja ko-

vuuden puolesta parhaimmilla. Suhteen ollessa 4:1 oli havaittavissa ongelmia koekappaleen koossa pysymisessä.

Seokset jotka sisälsivät kipsiä, olivat muovailtavuudeltaan hyviä. Näissä seoksissa sidosaine kuitenkin painui muotin pohjalle, eivätkä koekappaleet olleet niin homogeenisia kuin muilla sidosaineseoksilla.

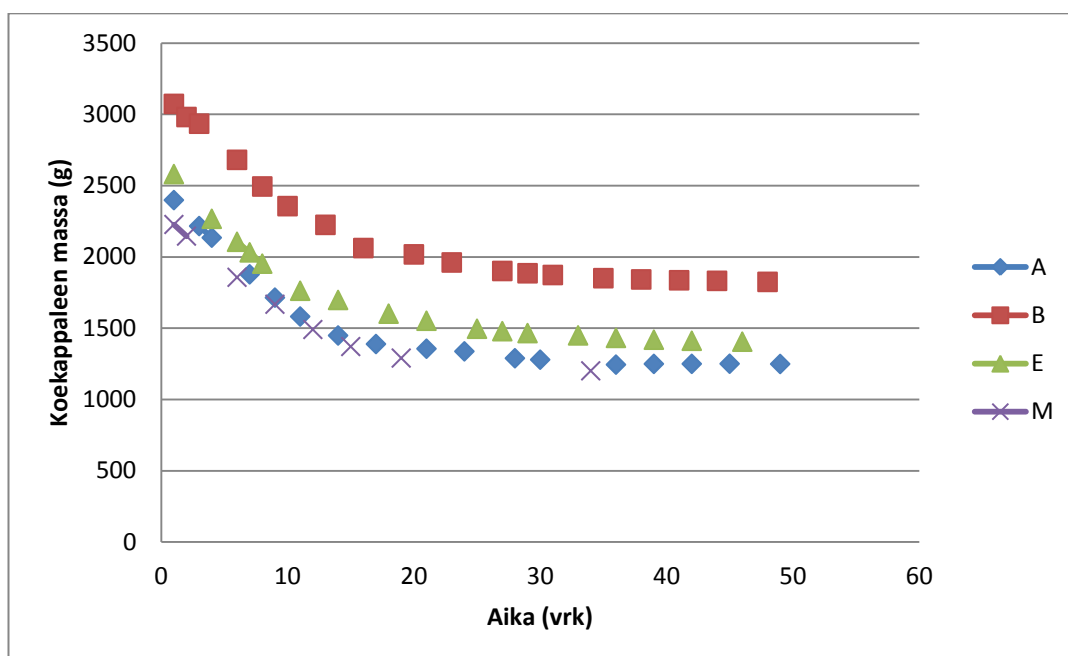
Savi sammutetun kalkin lisänä paransi hieman seoksen muovailtavuutta, mutta muuta eroa ei ollut havaittavissa. Savi ei tällä tavoin lisättyinä toimi hydraulisena sidosaineena, sillä hydraulisuuden saavuttamiseksi savimineraaleja tulisi olla mukana jo kalkin poltossa (Konow 2006, 16). Savella pystyi kuitenkin korvaamaan osan sammutetusta kalkista sen sitovan ominaisuuden ansiosta, mikä alentaa seoksen hintaa ja hiilijalanjälkeä. Savi on havaittu myös toimivaksi rakennusmateriaaliksi luonnonmukaisessa rakentamisessa (ks. 3.1.2). Näiden ominaisuuksien takia päätimme suorittaa jatkotutkimuksia savea sisältäneelle M-seokselle.

Tiilimursketta sisältäneet koekappaleet olivat tiiviimpiä ja hyvin koossa pysyviä. Tiilimursketta sisältäneet kappaleet muistuttivat hiekkaa sisältänyttä kappaletta eivätkä olleet niin huokoisia. Tiilimurskeella ei voinut korvata sammutettua kalkkia vaan se oli lisättävä sidosaineen lisäksi. Tiilimurskan lisäämisen tarkoituksena oli lisätä seoksen hydraulisuutta. Tutkimusten edetessä havaitsimme tiilimurskeen olleen poltettu väärässä lämpötilassa, 1035 - 1100 °C (Räikkönen Oy 2014), jolloin siinä ei ollut kalkin kanssa hydraulisesti toimivia silikaattiyhdisteitä. Tiilimurske pystyy kuitenkin sitomaan itseensä huomattavia määriä kosteutta, jota sidosaineena toimiva kalkki voi hyödyntää hitaan kovettumisen aikana. (ks. 2.2.2)

Luonnon hydraulista kalkkia käytettäessä emme huomanneet eroa työstettävyydessä verrattuna muihin saman päistäre-sidosainesuhteen omaaviin seoksiin. Luonnon hydraulista kalkkia sisältäneet koekappaleet olivat hieman paremmin koossapysyviä muottien avaamisen jälkeen, mutta merkittävää eroa muihin seoksiin ei ollut havaittavissa.

4.3 Kuivuminen

Seokset A, B ja M soveltuivat parhaiten seinärakenteessa käytettäväksi seokseksi työstettävyyden, sidosaineiden ja päistäre-sidosainesuhteiden puolesta. Koska seos E sisälsi hydraulista kalkkia ja sen päistäresidosainesuhde oli sopiva seinärakenteeseen (päistäre-sidosainesuhde 3-3,5:1) sitä verrattiin kuivumisen ja tiheyden puolesta seoksiin A, B ja M. Kuviossa 4 on esitetty A, B, E ja M seosten kuivumisajat. Kustakin seoksesta valittiin alkupainoltaan seoksen keskiarvoa lähinnä oleva koekappale.



Kuvio 4. Koekappaleiden kuivumisajat

Kuten kuviosta 4 voidaan huomata, eri seoksien välillä ei ole havaittavissa merkittäviä eroja kuivumisajoissa. Verrattaessa huomattavasti tiheämmän (taulukko 3) koekappaleen B kuivumista muihin koekappaleisiin (kuvio 4), voidaan huomata kuivumisen tapahtuneen yhtä nopeasti. Kuviosta 4 huomataan myös, että luonnon hydraulista kalkkia sisältäneen E seoksen kuivuminen tapahtui alussa nopeammin, mutta merkittävää eroa lopullisessa kuivumisessa verrattuna koekappaleisiin A, B ja M ei ole huomattavissa.

Taulukko 3. Koekappaleiden keskiarvotiheydet seoksista A, B, E ja M

| Seos | Tiheys kuivumisen jälkeen (kg/m ³) |
|------|--|
| A | 371,7 |
| B | 542,1 |
| E | 415,1 |
| M | 362,4 |

4.4 Johtopäätökset

Jotta taattaisiin seinärakenteeksi soveltuvan seoksen koossapysyminen, tulisi päistäre-sidosainesuhteen olla 3-3,5:1 välillä. Suuren sidosainepitoisuuden omaavia ja tiheämpiä seoksia olisi mahdollista käyttää esimerkiksi sisäseinien rakenteena tai ulkoseinien sisäpinnoissa rakennuksen lämmönvarauskyvyn lisäämiseksi. Huokoisempia seoksia (päistäre-sidosainesuhde $\geq 4:1$) olisi kuitenkin mahdollista käyttää levytetyssä seinärakenteessa sekä ylä- ja alapohjissa, missä materiaalin ei tarvitse olla itseään kantava.

Koekappaleen tiheyteen vaikuttivat pääasiassa sidos- ja lisäaineiden määrä sekä tiivistäminen. Tiivistämisen pitäisi tapahtua aina samalla tavalla kunkin seoksen kohdalla, jonka varmistaminen on käytännössä kuitenkin hankalaa. Koekappaleita jouduttiin tiivistämään enemmän kuin normaalissa seinärakenteessa, koska näin varmistettiin pienien koekappaleiden koossapysyminen. Todellisesta seinärakenteesta on kuitenkin helpompi luoda tiheydeltään matalampi, koska tällöin voidaan varmistaa seinän koossapysyminen tiivistämällä rakenteen ulkoiset pinnat tiiviimmäksi.

Koska seoksissa käytetty tiilimurska ei sisältänyt kalkin kanssa hydraulisesti toimivia silikaattiyhdisteitä, ei tämän käytössä eristävässä seinärakenteessa nähty järkeä. Tiilimurska nosti myös seoksen tiheyttä liian korkeaksi (taulukko 3). Toisin kuin kalkkilaastissa ei tiilimurskan kosteutta sitova ominaisuus ole hamppu-kalkkikomposiitissa välttämätön, koska runkoaineena käytetyllä päistä-

reellä on myös sama ominaisuus. Eristäväksi seinärakenteeksi sopivista seoksista A ja M vaikuttivat lupaavimmilta tiheyden ja päästäre-sidosainesuhteen puolesta. M seos valittiin näistä jatkotutkimuksiin, koska pääsidosaineena toimivaa sammutettua kalkkia pystyttiin korvaamaan Suomen maaperästä yleisesti saatavalla savella, laskien seoksen hintaa ja pienentäen sen hiilijalanjälkeä. Seoksia vertailtaessa myös huomattiin, että luonnon hydraulinen kalkki ei ole välttämätön työstettävyyden ja kuivumisen kannalta. Seosten lujuusominaisuuksia ei tutkittu, joten eri sidos- ja lisäaineiden vaikutusta materiaalin lujuuteen vaatii kuitenkin vielä tutkimuksia.

5 Fysikaaliset ominaisuudet

Fysikaalisia ominaisuuksia tutkittiin savea sisältäneelle M-seokselle. M-seoksesta tehdyille koekappaleille suoritettiin tutkimuksia palonkestävyydessä, vesihöyrynläpäisevyydessä ja lämmönjohtavuudessa. Opinnäytetyön laajuudellisissa puitteissa keskityimme tarkastelemaan vain näitä ominaisuuksia. Tutkimusten tarkoituksena oli selvittää kehittämämme seoksen fysikaalisia ominaisuuksia ja verrata niitä jo markkinoilla oleviin seoksiin. Tarkoituksena oli myös saada selville seoksemme ominaiset fysikaaliset ominaisuudet WUFI -simulaatioon, jotta mallinnuksesta tulisi mahdollisimman realistinen.

5.1 Palonkestävyys

Käytettäessä luonnonmukaisia rakennusmateriaaleja kysymykseksi nousee usein materiaalin palonkestävyys. Yleinen käsitys on, että luonnonkuitupohjaiset rakennusmateriaalit palavat herkästi ilman lisäaineita. Hamppu-kalkki-komposiitin kivettynyt kalkki estää tehokkaasti materiaalia syttymästä eikä läm-

pö johdu materiaalissa hyvin. Limecrete company:n mukaan Tradical® Hemcrete®:n palonkestävyys on 60 minuuttia perustuen BS EN 1365-1:1999 testiin. (The Limecrete Company 2014)

5.1.1 Palokoe

Palonkestävyyttä testattiin nestekaasupolttimella 300mm*300*mm*50mm ko-koiseen M-seoksen kappaleeseen. Kappale asetettiin jalustalle ja sitä poltettiin sinisellä liekillä noin 17 minuutin ajan. Kappaleen lämpötilaa pyrittiin mittaamaan eri syvyyksissä infrapunalämpömittarilla (Fulke 62 mini) kokeen aikana. Koska lämpömittarilla ei pystynyt mittaamaan korkeampia lämpötiloja kuin 500 °C, ei kappaleen polttopinnalle syntyvää lämpötilaa pystytty mittaamaan. Koska propaanin palamislämpötila ilmassa on 2000 °C (AGA 2014), voidaan lämpötilan polttopisteessä olettaa olevan tämä. Palon etenemistä seurattiin silmämääräisesti kappaleen poikkileikkauspinnalta.



Kuva 7. Koekappaleen poltto palokokeessa

5.1.2 Palokokeen tulokset

Polttokokeessa havainnoitiin kappaleen syttyvyyttä ja lämmön johtumista. Vaikka kappaletta kuumennettiin erittäin kuumalla liekillä, ei kappale itsessään syttynyt palamaan missään vaiheessa ja savuntuotto oli hyvin vähäistä. Materiaalin palaminen tapahtui hiiltymällä. Hiiltyminen eteni kappaleen sivupinnassa tasaisesti, mutta liekityskohdassa hiiltyminen oli nopeampaa. Hiiltyminen oli nopeampaa kohdassa, jossa polttimen liekki osui kappaleeseen. Noin kymmenen minuutin polttamisen jälkeen hiiltyminen oli edennyt kappaleen reunalla noin 20 mm ja liekityskohdan vastakkaisella puolella alkoi näkyä tummumista ja savua alkoi tulla kappaleen läpi. Kappaleen takapuolen lämpötila ei tästä huolimatta noussut kuin 70 asteeseen ja polttokohdassa olevassa tummuneessa huokosessa 97 asteeseen. Kappaletta ei poltettu kuin 17 minuuttia, koska haluttiin nähdä miten materiaali käyttäytyy polttamisen jälkeen. Polttokokeen jälkeen materiaali jäi hehkumaan varsinkin polttokohdasta. Hiiltynyttä materiaalia poistettaessa paljastui hehkuvaa materiaalia. Vaikka materiaali ei jäähtynyt heti, vaan jatkoi paloa hehkumalla hetken aikaa, sammui se itsestään muutaman minuutin kuluttua.



Kuvat 8 ja 9. Palokokeen taustapinnan lämpötila ja kappale kokeen jälkeen

5.1.3 Tulosten tarkastelu

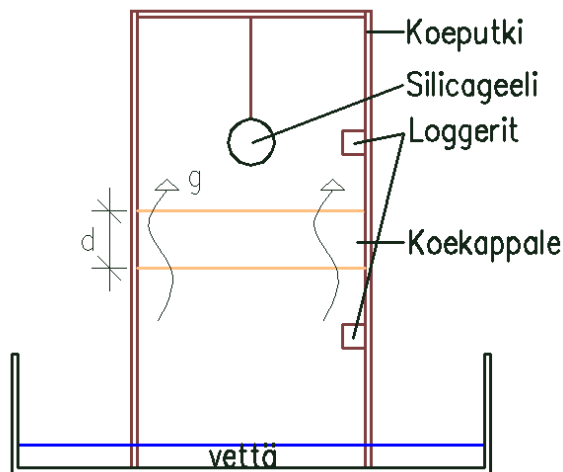
Voidaan olettaa, että kaasupolttimen tuottama lämpötila pinnalle on vähintään sama (800 - 1000 °C) kuin täysin kehittyneessä palossa (Paloinfo 2014). Koska kappale ei itse syttynyt tuleen missään vaiheessa, ei se edistä palon leviämistä muihin rakenneosiin helposti. Koska kappale paloi hiiltymällä, on mahdollista että iskun osuessa hehkuvaan osaan siitä lentää kyteviä osia muihin rakenteisiin, jotka voivat syttyä. Materiaali johti huonosti lämpöä palokokeissa, jonka pohjalta voidaan todeta sen suojaavan seinän kantavia rakenteita palolta tehokkaasti. Vaikka koekappale oli vain 50 mm paksu ja molemmilta puolilta rappaamaton, ei lämpötila sen toisella puolella noussut lähellekään kantavia rakenteita vaurioittavia lämpötiloja. Puun syttymislämpötila on 250 – 300 °C:n välillä (Puuinfo 2014) ja teräksen myötölujuuden heikkeneminen tapahtuu n. 400 °C:n lämpötilassa (Outinen 2006). On huomioitavaa, että kappaleessa ei ollut rakenteelle tavanomaisesti tehtävää rappauspintaa, joten reagointipinta-ala oli kokeessa huomattavasti suurempi kuin todellisessa tilanteessa. Rapatussa pinnassa ei myöskään ole palavaa materiaalia ja se on tiiviimpi kuin koekappaleen pinta, joten palon eteneminen alkuvaiheessa olisi todellisessa tilanteessa vielä hitaampaa. Kokeen perusteella voidaan olettaa, että materiaalille olisi mahdollista saavuttaa rakentamismääräyskokoelma E1:n mukainen paloluokka A2 tai B (RakMK E1 2002). Koe oli kuitenkin suuntaa antava ja paloluokan määrittämiseen tarvitaan EN -standardin mukaiset kokeet.

5.2 Vesihöyrynläpäisevyys

5.2.1 Vesihöyrynläpäisevyyskokeet

Hamppu-kalkkikomposiitin vesihöyrynläpäisevyys määritettiin standardoimattomalla putkikoemenetelmällä. Kuvassa 10 on esitetty käytetyn koemenetelmän

periaate. Putken sisäpuolelle saadaan korkea suhteellinen kosteus upottamalla sen aukinainen alapää veteen. Tutkittava materiaali sijoitetaan tiiviisti keskelle putkea. Putken yläosaan sijoitetaan kuivattua silicageeliä imemään kosteutta ja aikaansaamaan vesihöyrypitoisuusero koeputken ylä- ja alaosan välille. Vesihöyrypitoisuusero aiheuttaa diffuusion tutkittavan materiaalin läpi. Kosteusvirran tiheys g ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) määritettiin punnitsemalla silicageeli säännöllisesti. Putkeen sijoitettiin sekä ylä-, että alapuolelle loggerit mittaamaan suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattavan materiaalin eri puolilta. Punnitsemalla putkea säännöllisesti saadusta kosteusvirran tiheydestä voidaan määrittää materiaalin vesihöyrynläpäisevyys.



Kuva 10. Vesihöyrynläpäisevyyskokeen periaate

5.2.2 Koejärjestelyt

Koe tehtiin tilassa jossa lämpötila oli noin 24 °C ja ilman suhteellinen kosteus noin 18.5 %. Loggerit (Tinytag TGP-4500) laitettiin mittaamaan koeputken sisäpuolista kosteutta ja lämpötilaa 15 minuutin välein. Loggereista saadut tiedot on esitetty taulukossa 3. Silicageeli kuivattiin uunissa 120 °C:ssa yli 16 tuntia. Koeksessa pyrittiin pysymään silicageelin suhteellisen kosteuden alueella, missä vedenimunosopeus pysyisi lineaarisena. (RH < 30)

Taulukko 3. Vesihöyrynläpäisevyyskokeen loggereiden tiedot

| | Ylempi loggeri | Alempi loggeri |
|---------|----------------|----------------|
| RH min. | 6.5 % | 29.6 % |
| RH max. | 26.0 % | 98.2 % |
| t min. | 21.1 °C | 19.2 °C |
| t max. | 23.4 °C | 22.1 °C |
| RH ka. | 17.2 % | 88.7 % |
| t ka. | 21.9 °C | 21.4 °C |

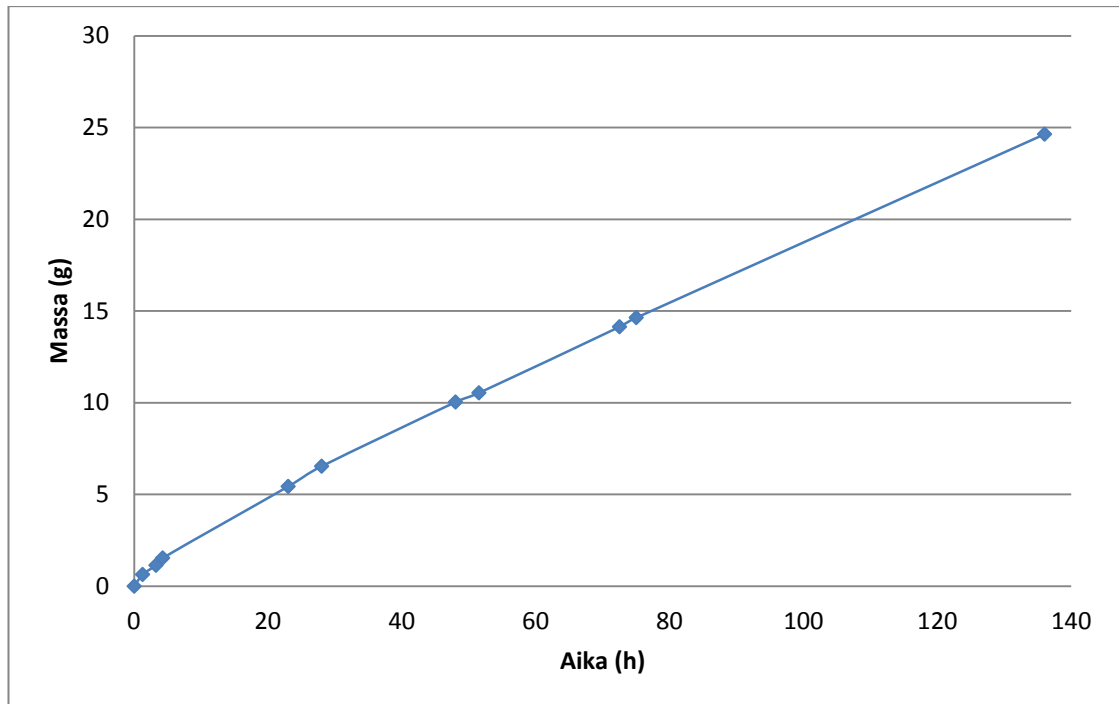
Koeputki muodostui 400 mm korkeasta putkesta, testattavasta materiaalista, kannesta, sekä silicageeliä sisältävästä pussista. Koeputkena käytettiin PVC-muovista valmistettua putkea, jonka sisähalkaisija oli 190 mm ja seinän paksuus 5 mm. Mitattava kappale sijoitettiin putken keskelle. Loggerit sijoitettiin mitattavan kappaleen molemmille puolille noin 50 mm:n etäisyydelle kappaleesta. Silicageeli laitettiin hyvin ilmaa ja vesihöyryä läpäisevään ohueen sukkaan, joka asetettiin roikkumaan kannesta samalle korkeudelle kuin loggeri. Kansi ja koekappale tiivistettiin käyttämällä akryylidispersiopohjaista saumausmassaa sekä ilmastointiteippiä.



Kuva 11. Vesihöyrynläpäisevyyskokeen koeputki

Koekappale valmistettiin perinteisellä hampuu-kalkkiseoksen valmistustavalla betonimyllyssä, josta valettiin 50 mm paksu levy. Levyn annettiin kuivua 3 kuukautta 24 celsiusasteen lämpötilassa ja noin 20 % RH:ssa. Levystä leikattiin vannesahalla putkeen sopiva, 190 mm halkaisijaltaan oleva kappale, jonka sopivuus ja tiiveys taattiin saumausmassalla.

Materiaalin läpi siirtynyt kosteusvirran tiheys voitiin laskea punnitsemalla sillicaan imeytynyt kosteus. Koska silicageeliä ei voinut ottaa ulos putkesta kokeen aikana, punnittiin koko koeputki ja koeputken massa vähennettiin kokonaisuudesta. Kosteuden siirtymistä mitattiin seitsemän päivän ajan useaan kertaan. Punnitsemiseen käytettiin GWB Mettler PM11 vaakaa, jonka tarkkuus on 0,1 g. Materiaalin läpi siirtynyt kosteuden määrä ajan funktiona esitetty kuviossa 5.



Kuvio 5. Vesihöyrynläpäisevyysskokeen kosteuden siirtymä materiaalin läpi

5.2.6 Laskennallinen tarkastelu

Kosteusvirran tiheys

Silicageeliin imeytyneen kosteuden määrästä saadaan selville kosteusvirran tiheys, joka tarkoittaa koekappaleen pinta-alayksikön läpi kulkeutunutta kosteusmäärää aikayksikössä. Kosteusvirran tiheys g ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) voidaan laskea kaavalla 1:

$$g = \Delta m / (A * \Delta t) \quad (1)$$

missä

Δm on läpi siirtyneen kosteuden määrä (kg)

Δt on näytetty aika (s)

A on pinta-ala (m^2)

Vesihöyryn osapaine-ero Δp (Pa) lasketaan kaavalla 2:

$$\Delta p = P_1 - P_2 \quad (2)$$

missä

P_1 on koeputken alapuolinen vesihöyryn osapaine (Pa)

P_2 on koeputken yläpuolinen vesihöyryn osapaine (Pa)

(Katso taulukko 3)

Vesihöyrynvastus Z (m²sPa/kg) lasketaan kaavalla 3:

$$Z = \Delta p / g \quad (3)$$

Vesihöyrynläpäisevyys δ (kg/msPa) lasketaan kaavalla 4:

$$\delta = d / Z \quad (4)$$

missä

d on ainekerroksen paksuus (m)

Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ lasketaan kaavalla 5:

$$\mu = \delta_i / \delta \quad (5)$$

missä

δ_i on ilman vesihöyryn diffuusiovastuskerroin

5.2.7 Tulokset

Taulukko 4. Vesihöyrynläpäisevyyskokeen tulokset

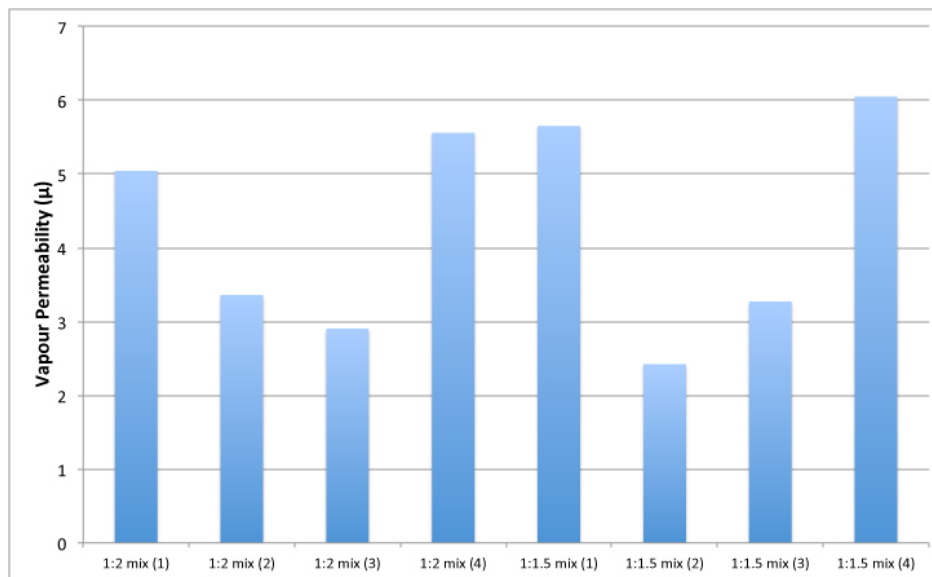
| | |
|--|----------------------------------|
| Kosteusvirran tiheys g | 1,2076E-06 kg/m ² s |
| Vesihöyryyn osapaine-ero Δp | 1783,6 Pa |
| Vesihöyrynvastus Z | 1498105976 m ² sPa/kg |
| Vesihöyryyn läpäisevyys δ | 3,34E-11 kg/msPa |
| vesihöyryyn diffuusiovastuskerroin μ | 6,0 |

5.2.8 Tulosten tarkastelu

Putkikoemenetelmässä on useita tekijöitä, jotka tuovat saatuihin tuloksiin epävarmuutta. Koeputken tiiveys voi vaikuttaa tuloksiin paljon. Pienet vuotokohtat putken kannessa, kuten myös materiaalin reunoilla voivat vaikuttaa suhteelliseen kosteuteen ja lämpötilaan ja sitä kautta kosteusvirran tiheyteen. Koeputkea ei myöskään pidetty täysin stabiloiduissa olosuhteissa, joten ulkopuolisen ilman lämpötila ja kosteusvaihtelut vaikuttavat kosteusvirtaan. Kuviosta 5 voi kuitenkin huomata siirtyneen kosteuden määrän pysyneen lineaarisena koko mittausjakson ajan, alun nopeampaa nousua lukuun ottamatta. Alun nopeampi nousu on selitettävissä testattavaan materiaaliin ja silicasukkaan sitoutuneella kosteudella, ennen kuin ne ovat saavuttaneet kosteustasapainon.

Siirtyneen kosteuden määrän mittaamisessa on myös monia tekijöitä, jotka vaikuttavat tulosten tarkkuuteen. Koska mittaaminen tapahtui punnitsemalla koko mittalaitteisto, jouduttiin se nostamaan hetkellisesti pois vesiastiasta, jolloin olosuhteet koeputken sisällä ovat voineet muuttua. Taulukossa 3 oleva alemman loggerin mittaama suhteellisen kosteuden minimiarvo johtuu punnitsemishetkellä tapahtuneesta mittauksesta, jolloin loggeri on mitannut huoneilman suhteellisen kosteuden. Koeputkeen on voinut jäädä myös pieniä määriä vettä, vaikka ylimääräiset vedet pyrittiin kuivaamaan hyvin ennen punnitsemista. Myös punnitsemiseen käytetyn vaa'an mittatarkkuus tuo epätarkkuutta tuloksiin.

Vaikka koetta ei suoritettu standardien mukaisilla menetelmillä, ovat vesihöyrynläpäisevyyskokeesta saadut tulokset vertailukelpoisia markkinoilla oleviin seoksiin ja muualla tehtyihin tutkimuksiin. Kuten kuvioista 6 voidaan huomata, Bathin yliopistossa tehtyjen tutkimusten mukaan hampuu-kalkkikomposiitin vesihöyryn diffuusiovastuskerroin vaihtelee eri seoksien välillä noin kolmesta kuuteen (Lawrence, Walker & Paine 2012). Limetechnology ilmoittaa Tradical® Hemcrete®:n diffuusiovastuskertoimeksi 4,84 (Limetechnology 2008). Saatu tulos on hieman korkeampi, kuin keskiarvo Bath:n yliopiston tutkimuksissa tai Tradical Hemcretelle ilmoitettu vesihöyrynläpäisevyys, mutta tämä on selitettävissä koekappaleen korkealla tiheydellä.



Kuvio 6. University of Bath:n vesihöyryn diffuusiovastuskertoimet eri seoksille (Lawrence ym. 2012)

5.3 Lämmönjohtavuus

5.3.1 Lämmönjohtavuuskokeet

Hamppu-kalkkikomposiitin lämmönjohtavuuskokeet suoritettiin seokselle M Tampereen teknillisellä yliopistolla (liite 1). Lämmönjohtavuuskokeet tehtiin lämpövirtalevylaitteen avulla standardin ISO 8301 (1991) ”Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus” mukaisesti. Kokeissa määritettiin materiaalille λ_{10} -arvo, joka kertoo materiaalille laboratoriossa 10 °C keskilämpötilassa mitatun lämmönjohtavuuden. Lämmönjohtavuuskokeista saadut tulokset on esitetty taulukossa 5.

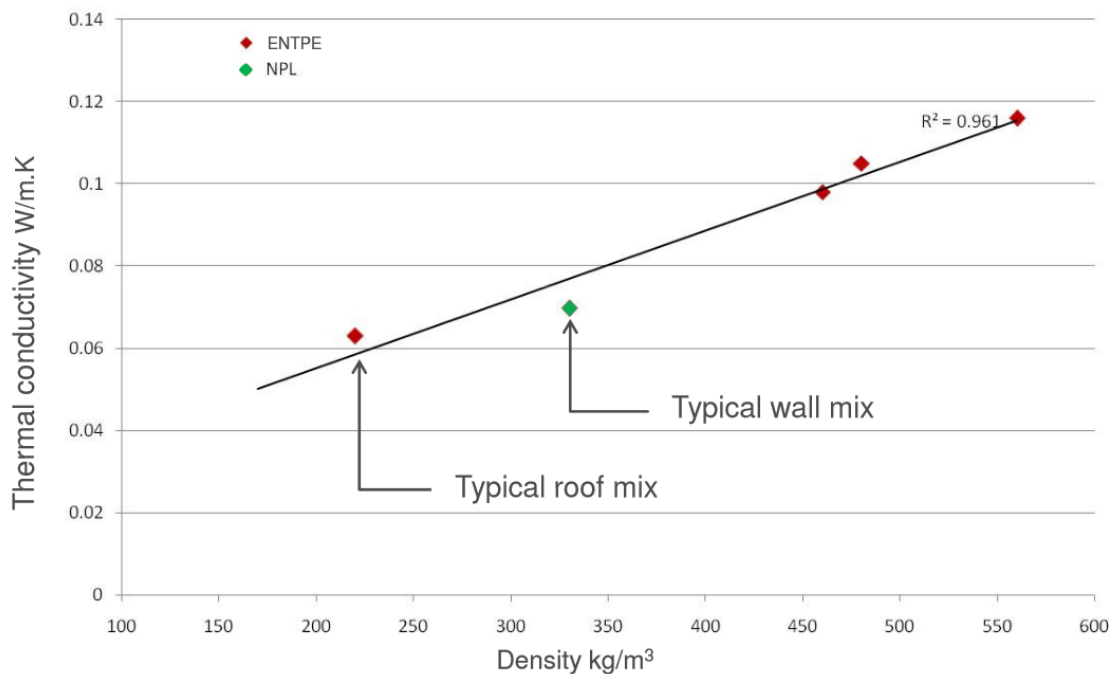
Taulukko 5. Lämmönjohtavuuskokeiden tulokset

| Koekappale | T_u (°C) | T_L (°C) | T_m (°C) | ΔT (°C) | λ_{10} (W/m ² *K) |
|------------|------------|------------|------------|-----------------|--------------------------------------|
| K-1 | 0,02 | 20,02 | 10,02 | 20,00 | 0,110 |
| K-2 | 0,01 | 20,02 | 10,01 | 20,01 | 0,114 |
| K-3 | 0,01 | 20,00 | 10,01 | 19,99 | 0,109 |
| K-4 | 0,01 | 20,01 | 10,01 | 20,00 | 0,112 |
| K-5 | 0,02 | 20,02 | 10,02 | 20,00 | 0,109 |
| K-6 | 0,02 | 20,02 | 10,02 | 20,00 | 0,110 |

5.3.2 Lämmönjohtavuuskokeiden tarkastelu

Vaikka lämmönjohtavuus määritettiin käyttämällä standardin mukaisia kokeita, on siinä silti pohdinnan varaa. Lämmönjohtavuus mitataan kokeissa vain 50mm paksusta kappaleesta, jolloin on mahdollista varsinkin isohuokoisilla materiaaleilla, kuten hamppu-kalkkikomposiitilla, että materiaaliin jää koekappaleen poikki meneviä ilmahuokosia, joissa lämpö pääsee liikkumaan konvektiolla ilman mukana.

Hamppu-kalkkikomposiitista on myös vaikeaa valmistaa perinteisesti valamalla tiheydeltään oikeita koekappaleita. Koska kokeessa käytetään vain 305 mm x 305 mm x 50 mm kokoisia kappaleita, täytyi hamppu-kalkkiseos tampata tiiviimmäksi kuin normaalisti, jotta voitiin taata kappaleen koossa pysyminen. Kokeissa kappaleiden tiheys vaihteli välillä 398,5–439,6 kg/m³, keskiarvon ollessa 420 kg/m³. Todellisessa seinärakenteessa hamppu-kalkkikomposiitin tiheys on noin 350 kg/m³ tai jopa matalampi, johtuen kevyemmästä tiivistämisestä. Kuten kuviossa 7 nähdään, tiiviimmät kappaleet vaikuttavat lämmönjohtavuuteen sitä kasvattaen, joten tiheydeltään pienemmän hamppu-kalkkiseinän lämmönjohtavuuden voidaan olettaa olevan alhaisempi, kuin kokeista saadut tulokset esittävät. Materiaalin lämmönjohtavuus ja sen pohjalta laskettu U-arvo ei kuitenkaan kerro koko totuutta rakennuksen energiatehokkuudesta. Massiivirakenteiset talot kuluttavat vähemmän lämpöenergiaa kuin U-arvojen perusteella on laskettu. Tämä johtuu siitä, että massiivirakenteet varastoivat auringosta tulevaa lämpöenergiaa. (TTY 2008, 51)



kuvio 7. Hamppu-kalkkikomposiitin lämmönjohtavuus tiheyden funktiona (Lime-technology, 2008)

6 WUFI-mallinnus

Hamppu-kalkkikomposiitin kosteusteknistä toimintaa ja homehtumisen mahdollisuutta tukittiin WUFI Pro 5.1-ohjelmalla. Simuloinnin tarkoituksena oli pohtia hamppu-kalkkikomposiitin kosteuskäyttäytymistä ja selvittää homehtuuko rakenne suomen olosuhteissa. Materiaalia ei löytynyt valmiiksi WUFI:n materiaalitietokannasta, joten lähtötiedot mallinnukseen jouduttiin luomaan itse.

6.1 Materiaalien lähtöarvot

WUFI-mallinnuksessa on tärkeää valita materiaalille oikeat fysikaaliset lähtöarvot. Koska hamppu-kalkkikomposiitille ei löydy valmiita arvoja, etsittiin osa tiedoista aikaisemmista tutkimuksista ja osa lähtöarvoista perustuu omiin tutkimuksiin.

Seinärakenteeksi mallinnukseen valittiin kokonaispaksuudeltaan 540 mm paksu hamppu-kalkkikomposiittiseinä, jonka sisä- ja ulkopinta on päällystetty 20 mm:n kalkkirappauksella. Poikkileikkaus seinärakenteesta on esitetty kuvassa 12. Eristepaksuudeksi valittiin 500 mm pohjautuen Limetechnology:n (2008) antamiin lämmönjohtavuusarvoihin Tradical Hemcretelle ja oman lämmönjohtavuuskokeemme tuloksiin. Limetechnology:n (2008) mukaan 500 mm paksun Tradical Hemcrete -seinärakenteen U-arvo on 0,134 W/mK. Jos U-arvo lasketaan oman M -seoksemme lämmönjohtavuuden mukaan, olisi RakMk C3:n vaadittuun U-arvoon 0,17 W/mK tarvittu 647 mm paksu eristekerros (RakMK C3). Kun otetaan huomioon lämmönjohtavuuskokeissa olleiden kappaleiden suuri tiheys (420 kg/m^3), ja verrataan lämmönjohtavuusarvoja Limetechnology:n (2008) antamiin lämmönjohtavuusarvoihin kuviossa 7, voidaan 500 mm paksun eristekerroksen olettaa olevan riittävä Suomen ilmasto-olosuhteissa. Seinärakenne mallinnettiin myös ensin Limetechnology:n (2008) ilmoittamilla tiheys- ja lämmönjohtavuusarvoilla ($\rho = 330 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_{10} = 0,07 \text{ W/mK}$), jonka jälkeen saatuja arvoja verrattiin M seoksen lähtöarvoilla saatuihin arvoihin. Kuten liitteestä 2 voi huo-

mata, tilanne ei juuri eronnut kosteuden ja lämpötilan puolesta tarkastelupisteissä, joten simulaatioon valittiin oman seoksemme lähtöarvot. Vaikka homehtuvuuden kannalta rakenteessa kuviteltiin olevan puurunko, ei rungon vaikutusta fysikaalisiin ominaisuuksiin otettu huomioon. Kalkkirappaukseksi valittiin ohjelman materiaalitietokannasta valmis kalkkirappaus (Stucco).

Lähtöarvot valittiin vastaamaan kosteusteknisesti epäedullista rakennetta. Oikeassa seinärakenteessa tiheys voisi olla huomattavasti pienempikin, mutta simulaatioon valittiin tiheys, joka vastaa muissa kokeissa käytettyjen kappaleiden tiheyttä. Huokoisuus ja lämpökapasiteetti valittiin pohjautuen Evrard & De Herde 2010-tutkimukseen, jossa hamppu-kalkkikomposiitin tiheys vastasi omaa M-seostamme. Lämmönjohtavuudeksi valittiin TTY:n lämmönjohtavuuskokeista saatu keskiarvo. Vesihöyryn diffusiovastuskertoimeksi valittiin arvo, joka saatiin vesihöyrynläpäisevyyskokeista.



Kuva 12. Poikkileikkaus mallinnetusta seinärakenteesta

Taulukko 6. WUFI -mallinnukseen valitut perusarvot

| | |
|---|-------------------------------------|
| Tiheys ρ | 420 kg/m ³ |
| Huokoisuus φ | 0,73 m ³ /m ³ |
| Ominaislämpökapasiteetti c | 1560 J/kg/K |
| Lämmönjohtavuus λ_{10} | 0,11 W/mK |
| Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ | 6,0 |
| Rakennekosteus H | 33 kg/m ³ |

Rakenteen alkutilanteen suhteellinen kosteus asetettiin riittävän suureksi (80 % RH, 20 °C), koska oletettiin että todellisessa tilanteessa rakenteessa olisi vielä kosteutta valun jäljiltä. Rakennuksen ajateltiin olevan pientalo ja korkeudeksi asetettiin alle 10 m. Rakennuksessa oletettiin olevan räystääs, jonka takia pystysuorasta sateesta pintaan pääsevän kosteuden määrää kuvaava kerroin R1 on 0. Tuulen mukana pintaan pääsevää viistosadetta kuvaava kerroin R2 asetettiin ohjelman antamaan vakioon 0,07 m/s alle 10 metriä korkeille rakennuksille. WUFI laskee seinään pääsevän sadeveden määrän kaavan 6 mukaisesti. Simuloinnin alkamisajankohdaksi asetettiin 1.10.2013, koska rakennuksen oletettiin olevan kesällä tapahtuneen rakentamisen jäljiltä asumiskunnossa tuona ajankohtana. Simuloinnin pituudeksi valittiin 3,5 vuotta, missä ajassa rakenteen oletettiin saavuttavan tasapainokosteuden.

Sateesta seinään pääsevän kosteusrasituksen WUFI laskee kaavan 6 mukaisesti:

$$G = S * (R1 + v * R2) \quad (6)$$

missä

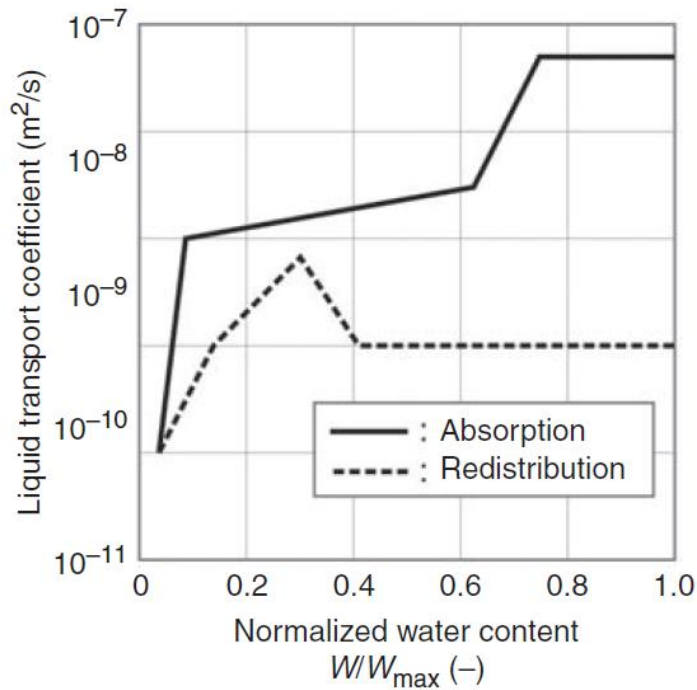
G on sadeveden tuottama kosteusrasitus

S on sadeveden määrä

| | |
|------|--|
| $R1$ | on pystysuorasta sateesta seinään pääsevän kosteuden kerroin |
| v | on tuulen nopeus |
| $R2$ | on viistosateesta seinään pääsevän kosteuden kerroin |

6.2 Hygrotermiset funktiot

Vaikka hygrotermiset funktiot eivät ole välttämättömiä WUFI -laskennan kannalta, tarkentavat ne useimmiten laskennan tuloksia (Varpiola 2013). Hampu-kalkkikomposiitille annettiin arvot kosteuskapasiteettifunktioon ja kapillaarisia ominaisuuksia kuvaavaan funktioon sekä absorptiolle, että uudelleenjakautumiselle. Arvoiksi valittiin Evrardin ja De Herden (2010) -tutkimuksessa luodut uudet hamppu-kalkkikomposiitin kapillaarisia ominaisuuksia kuvaavat arvot. Materiaalin tasapainokosteudet mallinnukseen valittiin myös Evrardin ja De Herden (2010) -tutkimuksesta, sillä tasapainokosteuksia ilman suhteellisen kosteuden funktiona ei pystytty mittaamaan itse. Hampu-kalkkikomposiitin tasapainokosteudet RH:n funktiona on esitetty taulukossa 7. Mallinnuksessa käytetyt kapillaarisia ominaisuuksia kuvaavat funktiot on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 7. Kapillaarisia ominaisuuksia kuvaavat arvot absorptiolle ja uudelleenja-kautumiselle. (Evrard & De Herde 2010)

Taulukko 7. Hamppu-kalkkikomposiitin tasapainokosteudet. (Evrard & De Herde 2010)

| RH % | Kosteuspitoisuus (kg/m^3) | Kosteuspitoisuus (mas-sa%) |
|--------|-------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 32 | 15,24 | 3,18 |
| 50 | 22,31 | 4,65 |
| 65 | 30,78 | 6,41 |
| 80 | 36,48 | 7,60 |
| 93 | 45,40 | 9,46 |
| 96 | 65,98 | 14,34 |
| 98,897 | 125,63 | 26,17 |
| 99,631 | 175,65 | 32,84 |
| 99,889 | 300,23 | 62,55 |
| 99,963 | 426,93 | 88,94 |
| 99,989 | 496,79 | 103,50 |
| 99,996 | 519,97 | 108,33 |
| 100 | 595,58 | 124,08 |

6.3 Ilmasto-olosuhteet

Ilmasto-olosuhteet haluttiin valita mahdollisimman tarkasti Suomen ilmastoa kuvaaviksi. WUFI -ohjelmassa on valmiiksi paikkakuntaakohtaisia sääoloja, joista ulkoilman olosuhteiksi valittiin Jyväskylän ilmasto. Sisäilmastoon käytettiin standardin EN 13788 mukaista logaritmia, joka johtaa sisäilman suhteelliset kosteudet ulkoilman säätietojen mukaan. Sisäilman suhteellisen kosteuden kosteusluokka valittiin käyttäjän määrittämäksi ja sisäilman kosteuslisäksi asetettiin 2g/m^3 , riippumatta lämpötilasta. Sisälämpötila pysyy vakiona ympäri vuoden ($20\text{ }^\circ\text{C}$). Taulukossa 8 on esitetty WUFI:in syötetyt tiedot.

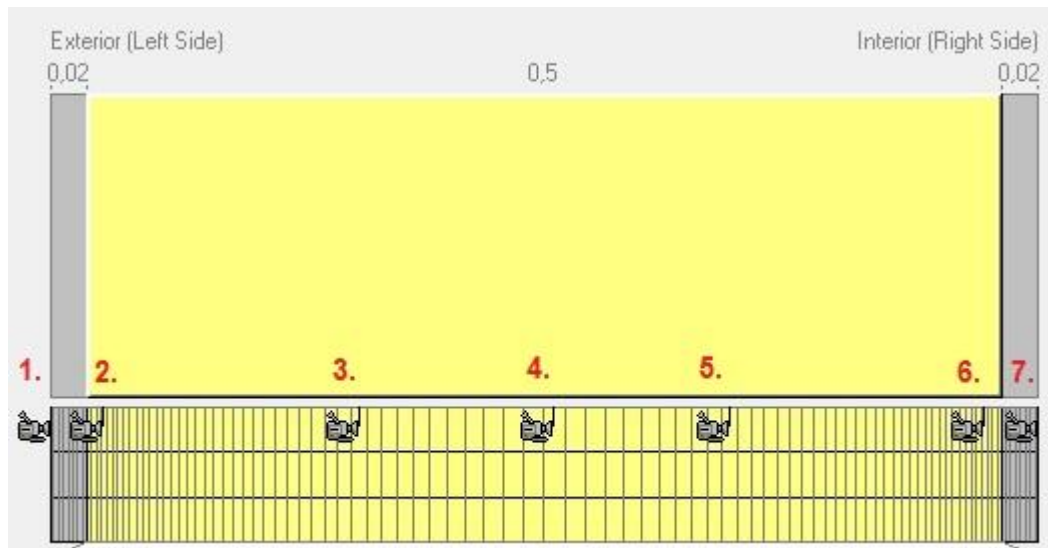
Taulukko 8. WUFI -mallinnuksessa käytetyt tiedot.

| | |
|--|--|
| Sijainti | Jyväskylä |
| Rakenteen suunta | Kaakko (suurin viistosade) |
| kallistuskulma | 90° |
| Rakennekorkeus ja sateen kerroin | alle 10 m, $R_1=0$, $R_2=0,07$ m/s |
| Aika-askel | 1h |
| Ulkopinnan lämmönvastus | $0,0588\text{ m}^2\text{K/W}$ |
| Ulkopinnan sd-arvo | 0 (ei pinnoitetta) |
| Lyhytaaltainen absorptiokerroin | 0,4 (stucco, normal bright) |
| Pitkäaaltoisen säteilyn emissiokerroin | 0,9 |
| Sateen absorptiokerroin | 0,7 (kallistuskulman ja rakennetyypin mukaan) |
| Sisäpinnan lämmönvastus | $0,125\text{ m}^2\text{K/W}$ |
| Sisäpinnan Sd-arvo | 0 (ei pinnoitetta) |
| Alkutilanteen suhteellinen kosteus | Vakio, RH % = 80 ja alkulämpötila $20\text{ }^\circ\text{C}$ |
| Ulkoilmasto | Jyväskylän säätietojen mukaan |
| Sisäilmasto | EN 13788 mukaan |

6.4 Tarkastelupisteet

Mallinnuksen tarkastelupisteet sijoitettiin useaan paikkaan, jotta kosteusolosuhteita voitaisiin arvioida riittävän laajasti ja rakenteen eri osien välillä voitaisiin

suorittaa vertailua. Kuvassa 13 on esitetty tarkastelupisteet ”videokameroilla” seinärakenteen poikkileikkauksessa. Tarkastelupisteet sijoitettiin rakenteen ulko- ja sisäpintoihin (1 ja 7), hamppu-kalkkikomposiitin ulko-, keski- ja sisäosaan (2, 4 ja 6) sekä seinän keskellä oletetusti olevan puurungon ulko- ja sisäpintoihin (4 ja 5). Seinän keskellä olevan puurungon on oletettu olevan 200 mm paksu. Tarkastelupiste 2 sijoitettiin 10 mm:n päähän hamppu-kalkkikomposiitin ulkopinnasta, koska kosteusrasituksen arveltiin olevan suurin tällä kohdalla. Tarkastelupiste 6 sijoitettiin vastaavasti 10 mm hamppu-kalkkikomposiitin sisäpinnasta. Tarkastelupisteet sijoitettiin WUFI:n monitorointipisteiden taulukon sallimissa rajoissa.



Kuva 13. Tarkastelupisteiden sijainnit rakenteen poikkileikkauksessa

Taulukko 9. Tarkastelupisteiden etäisyydet ulkopinnasta

| Tarkastelupiste | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Etäisyys ulkopinnasta (m) | 0,0000 | 0,0294 | 0,1687 | 0,2757 | 0,3713 | 0,5106 | 0,5400 |

6.5 WUFI-mallinnuksen tulokset

6.5.1 Kosteussisältö

Liitteessä 3 on kuvattu seinärakenteen kosteussisältöä ajan suhteen. Alkutilanteen suhteellinen kosteus oli asetettu 80 %, mikä on huomattavissa tarkasteluajan alussa esiintyvänä korkeamana kosteussisältönä. Todellisessa tilanteessa seinärakenteessa olisikin aluksi korkeampi kosteuspitoisuus, johtuen valun jälkeen rakenteeseen jääneestä kosteudesta. Koko seinärakenteen ja pelkän hampuu-kalkkikomposiitin kosteussisältö laskee ensimmäisenä vuotena rajusti, koska ylimääräinen kosteus poistuu ja rakenne alkaa saavuttaa kosteudellista tasapainotilaa ja elämään ulkoisten kosteusolosuhteiden mukaan. Tästä johtuen vuosien 2015 ja 2016 kosteussisällön huiput eivät enää eroa suuresti toisistaan. Kosteussisällön kuvaajista voidaan huomata, että seinä sitoo kosteutta syksyllä, kuivuu keväällä ja on kuivimmillaan kesäaikana. Hampuu-kalkkikomposiitin ja koko seinärakenteen kosteussisällössä on huomattavissa eroja. Koko seinärakenteen kosteussisällön vaihtelu on huomattavasti suurempi kuin pelkässä hampuu-kalkkikomposiitissa, johtuen siitä, että rappauspinnat ovat suorassa vaikutuksessa ilmaan ja varsinkin ulkopinta sateen aiheuttamaan kosteusrasitukseen.

6.5.2 Kosteuden ja lämmön jakautuminen sekä siirtyminen rakenteessa

Liitteessä 4 näkyy kylmimmän (15. helmikuuta 2014 klo. 6:00 ja 15. helmikuuta 2016 klo. 6:00) ja kuumimman ajan (23. kesäkuuta 2014 klo.12:00 ja 23. kesäkuuta 2016 klo.12:00) kosteuden ja lämmön siirtyminen seinärakenteessa, sekä suhteellinen kosteus ja lämpötila rakenteen eri kohdissa. Näistä voidaan nähdä mihin suuntaan lämpö johtuu ja mihin suuntaan kosteus siirtyy rakenteen eri kerroksissa. Hetkellisiä kuvaajia sekä filmiä kokonaisuudessaan tarkasteltaes-

sa on huomattavissa, että kosteus seinärakenteesta siirtyy sisälle päin kylminä vuodenaikoina ja lämpiminä vuodenaikoina kosteus siirtyy ulospäin. Sisäilmayhdistyksen mukaan suhteellisen kosteuden suositusarvo on talvella 25 – 45 %. (Sisäilmayhdistys 2008) Kylmänä aikana sisäilman kosteus on yleensä matala, joten terveellisen sisäilman kannalta on hyvä, että rakenne ei kuivata sisäilmaa entisestään. Kesällä suhteellisen kosteuden tulisi pysyä mikrobikasvuston kannalta alle 80 %, joten on hyvä että rakenne kuivuu ulospäin, eikä kasvata sisäilman suhteellista kosteutta. (Rakennusfysiikka 2009) Filmiä tarkasteltaessa voidaan huomata sisäilman pysyvän näissä rajoissa sekä kylmänä, että kuumana aikana suurimman osan ajasta, lukuun ottamatta hetkellisiä huippuja.

6.5.3 Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelu rakenteen eri syvyyksissä

Liitteessä 5 näkyy seinän lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot ajan suhteen tarkastelupisteissä 2 - 6. Tarkasteltaessa pistettä 2, joka on lähellä ulkopintaa, voidaan havaita suurta vaihtelua lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa (lämpötila noin -30 - 30 °C, 45 - 96 % RH), johtuen ulkoilman olosuhteiden vaikutuksesta ja sateen aiheuttamasta kosteusrasituksesta. Verrattaessa tarkastelupisteisiin, jotka sijaitsevat keskemällä rakennetta, voidaan ulko- ja keskiosan välillä huomata suuri ero lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelussa. Pisteessä 2 olosuhteet ovat ajoittain homekasvulle ominaiset. Homekasvun alkamiseen vaaditaan kuitenkin riittävän pitkä aika sille suotuisissa olosuhteissa.

Tarkastelupisteessä 3, missä oletettu puurungon ulkopinta sijaitsee on havaittavissa, että suhteellinen kosteus ja lämpötila pysyy huomattavasti tasaisempina kuin tarkastelupisteessä 2. Ensimmäisen vuoden keväänä suhteellinen kosteus on korkeampi johtuen alkukosteudesta ja homeen kasvulle otollisimmat olosuhteet ovat juuri tänä ajankohtana. Tätä seuraavina keväinä

suhteellinen kosteus pysyy niin matalana, että olosuhteet eivät ole homekasvuston syntymiselle niin suotuisat.

Tarkasteltaessa seinärakenteen keskellä olevaa pistettä 4, on huomattavissa massiivirakenteille ominainen kyky pitää lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut pienenä, varsinkin alun ylimääräiseen rakennekosteuden poistuttua (lämpötila noin $-1 - 22$ °C, 55 - 65 % RH). Myöskään eri vuodenaikojen välillä ei tarkastelupisteessä 4 ole suurta vaihtelua havaittavissa. Tarkastelupisteissä 4, 5 ja 6 ei suhteellisen kosteuden käyristä ole havaittavissa homekasvuston alkamiselle suotuisia olosuhteita (RH < 80 %).

Liitteessä 6 on kuvattu lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jakauma koko tarkasteluaikana hamppu-kalkkikomposiitin eri tarkastelupisteissä. Kuvaajien pisteet esittävät valitun aika-askeleen (1h) välein suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoja rakenteessa. Näitä tarkasteltaessa voidaan selvittää kuinka pitkän ajan tietyt olosuhteet pysyvät rakenteessa. Tarkasteluvälin alkutilanteen pisteet on kuvattu keltaisella värillä ja pisteet muuttuvat sitä tummemmaksi mitä pidemmälle ajassa edetään.

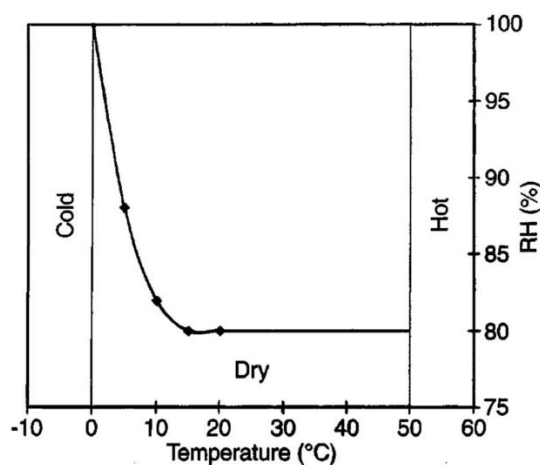
7 Homehtuvuus

Hometutkimusten tarkoituksena oli verrata hamppu-kalkkikomposiitin homehtumista muihin tavanomaisiin rakennusmateriaaleihin homeelle otollisissa olosuhteissa ja analysoida kalkin vaikutusta homeen kasvuun. Vertailun avulla oli mahdollista arvioida hamppu-kalkkikomposiitin homehtumisherkkyyksiluokkaa perustuen VTT:n kehittämään homeen laskennalliseen malliin puun pinnassa ja pinnan visuaalisen ilmeen perusteella määritellyyn homeindeksiin. Homeindeksiä käytettiin apuna tarkasteltaessa homekasvun riskiä hamppu-kalkkiseinärakenteessa WUFI:sta saatujen tietojen perusteella. Homeen kasvun laskentamallia käytettiin tarkasteltaessa riittääkö homeelle otolliset olosuhteet ajallisesti homekasvun alkamiseen.

7.1 Homeen kasvu

Home tarvitsee kasvaakseen yhtä aikaa lämpöä, happea, orgaanista ainetta sekä kosteutta (Rakennusfysiikka, 2009). Homeen kasvun alkamiseen vaikuttaa eniten materiaalin kosteus. Kasvun alkaminen edellyttää, että materiaalissa on itiöitä tai pieni määrä vanhaa kasvustoa. Homeelle kelpaa energianlähteeksi lähes kaikki eloperäinen materiaali. Jopa betonin, kevytsoraharkon, tiilen ja rakennuslevyjen pinnalle voi muodostua homekasvustoa, jos materiaalin pinnalla on pölyä tai muuta likaa. Rakenteiden home- ja lahovaurioihin johtaa pitkäaikainen kosteusrasitus, joka ylittää materiaalin tai rakenteen kosteudensietokyvyn. (Sisäilmayhdistys 2008)

Homesienet kasvavat laajalla pH-alueella 1.4 ja 10 välillä, optimialueen ollessa 4 ja 7 välillä. Vaikka homeet viihtyvät paremmin happamissa olosuhteissa on homeen kasvu mahdollista myös korkean emäksisyyden omaavien materiaalien, kuten betonin pinnalla. Vaikka betonin pH arvot ovat 12 ja 14 välillä, voi homeen kasvua tapahtua pinnoilla olevassa pölyssä tai muussa orgaanisessa materiaalissa. Homeen kasvulle suotuisat kosteusolot riippuvat vallitsevasta lämpötilasta. Homesienet kasvavat laajalla 0-50 °C lämpötilassa ja vaativat kasvaakseen vähintään 80% suhteellisen kosteuden. Alle 20 °C lämpötila vaatii korkeamman suhteellisen kosteuden. Kuviossa 8 on esitetty homeen kasvun vaatimat lämpötila- ja kosteusolosuhteet.

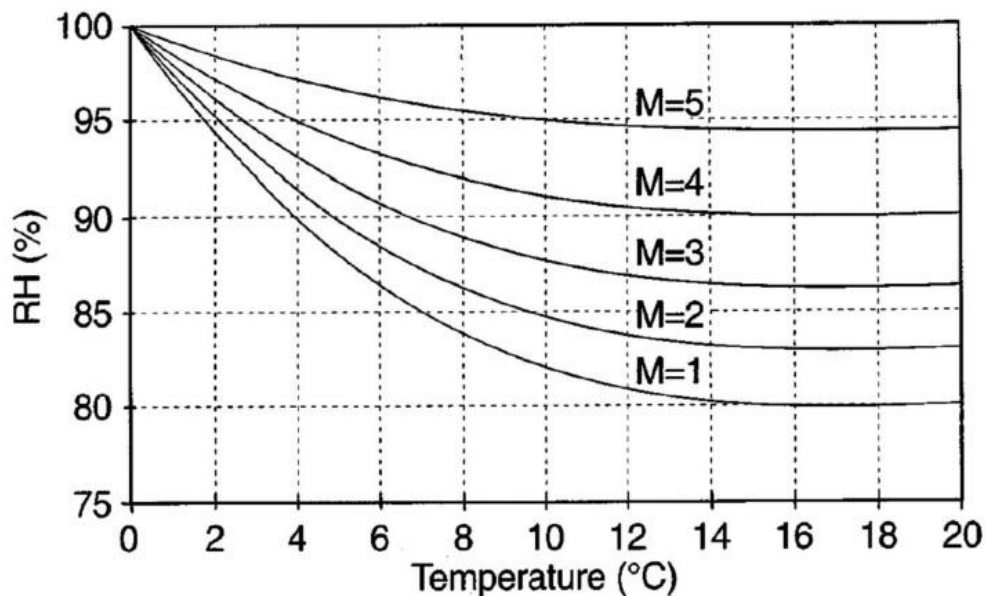


Kuvio 8. Homeen kasvulle suotuisat lämpötila- ja kasvuolosuhteet. (Rakennusfysiikka 2009, 220)

Homekasvun laskennallinen tarkastelu perustuu homeindeksiluokitukseen (M = 0-6), jonka mukaan homehtuminen alkaa, kun saavutetaan homehtumisaste 1. Homeindeksi ottaa huomioon myös kasvun lisääntymisen asteen (2-6), mutta tässä tutkimuksessa keskityttiin tutkimaan vain homeen kasvun alkamisen mahdollisuutta. Taulukossa 10 on esitetty homeindeksiluokitus 1-6 ja kuviossa 9 homeen kasvun vaatimat olosuhteet homeindeksiluokituksen mukaan.

Taulukko 10. Homeindeksin luokitusperusteet. (Rakennusfysiikka 2009, 220)

| Homeindeksi | Luokitusperusteet |
|-------------|--|
| 0 | Ei kasvua, pinta puhdas |
| 1 | Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma |
| 2 | Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut |
| 3 | Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (itiöitä alkaa muodostua) TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 % |
| 4 | Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10-50 % alasta TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 % |
| 5 | Silmin havaittava runsas kasvu, rihmaston peitto yli 50 %alasta |
| 6 | Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 % |



Kuvio 9. Homeen kasvuille suotuisat kasvuolosuhteet, joilla saavutetaan homeindeksiluokituksen mukaiset maksimiarvot. (Hukka & Viitanen 1999)

Rakennusmateriaalit on jaettu homehtumisherkkyyden perusteella taulukon 11 mukaisiin homehtumisherkkyydsluokkiin. VTT:n kehittämä homeen kasvun laskennallinen malli perustuu vain männyn ja kuusen pintapuun homehtuvuuteen. Homehtumisherkkyydsluokitusta käytettiin pohtiessa hampuu-kalkkikomposiitin homehtuvuutta, sillä sitä voitiin verrata männyn ja kuusen homehtumisherkkyyteen.

Taulukko 11. Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyydsluokat (Mäkitalo 2012)

| Homehtumis-herkkyydsluokka | Rakennusmateriaalit |
|------------------------------|---|
| Hyvin herkkä HHL 1 | karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty |
| Herkkä HHL 2 | höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy |
| Kohtalaisen kestävä HHL 3 | mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet |
| Kestävä HHL 4 | lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit |

7.1 Homeviljely

Koekappaleita pidettiin vuorokausi yli 70 °C:n lämpötilassa, jotta kappaleiden pinnoissa valmiiksi olevat homeet saatiin tuhottua (Evara 2013). Steriloinnin jälkeen koekappaleet laitettiin neljäksi päiväksi Karelia-ammattikorkeakoulun liiketalouden ja tekniikan keskuksen ryömintätilaan, missä homekasvusto oli silminnähtävää. Ryömintätilan lämpötila oli noin 18 °C ja suhteellinen kosteus noin 38 %. Koekappaleet laitettiin ilmanvaihtolaitteen läheisyyteen niin, että koekappaleisiin kulkeutui ilman mukana mahdollisimman paljon homeitiöitä. Itse hometutkimus suoritettiin bakteeriviljelykaapissa (RS biotech galaxy 170), jossa pystyttiin säätämään homeelle suotuisa lämpötila ja suhteellinen kosteus. Kappaleet laitettiin kaappiin 18.2.2014 ja homehtumista seurattiin 28.4.2014 asti. Johtuen bakteerikaapin erityisominaisuudesta, saatiin kaappiin asetettua vain 37 °C lämpötila. Tämä kuitenkin mahdollisti nopeamman homeen kasvun koekappa-

leissa. Kosteus luotiin kaappiin laittamalla kaapin pohjalla olevaan tarjottimeen 0,5 l vettä ja 10 ml kuparisulfaattia. Toimenpiteellä luotiin kaappiin 95 % suhteellinen kosteus. Kyseiset toimenpiteet perustuivat bakteerikaapin omiin käyttöohjeisiin. Homehtumisen kehittymistä tarkasteltiin visuaalisen ilmeen perusteella ja hampuu-kalkkikomposiitin homehtuvuusherkkyttä pohdittiin vertailemalla sen homehtuvuutta tunnettuihin materiaaleihin.

7.1.2 Koekappaleet

Hometutkimukset suoritettiin seoksille A, B, F ja M (taulukot 1 ja 2). Seos A oli pelkkää sammutettua kalkkia sidosaineena sisältänyt seos 3:1 päistäre-sidosainesuhteella ja seos B oli tiilimurskaa sammutetun kalkin lisänä sisältänyt seos 3,2:1 päistäre-sidosainesuhteella. Seos M sisälsi savea sammutetun kalkin lisäksi ja sen päistäre-sidosainesuhde oli 3,5:1. Seoksesta M valmistetun koekappaleen päällimmäisessä pinnassa oli yksikerroksinen kalkkiahiekkarappaus ja muut pinnat olivat rappaamattomia. Mukaan otettiin myös seoksesta F valmistettu koekappale, joka sisälsi sammutetun kalkin lisänä luonnon hydraulista kalkkia ja sen päistäre-sidosainesuhde oli 4:1. Vertailemalla pienen ja suuren päistäre-sidosainesuhteen omaavien kappaleiden homehtumista pyrittiin arvioimaan kalkin vaikutusta hampuu-kalkkikomposiitin homehtumiseen. Kalkin vaikutusta puupinnan homehtumiseen tarkasteltiin ottamalla koekappaleeksi M-seoksen valumuotin tukipuuna toiminut kuusesta tehty kertopuu, jonka lapheet olivat kalkin peitossa ja syrjät kalkitonta puupintaa.

Vertailumateriaaleina olivat selluvilla (Ekovilla), mineraalivilla (Isover), käsittelemätön hampun päistäre, hampukuitu sekä sahattu mänty ja kuusi. Koekappaleet olivat vaihtelevan kokoisia. Sahattu mänty ja kuusi kuuluvat VTT:n home-riskimallissa homehtumisherkkyysluokkaan 1 ja mineraalivilla homehtumisherkkyysluokkaan 3.

7.1.3 Homeviljelyn tulokset

Homeviljelyssä huomattiin selkeä ero eri materiaalien välillä. Homeindeksiluokituksen 3 mukaista silminnähtävää homekasvustoa oli havaittavissa kuukauden jälkeen homeviljelyn aloittamisesta puukappaleiden pinnalla ja hampun päistäreissä sekä kuiduissa. Tämän jälkeen homekasvusto lisääntyi tasaisesti tarkastelujakson loppuun asti.

Tarkastelujakson lopussa männyn ja kuusen pinnasta oli yli 50 % homerihmaston peitossa, joten ne olivat saavuttaneet homeindeksiluokituksen 5. Männyn pintapuussa oli myös nähtävissä homekasvustoa rihmaston lisäksi. Käsittelemättömät hampun kuidut ja päistäreet (kuva 14) olivat kauttaaltaan rihmaston peitossa tarkastelujakson lopussa ja saavuttaneet homeindeksin 5.



Kuva 14. Hampun päistäreet tarkastelujakson lopussa



Kuva 15. Männyn pintapuu tarkastelujakson lopussa

Mineraalivillassa, selluvillassa ja hamppu-kalkkikappaleissa A, B ja M ei tarkastelujakson loppuun mennessä havaittu silminnähtävää homekasvustoa. Näiden homeindeksiluokitus jäi alle kahden. Koekappaleessa F (päistäresidosainesuhde 4:1) oli tarkastelujakson lopussa havaittavissa homeen kasvua kohdissa joissa päistäreet eivät olleet täysin kalkin peitossa (kuva 16). Koekappale F saavutti homeindeksiluokituksen 3 tarkastelujakson loppuun mennessä.



Kuva 16. Koekappaleessa F havaittu homekasvu tarkastelujakson lopussa

Eniten huomiota herätti kertopuukappale, jonka paljaat puupinnat olivat kauttaaltaan homeen peitossa, kun taas kalkkia sisältäneellä pinnalla ei havaittu silminnähtävää homekasvustoa tarkastelujakson loppuun mennessä. Viljelyssä huomattiin kalkin vaikuttavan selkeästi homeen kasvuun. Kalkin korkea emäksisyys, >10 pH (National Lime Association 2014), luo huonot kasvuolosuhteet homeelle, sen kasvussa mieluummin happamissa olosuhteissa.

Korkeamman sidosainesuhteen omaavat kappaleet A, b ja M havaittiin homehtuvan tarkasteluaikana lähes yhtä heikosti kuin mineraalivilla ja selluvilla, joista mineraalivillan tiedetään kuuluvan homehtumisherkkyydenluokkaan 3.

Vertailtaessa 3-3,5:1 päistäre-sidosainesuhteella olevan hamppu-kalkki-komposiitin homehtuvuutta muihin kappeleisiin, voidaan sen olettaa kuuluvan homehtumisherkkyysluokkaan 3, johon kuuluvat myös mineraalivilla ja sementtipohjaiset tuotteet. Kalkin määrän havaittiin vaikuttavan selkeästi homehtuvuuteen ja sillä pystytään vaikuttamaan hamppu-kalkkikomposiitin homehtumisherkkyteen. Hamppu-kalkkikomposiitin homehtumisherkkyysluokitusta arvioitaessa tulisi ottaa huomioon päistäre-sidosainesuhde, sillä materiaalin homehtumisherkkyysluokka on siitä riippuvainen.

7.6 Homehtumisen mahdollisuus seinärakenteessa

Rakenteen homehtuvuutta tarkasteltiin käyttämällä WUFI:sta saatuja lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja VTT:n männyn ja kuusen pintapuulle kehittämässä homeen kasvun laskentamallissa (Hukka & Viitanen 1999). Hamppu-kalkkikomposiitin oletettiin olevan laskennassa homehtumisherkkyysluokaltaan sama kuin sahattu mänty tai kuusi, vaikka homeviljelyn mukaan hamppu-kalkkikomposiitin homeensietokyky on huomattavasti parempi. Laskentamallin avulla pystyttiin muodostamaan homeen kasvun mahdollistavan suhteellisen kosteuden kriittinen rajakäyrä. Laskennan avulla pyrittiin selvittämään riittääkö homeelle suotuisat olosuhteet ajallisesti homekasvun alkamiseen hamppu-kalkkikomposiitissa tai sen sisällä olevassa puurungossa.

Homehtuvuutta tutkittiin tarkastelupisteissä 2 ja 3, koska kosteusrasituksen huomattiin olevan suurempi lähempänä rakenteen ulkopintaa. Liitteen 3 kuvista huomattiin, että pisteissä 4, 5 ja 6 ei ollut homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Kalkkirappauksen homehtuvuutta ei tarkasteltu tässä tutkimuksessa. Tarkastelupiste 2 otettiin tarkasteluun, sillä orgaanista ainesta sisältävän rakenneosan suurin kosteusrasitus oli tällä kohdalla. Pistettä 3 tutkimalla tarkasteltiin oletetun puurungon homehtumismahdollisuutta.

7.6.1 Homeen kasvun alkamisen laskennallinen tarkastelu

Johtuen homeen kasvun vaatimista olosuhteista ($RH \geq 80 \%$, $0^\circ\text{C} < T < 50^\circ\text{C}$), voidaan suhteellisen kosteuden kriittistä rajakäyrää VTT:n laskentamallin mukaan kuvata yhtälöllä 6 (Hukka & Viitanen 1999):

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,16T^2 - 3,13T + 100, & \text{kun } 0^\circ\text{C} < T \leq 20^\circ\text{C} \\ 80 \%, & \text{kun } T > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

missä

T on lämpötila ($^\circ\text{C}$)

RH_{min} on suhteellisen kosteuden minimiarvo (%), joka vaaditaan homekasvun alkamiseen.

Puupinnalla homekasvun alkamiseen tarvittava aikaa vakio-olosuhteissa, t_m , kuvataan homemallissa regressiomallilla (Hukka & Viitanen 1999):

$$t_m = \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln RH + 0,14W - 0,3SQ + 66,02) \quad (8)$$

missä

t_m on homekasvun alkamiseen tarvittava aika viikkoina

T on ($^\circ\text{C}$)

RH on suhteellinen kosteus (%)

W lämpötila on puulaji (0 = mänty, 1 = kuusi)

SQ on pinnan ravinteikkuus (0 = kuivauksen jälkeen uudelleen sahattu pinta, 1 = alkuperäinen kuivaamosta suoraan tullut pinta)

Malleihin valittiin puulajiksi mänty ja pinnan ravinteikkuuskertoimeksi 1, jotta saataisiin aikaan pahin tilanne. Liitteestä 4 saadut tarkkailupisteet 2 ja 3

suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot tuotiin taulukkolaskentaan sopivaan muotoon aikajärjestyksessä tunnin välein mitattuna. Näistä etsittiin pisimmät ajankohdat jolloin suhteellinen kosteus ylitti yhtäjaksoisesti kriittisen suhteellisen kosteuden arvot . Kyseisiltä ajankohdilta laskettiin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan keskiarvot, joiden avulla saatiin homeen kasvun alkamiseen tarvittava aika t_m . Homeen kasvuun tarvittavaa aikaa verrattiin aikaan joilloin suhteellinen kosteus oli yhtäjaksoisesti yli kriittisen suhteellisen kosteuden. Liitteessä 8 on näytetty WUFI:sta saadut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot sekä kriittisen suhteellisen kosteuden käyrä

7.6.2 Laskennan tulokset

Kuten liitteestä 7 huomataan, suhteellisen kosteuden arvot käyvät ajoittain kriittisen suhteellisen kosteuden yläpuolella. Vaikka suhteellisen kosteuden arvot ovat useinkin kriittisen rajan yläpuolella, eivät ne pysy sen yläpuolella yhtäjaksoisesti kovin pitkiä aikoja. Tarkastelupisteen 2 pisin yhtäjaksoinen kriittisen suhteellisen kosteuden ylittävä ajanjakso kesti 175 tuntia eli 1,04 viikkoa ja tämä sijoittui ajankohdalle 23.7-15.8.2014. Tänä ajankohtana suhteellisen kosteuden keskiarvo oli 84,3 % ja lämpötilan keskiarvo oli 16,39 °C. Näillä arvoilla laskettuna homeen kasvun alkamiseen tarvittavaksi ajaksi, t_m , saatiin 8,85 viikkoa. Kriittisen suhteellisen kosteuden ylittävä ajanjakso ei näissä keskiarvo-olosuhteissa riittäisi homeen kasvun alkamiseen.

Liitteestä 7 voidaan huomata, että tarkastelupisteessä 3 kaikki kriittisen rajakäyrän ylittävät arvot ovat peräkkäisiä ja sijoittuvat ajankohdalle 23.4-5.6.2014 johtuen rakenteen korkeasta alkukosteudesta. Kyseinen ajanjakso kesti 1062 tuntia eli 6,32 viikkoa. Tänä ajankohtana suhteellisen kosteuden keskiarvo oli 82,72 % ja lämpötilan keskiarvo oli 14,34 °C. Näillä arvoilla laskettuna homeen kasvun alkamiseen tarvittavaksi ajaksi, t_m , saatiin 12,61 viikkoa. Kriittisen suhteellisen kosteuden ylittävä ajanjakso ei näissä keskiarvo-olosuhteissa riittäisi homeen kasvun alkamiseen.

8 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia hamppu-kalkkikomposiitin raaka-aineita ja pohtia sen käyttöä rakentamisessa ja toimivuutta Suomen ilmasto-olosuhteissa. Tavoitteena oli kehittää seos Suomesta saatavista raaka-aineista ja tutkia fysikaalisia ominaisuuksia sekä homeriskin mahdollisuutta seinärakenteena.

8.1 Valmistus Suomalaisista raaka-aineista

Hampun käyttö rakennusmateriaalina Suomessa olisi kannattavaa sen taloudellisuuden, ekologisuuden ja terveellisyyden kannalta. Maataloustuettuna viljelyskasvina sen käyttö olisi tehokasta, kun sen kuiduntuotannon sivutuotteena pidetty päistäre voitaisiin hyödyntää rakennusteollisuudessa. Viljelyskasvina hamppu on erittäin ekologinen sen sitoessa runsaasti hiilidioksidia ja parantaessa maaperää. Hampun viljelyksessä ei tarvitse käyttää torjunta-aineita rikkaruohoja tai tuholaisia vastaan, jolloin ympäristön kuormitus jää vähemmälle. Koska hamppua voidaan viljellä koko Suomen alueella, olisi sen lähituotanto mahdollista. Myös kalkin käyttö sidosaineena olisi kannattavaa. Kalkin tuottaminen on rakennusaineena yleisesti käytettyä sementtiä ympäristöystävällisempää, sillä sen tuottaminen ei vaadi niin paljon energiaa. Kalkki on huomattu historian saatossa erittäin toimivaksi rakennusmateriaaliksi, jonka tehokkaampi käyttö rakennusteollisuudessa olisi suotavaa sen hyvien kosteusteknisten ominaisuuksien takia.

Eri seosvaihtoehtoja tutkiessa huomattiin, että hamppu-kalkkikomposiittia voidaan tuottaa helposti Suomesta saatavista raaka-aineista. Vaikka Suomesta ei saa hamppu-kalkkikomposiitissa yleisesti käytettyä luonnon hydraulista kalkkia, olisi toimivan seoksen valmistaminen suomalaisilla raaka-aineilla mahdollista. Luonnon hydraulisen kalkin ei huomattu vaikuttavan merkittävästi seoksen työstettävyyteen, kuivumisaikaan eikä valmiin lopputuotteen

koostumukseen. Hydraulisen ominaisuuden aikaansaaminen nykyisillä tiilimurskeilla on hankalaa. Hydraulisuus ei kuitenkaan ole välttämätön toimivan lopputuotteen aikaansaamiseksi. Hydraulisen ominaisuuden merkitystä hamppu-kalkkikomposiitissa vaatii kuitenkin lisätutkimusta.

Hamppu-kalkkikomposiitin työstämisen huomattiin olevan helppoa, eikä toimivan lopputuotteen tekeminen vaadi juurikaan ammattitaitoa ja kokemusta, vaan materiaalin tuottaminen onnistuisi myös muilta kuin rakennusalan ammattilaisilta. Pieni rakennusvirheen riski on rakenteen turvallisen toimivuuden ja pitkäikäisyyden kannalta eduksi, sillä usein ongelmat rakenteissa johtuvat rakennusvirheestä. Seoksia vertailtaessa huomattiin, että eri sidos- ja lisäaineilla voitiin vaikuttaa hamppu-kalkkikomposiitin ominaisuuksiin ja sopivan seoksen tuottaminen eri käyttökohteisiin on helppoa. Kaikilla seoksissa käytetyillä sidosaineilla saatiin aikaiseksi hyvin koossapysyviä kappaleita. Suomen maaperästä hyvin yleisesti saatavalla savella pystyttiin korvaamaan sidosaineena toimivaa sammutettua kalkkia. Tämä laskisi rakenteen hiilijalanjälkeä ja kustannuksia. Savea sammutetun kalkin lisänä sisältäneelle M-seokselle tehdyt palo-, lämmönjohtavuus- ja vesihöyrynläpäisevyyskokeet todistavat seoksen vastaavan ominaisuuksiltaan Euroopan markkinoilla jo olevia hamppu-kalkkituotteita.

8.2 Kosteustekninen käyttäytyminen

Vesihöyrynläpäisevyys- ja lämmönjohtavuuskokeiden pohjalta suoritettiin WUFI-mallinnukset 540 mm paksulle molemmiin puolin kalkkirapatulle seinärakenteelle. Rakenne olisi voitu toteuttaa myös sateelta suojaavalla ulkoverhouksella, mutta tutkimuksessa haluttiin selvittää mahdollisimman yksinkertaisen rakenteen toimivuutta. Mallinnusten perusteella kartoitettiin rakenteen kosteusteknistä toimintaa ja suoritettiin laskennallista tarkastelua homeriskin mahdollisuudesta. Mallinnuksen pohjalta voidaan todeta rakenteen toimivan Suomen ilmastossa pientalon seinärakenteena. Tutkimuksemme

perusteella hamppu-kalkkikomposiitti on terveellinen ja turvallinen rakennusmateriaali pientalon seinärakenteena sen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Seinärakenne piti mallinnuksen mukaan sisäilman suhteellisen kosteuden asumusviihtyvyyden kannalta terveellisissä lukemissa.

WUFI-mallinnusten perusteella kosteus siirtyi seinärakenteessa kesän kosteana aikana ulospäin ja talven kylmänä aikana sisälle päin. Tämä ominaisuus olisi suureksi eduksi rakenteen turvallisen kosteusteknisen toiminnan ja sisäilman terveellisyyden kannalta. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että kyseessä on vain tietokonemallinnus joka ei koskaan vastaa täydellisesti todellista tilannetta. Sisäilman kosteuslisän vaikutuksesta pitäisi sisäilman keskimääräisesti olla kosteampaa kuin ulkoilman. Diffuusiassa vesihöyryn osapaine-ero pyrkii tasoittumaan kohti pienempää vesihöyryn osapainetta eli kosteus siirtyy aina kohti kuivempaa ilmaa. Tästä johtuen kosteuden siirtymistä kuivana ja kylmänä aikana tulisi tutkia käytännön menetelmin, jotta voitaisiin olla varmoja kosteuden siirtymisestä hamppu-kalkkiseinässä. Mallinnoista havaittiin myös, että seinärakenteen keskellä suhteellinen kosteus pysyy ensimmäisen vuoden jälkeen koko ajan hyvin tasaisena vaihdellen välillä 60 - 65 % RH. Kantavana rakenteena toimivan puurungon kannalta tämä on hyvä, koska homeelle suotuisia korkean suhteellisen kosteuden olosuhteita ei pääse syntymään.

8.3 Homehtuminen

Mallinnusten perusteella oli seinärakenteen pitkäaikaisin korkean suhteellisen kosteuden kausi ensimmäisen vuoden keväänä johtuen valun jälkeisestä rakennekosteudesta. Tämä korkean suhteellisen kosteuden kausi ei kuitenkaan laskennallisesti tarkasteltuna riitä homeenkasvun alkamiseen seinärakenteessa. Homeviljelystä tehtyjen havaintojen perusteella voidaan sanoa kalkilla olevan suuri vaikutus materiaalin homehtuvuuteen. Kalkin korkea emäksisyys luo selkeästi huonot olosuhteet homekasvustolle.

Laskennallisesta tarkastelusta on huomioitava, että se suoritettiin männyn käsittelemättömälle pintapuulle. Hamppu-kalkkikomposiitin sisällä oleva puurunko olisi todellisuudessa kauttaaltaan kalkin peitossa, eikä tilanne olisi niin paha kuin laskennallisessa tarkastelussa on esitetty. Homeviljelyn tuloksien ja hamppu-kalkkikomposiitin emäksisyyden perusteella voidaan olettaa hamppu-kalkkirakenteen homehtumisen olevan vielä epätodennäköisempää. Täytyy kuitenkin huomioida, että WUFI-mallinnuksessa otettiin huomioon vain pientalon seinään tulevat sadekuormat, joten korkeammille rakennuksille (yli 10m) tarvittaisiin lisäselvitystä kosteusteknisestä käyttäytymisestä ja homehtumisen mahdollisuudesta.

Vaikka homeviljelyksen ja mallinnusten perusteella voidaan todeta hamppu-kalkkikomposiitin olevan kosteusteknisesti turvallinen seinärakenne pientalossa, vaatii tämä vielä käytännön tutkimuksia. Laboratoriokokeet ja WUFI-mallinnus eivät ota kaikkia mahdollisia vaikuttavia tekijöitä huomioon ja käytännössä rakenne voi toimia eri tavalla. Tärkeää olisi saada tutkimustemme rinnalle käytännössä saatuja tutkimustuloksia, joita voitaisiin verrata mallinnuksen tuloksiin ja olla varmoja kyseisen rakenteen toimivuudesta.

9 Pohdinta

Hamppu-kalkkikomposiitin tutkiminen rakennusmateriaalina osoittautui haastavaksi. Tutkimustietoa aiheesta on yleisesti niukasti saatavilla ja Suomessa aiheeseen ei ole perehdytty juuri ollenkaan. Suuri osa hamppu-kalkkikomposiitista tehdyistä tutkimuksista on kirjoitettu ranskaksi, joten tutkimusten ymmärtäminen vaatisi ranskan kielen osaamista.

Hampulla on tutkimuskohteena huono maine johtuen sen yhteydestä marijuaanin, joka luokitellaan huumausaineeksi. Vaikka useat tutkimukset todistavat hampun olevan erinomainen viljelyskasvi, on ihmisillä suuria ennakkoluuloja sitä kohtaan, eikä aiheeseen tahdota perehtyä. Hampusta löytyvän tiedon totuudellisuudesta ei aina pystytä olemaan täysin varmoja, sillä hampua puolustavat ja

vastustavat tahot ajavat asiaa usein vain oman näkemyksen kannalta ja kriittisyys voi jäädä taka-alalle. Myös kalkista rakennusmateriaalina on vaikea löytää tietoa nykyisin, sillä siihen liittyvä tietämys alkaa olla kadonnut rakennuskulttuuristamme, eikä uusia tutkimuksia aiheesta ole juuri tehty. Kalkkia rakennusmateriaalina ei myöskään ole käsitelty opinnoissamme ja asiantuntevia henkilöitä on nykyisin harvassa. Mielestämme onnistuimme kuitenkin löytämään tutkimuksemme riittävästi perustietoa hamppu-kalkkikomposiitin raaka-aineista, niiden saatavuudesta ja soveltuvuudesta.

Hamppu-kalkkikomposiitin fysikaalisten ominaisuuksien tutkiminen ja kokeiden tekeminen koulullamme oli hankalaa, koska tarvittavia tutkimuslaitteita ei ollut. Osa kokeista jouduttiin suorittamaan itse tehdyillä tutkimuslaitteilla, jolloin tuloksia ei voitu vertailla samoilla menetelmillä tehtyjen kokeiden tuloksiin, eikä niiden oikeellisuudesta voida olla varmoja. Fysikaalisten ominaisuuksien tutkimustuloksia verrattiin kuitenkin muilla menetelmillä tehtyjen kokeiden tuloksiin, jotka vastasivat omia tuloksiamme hyvin. Virallisten tutkimustulosten saamiseksi on selvää, että kaikki kokeet pitäisi suorittaa standardien mukaisilla kokeilla. Resurssien puutteesta johtuen emme voineet suorittaa standardien mukaisia kokeita fysikaalisille ominaisuuksille.

Hamppu-kalkkikomposiitin kosteusteknistä toimintaa tutkittiin WUFI Pro 5.1 ohjelmalla. Vaikka ohjelmaan voidaan sijoittaa paljon tietoa materiaalien ominaisuuksista, ei lähtötietojen vaikutuksesta tuloksiin voida olla varmoja. Vertailtaessa kahden eri tiheydellä ja lämmönjohtavuudella mallinnetun hamppu-kalkkiseinän kosteusteknistä käyttäytymistä, huomattiin niiden tulosten olevan lähes identtiset. Jos suurelta erot materiaalin lähtötiedoissa eivät vaikuta mallinnuksen lopputulokseen, ei ohjelman luotettavuudesta voida olla täysin varmoja. Tästä johtuen on erittäin tärkeää, että mallinnusten rinnalle saataisiin käytännön kokein saatuja tutkimustuloksia.

Materiaalin homehtuvuutta tarkasteltiin laskennallisesti sekä homeviljelyn avulla. Homeviljelyn suorittamiseen rakennusmateriaaleille tarvitaan yleensä monia kuukausia tai jopa vuosia aikaa. Opinnäytetyön ajallisissa ja laajuudellisissa rajoissa emme pystyneet tekemään laajaa homeviljelytutkimusta. Suorittamamme homeviljelystä saatiin kuitenkin selkeitä tuloksia eri materiaalien homeh-

tuvuudesta, joiden pohjalta voitiin arvioida hamppu-kalkkikomposiitin homehtumisherkkyyttä sekä kalkin vaikutusta materiaalien homehtuvuuteen. Homehtumisen laskennallinen tarkastelu suoritettiin männyn pintapuulle, sillä TTY:n ja VTT:n yhdessä tekemä homeen kasvun laskentamallia muille rakennusmateriaaleille ei ole vielä julkaistu. Laskennallinen tarkastelu pitää siitä huolimatta todennäköisesti paikkansa, sillä männyn pintapuun huomattiin homehtuvan helpommin kuin hamppu-kalkkikomposiitin tai kalkin peitossa olleen puun.

Olisi tärkeää, että hamppu-kalkkikomposiittia tutkittaisiin lisää, jotta sitä voitaisiin hyödyntää rakennusmateriaalina Suomessa. Hamppu-kalkkikomposiitin energiatehokkuutta tulisi ensisijaisesti tutkia käytännön kohteiden avulla, koska massiivirakenteissa laskettu U-arvo ei aina vastaa rakenteen todellista lämpöeristävyttä (TTY 2009). Toivomme opinnäytetyömme toimivan kannustimena rakennusalan ammattilaisille ja opiskelijoille perehtymään lisää hamppu-kalkkikomposiitin käyttöön rakennusmateriaalina, jotta voisimme tulevaisuudessa asua hamppu-kalkkitaloissa myös Suomessa.

Lähteet

- AGA, 2014. AGA:n nestekaasu. [http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/repositorybyalias/agan_nestekaasu/\\$file/AGA%20Propane%20Datasheet%20FI.pdf](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/repositorybyalias/agan_nestekaasu/$file/AGA%20Propane%20Datasheet%20FI.pdf) 16.4.2014.
- Allin, S. 2012. Building with Hemp. Kenmare. Seed Press.
- American Limetechnology. 2014. <http://www.americanlimetechnology.com/clayton-house/> 27.3.2014
- Bruijn, B. 2012. Material Properties and Full-Scale Rain Exposure of Lime-Hemp Concrete Wall: Measurements and Simulations. Alnarp. http://pub.epsilon.slu.se/9007/1/debruijn_p_120829.pdf. 3.2.2014
- Chanvribloc. 2014. Construction. <http://www.chanvribloc.com/Construction/Chanvribloc-construction.php> 27.3.2014
- Elintarviketurvallisuusvirasto. 2013. Yleistä mikrobeista. <http://www.evira.fi/portal/fi/elintarvikkeet/hygieniaosaaminen/tietopaketti/elintarvikkeiden+riski+ja+vaaratekijat/mikrobiologiset+vaaratekijat/yleista+mikrobeista/> 23.4.2014
- Evrard, A & De Herde, A. 2010. Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies Journal of Building Physics.Vol. 34, No. 1. Heinäkuu 2010.
- Hemprefine Oy. 2014. <http://www.hemprefine.fi/> 7.5.2014.
- The Limecrete Company. 2014. Hempcrete factsheet. <http://limecrete.co.uk/hempcrete-factsheet/uk/hempcrete-factsheet/> 16.4.2014
- Hukka, A. & Viitanen, H. 1999. A Mathematical Model of Mould Growth on Wooden Material. Wood Science and Technology, Vol. 33, pp. 475-485.
- Ihalainen, J.K. 1993. Hamppu Suomessa. ISBN 951-96195-9-3. Palladium.
- Konow, T. 2006. Laastit vanhoissa rakenteissa. Helsinki. Suomenlinnan hoitokunta.
- Lawrence, M. Walker, P. & Paine, K. 2012. Porous natural materials. University of Bath. Mike Lawrence luentomateriaali. IHBA hemp building symposium. Yverdon les-Baines. Sveitsi. 16-17.10.2012.
- Lehtiniemi, P. Järvelä, P. Luonnonmateriaalipohjaiset polymeerikomposiitit rakentamis-teollisuudessa. 2/2012. <http://www.miktech.fi/media/getfile.php?file=212>

- Limetechnology. 2008. Unique Thermal Performance of Tradical® Hemcrete®. <http://www.limetech.info/upload/documents/Hemcrete/lan%20Mawdit%20Presentation.pdf> 26.3.2014
- Limetechnology. 2014. Hemclad® Systems. <http://www.limetechnology.co.uk/hemclad.htm> 27.3.2014
- Lucintel. 2011. Opportunities in Natural Fiber Composites. <http://www.lucintel.com/LucintelBrief/PotentialofNaturalfibercomposites-Final.pdf>.
Maaliskuu 2011
- Luokkakallio, J 2011. Kuituhamppu uusiutuva teollisuusraaka-aine. Pro-Agria Etelä-Pohjanmaa. 2011. http://www.hyotyhamppu.fi/images/stories/pdf/KUITUHAMPPU_Loimaa.pdf. 7.2.2014
- Matalaenergiarakenteiden toimivuus: Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja –ohjeisiin, loppuraportti. 2008. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
- Museovirasto. 2014. Tiilen historiaa Suomessa: Kalkki. <http://www.nba.fi/tiili/sanasto/kalkki.htm>. 2.2.2014
- Mäkitalo, M. 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.
- National Lime Association. 2014. Properties of Typical Commercial Lime Products. www.lime.org/documents/lime_basics/lime-physical-chemical.pdf. 13.5.2014
- Neuvo, M. 2014. Hampun päistäreen myyntihinnat. E-mail mikko.neuvo@hemprefine.fi. 7.5.2014.
- Nordkalk. 2013. Kalkkimaali. <http://www.nordkalk.fi/default.asp?viewID=1017>. 1.2.2014
- Nordkalk. 2014. Poltettu ja sammutettu kalkki. <http://www.nordkalk.fi/default.asp?viewID=341>. 1.2.2014
- Norokytö, N. 20120. Hyötyhampun käytön haasteet ja mahdollisuudet Suomessa. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. Kestävä kehitys. Turku. 2010.
- Outinen, J. 2006. Mechanical properties of structural steels at elevated temperatures and after cooling down, Fire and Materials Conference, San Francisco, USA, Proceedings, Interscience Communications Limited, UK, 2006. <http://www.researchgate.net/publication/>

227780727Mechanical_properties_of_structural_steel_at_elevated_temperatures_and_after_cooling_down 17.4.2014

- Pelastustoimi.fi. 2014. Tulipalon vaarallisuus. Ympäristöministeriö / pelastusosasto 2014. <http://www.pelastustoimi.fi/turvatietao/ehkaise-palonsyntyminen/tulipalon-vaarallisuus> 16.4.2014
- Picandet, V., Tronet, P., Lecompte, T. & Baley, C. 2010. Hemp shiv characterization: Particle size, distribution, Water absorption and Bulk compressibility. Darmstadt Conference. http://www.bath.ac.uk/ace/research/cicm/news-and-events/files/BIOMATERIALS_AND_BINDERS_-_Picandet.pdf. 7.5.2014.
- Prade, T., Svensson, F., Andersson, A. & Matson, J.E. 2001. Biomass and energy yield of industrial hemp grown for biogas and solid fuel. Alnarp.
- Puuinfo. 2014. Paloteknisiä ominaisuuksia. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/puu-materiaalina/paloteknisia-ominaisuuksia> 17.4.2014
- RakMk C3. 2010. Rakennusten lämmöneristys, määräykset 2010. Suomen rakentamis-määräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.
- RakMK E1. 2002. Rakennusten paloturvallisuus, Määräykset ja ohjeet 2002. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.
- Ranki, T. 2007. Savirakennukset ja niiden korjaaminen: Vanhojen ja uusien savirakennusten puolesta. Turku. http://www.kolumbus.fi/teuvo.ranki/savirak_ja_korjaaminen.pdf. 2.2.2014
- Ranki, T. 2014. Kevytsavi. <http://saviry.fi/rakentaminen/kevytsavi.html>. 2.2.2014
- Rantanen, K. 2010. Hamppu valmiina palvelukseen. Tiede 8/10.
- Reijula, K. Ahonen, G. Alenius, H. Holopainen, R. Lappalainen S. Palomäki E. Reiman, M. 2012. Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastus-valiokunnan julkaisu 1/2012. Eduskunta. 2012.
- RT 18-10922. 2008. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot.
- Räikkönen Oy. 2014. Tiilitietoa. <http://www.raikkonen.fi/tuotteet/tiilet/tiilitietoa/> 3.1.2014
- Saviyhdistys. 2014. Olkipaalirakentaminen. <http://saviry.fi/rakentaminen/olkipaali.html>. 3.2.2014
- Sisäilmäyhdistys ry. 2008. Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveelliset tilat. <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kosteusvauriot/mikrobit/mikrobikasvun-edellytykset/>

- Thomsen, A.B., Rasmussen, S., Bohn, V., Nielsen, K.V. & Thygesen, A. 2005. Hemp raw materials: The effect of cultivar, growth conditions and pretreatment on the chemical composition of the fibres. Roskilde. http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:88304/datastreams/file_7710921/content. 7.5.2014
- TTY. 2008. Matalaenergiarakenteiden toimivuus. Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti. Tutkimusselostus NRO TRT/1706/2008. Rakennustekniikan laitos. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Turun sanomat. 2005. Luonnonmukaisen rakentamisen suosio kasvaa. 15.5.2005.<http://www.ts.fi/teemat/koti+ja+asuminen/1074044352/Luonnonmukaisen+rakentamisen+suosio+kasvaa>
- Varpiola, J. 2013. Lämmön ja kosteudensiirron simulointi WUFI 5.1 Pro – ohjelmistolla. Karelia Ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opin- näytetyö.
- Wikipedia. 2014. Hamppu. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Hamppu> 1.2.2014



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

RAKENNUSTEKNIIKAN LAITOS
TUTKIMUSSELOSTUS NRO TRT/2287/2014

HAMPPU-KALKKISEOKSEN LÄMMÖNJOHTAVUUDEN MITTAUS

DRAFT

28.3.2014



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

(1/9)

Tutkimusselostus
Nro 2287
28.3.2014**Tutkimusselostus Nro 2287**

9 sivua + 0 liitesivua

| | | |
|---------------------------|---|-------------------------|
| Tilaaja | Karelia-ammattikorkeakoulu Anne Iivonen PL 256 80101 JOENSUU puh. 050-3116314 | |
| Tehtävä | Hamppu-kalkkiseoksen lämmönjohtavuuden mittaus | |
| Tutkimusaika | 15.12.2014 – 28.2.2014 | |
| Tutkija | Marko Kiili, tutkimusapulainen, rak.ins. Tampereen teknillinen yliopisto Rakennustekniikan laitos PL 600 33101 Tampere Puhelinvaihte: (03) 311 511 | |
| Selostuksen jakelu | Karelia-ammattikorkeakoulu TTY/ Rakennustekniikan laitos Tutkija | 1 kpl 2 kpl 1 kpl |

DRAFT

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille koekappaleille/ tarkastetuille rakenteille/ rakennuksille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

**HAMPPU-KALKKISEOKSEN LÄMMÖNJOHTAVUUDEN MITTAUS**

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-----|--|---|
| 1 | KOEKAPPALEET | 3 |
| 2 | TESTAUSMENETELMÄ | 4 |
| 2.1 | Menetelmän yleiskuvaus | 4 |
| 2.2 | Mittauslaite | 4 |
| 2.3 | Koekappaleiden säilytys ennen koetta | 5 |
| 2.4 | Mittausohjelma | 6 |
| 3 | MITTAUSAJANKOHTA | 7 |
| 4 | TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU | 7 |
| | LÄHTEET | 8 |

DRAFT

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille koekappaleille/ tarkastelluille rakenteille/ rakennuksille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



DRAFT

1 KOEKAPPALEET

Tämä tutkimusselostus koskee Karelia-ammattikorkeakoulun tilaamia hamppu-kalkkiseoksen lämmönjohtavuuskokeita. Koekappaleet otettiin vastaan TTY:n rakennustekniikan laboratorioon 19.12.2013. Taulukossa 1 on esitetty tässä tutkimusselostuksessa käytettyjen koekappaleiden tunnuksset. Yksi tutkituista koekappaleista on esitetty kuvassa 1.

Taulukko 1. Koekappaleiden tunnuksset

| Koekappaleen tunnus | Koekappaleen numero | Materiaali | Määrä [kpl] |
|---------------------|---------------------|-------------------|-------------|
| K-1 | 1 | Hamppu-kalkkiseos | 1 |
| K-2 | 2 | Hamppu-kalkkiseos | 1 |
| K-3 | 3 | Hamppu-kalkkiseos | 1 |
| K-4 | 4 | Hamppu-kalkkiseos | 1 |
| K-5 | 5 | Hamppu-kalkkiseos | 1 |
| K-6 | 6 | Hamppu-kalkkiseos | 1 |



Kuva 1. Yksi tutkituista hamppu-kalkkiseos-koekappaleista.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille koekappaleille/ tarkastelluille rakenteille/ rakennuksille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



2 TESTAUSMENETELMÄ

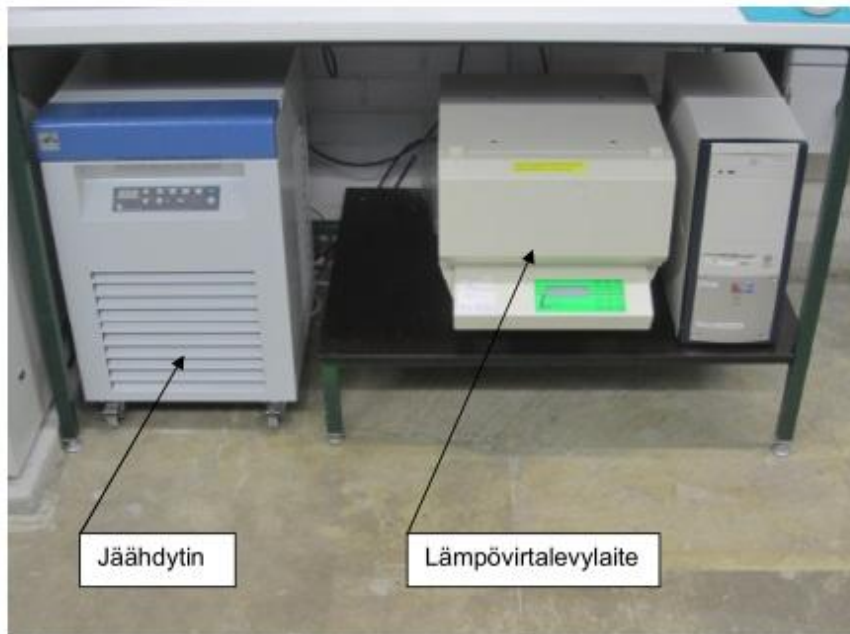
DRAFT

2.1 Menetelmän yleiskuvaus

Lämmönjohtavuuskokeet suoritettiin lämpövirtalevylaitteen avulla. Laitteen pääosat ovat ylä- ja alalevy, kaksi lämpövirtalevyä sekä suojakuori. Koekappale asetetaan ylä- ja alalevyjen väliin. Lämpövirtalevyt on integroitu ylä- ja alaosan keskiosaan siten, että ne tulevat kokeessa koekappaleen pintoja vasten. Pintojen lämpötilat säädetään erisuuruiseksi, jolloin niiden välille muodostuu lämpötilagradientti. Tämä aiheuttaa pintojen välille lämpövirran, jonka suuruutta mitataan lämpövirtalevyillä. Mittaukset suoritettiin standardin ISO 8301 (1991) "Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus" /1/ mukaisesti. Mittauksessa koekappale oli vaakasuorassa ja lämpövirran suunta oli alhaalta ylöspäin.

2.2 Mittauslaite

Käytetty lämpövirtalaite oli mallia LaserComp FOX304, sarjanumero 00060355 (ks. kuva 2). Laitteen mittaustarkkuus on ± 1 %. Laite on kalibroitu EPS-levyillä (28.4.2011), joiden lämmönjohtavuuden LaserComp Oy on mitannut. Kalibrointi on jäljitettävissä National Institute of Standards and Technology:n (NIST) standardireferenssimateriaaliin SRM 1450b. Laitteen kalibrointi on varmistettu vertailukoekappaleen avulla.



Kuva 2. Kuvassa oikealla LaserComp FOX304 lämpövirtalevylaitte ja vasemmalla laitteen jäähdytin.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille koekappaleille/ tarkastelluille rakenteille/ rakennuksille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



2.3 Koekappaleiden säilytys ennen koetta

Koekappaleita säilytettiin ennen koetta kolmen viikon ajan olosuhdehuoneissa, jonka ilman suhteellinen kosteus tasapainotuksen aikana oli keskimäärin 51,2 % RH ja keskilämpötila 23,3 °C. Koekappaleiden tasapainotus suoritettiin standardin SFS-EN 12429 (1998) "Thermal insulating products for building applications. Conditioning to moisture equilibrium under specified temperature and humidity conditions" /2/ mukaisesti.

Kun koekappaleiden paino alkoi tasaantua, alettiin kappaleita punnita 24 h välein kunnes painon muutos edelliseen punnitukseen verrattuna oli alle 0,05 %. Tällöin kappaleen painon oletettiin tasaantuneen. Koekappaleet punnittiin Precisa ES 2220M Executive vaa'alla.

Ensimmäisen koekappaleen mittauksen yhteydessä selvitettiin pinnan kontaktin vaikutusta koetuloksiin. Kuparipastan avulla varmistettiin koekappaleen ja lämpövirtalevyn välinen kontakti, ja poistettiin lämpövirtalevyn sekä koekappaleen pinnan väliin mahdollisesti jääneen ilman vaikutus koetulokseen. Ilman lämmönvastus on suuri, joten koekappaleen ja levyn välinen ilmaväli aiheuttaa tuloksiin epätarkkuutta siten, että mittauksen tuloksena saatava lämmönjohtavuusarvo on todellista arvoa pienempi. Kuparipastan lämmönjohtavuus on hyvin suuri, joten se ei muodosta merkittävää lämmönvastusta koekappaleen ja levyn väliin. Tätä varten koekappale mitattiin levittämällä kuparipastaa koekappaleen ylä- ja alapinnalle, että ilman sitä. Lisäksi koekappale kiedottiin ennen koetta ohueen muovikelmuun (ks. kuva 3), jottei kuparipasta vahingoittaisi lämpövirtalevyä, eikä kappaleen kosteuspitoisuus muuttuisi mittauksen aikana. Mittaustulosten välinen ero kuparipastalla ja ilman pastaa mitattaessa oli niin pieni, että loput koekappaleet mitattiin ilman sitä. Kappaleet kiedottiin kuitenkin muovikelmuun, ettei niiden kosteuspitoisuus muuttuisi mittauksen aikana (ks. kuva 3).



Kuva 3. Kuvassa vasemmalla on kuparipastalla käsitelty koekappale, joka on kiedottu muoviin. Oikealla on koekappale ilman kuparipastaa kiedottuna muoviin.

DRAFT

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille koekappaleille/ tarkastelluille rakenteille/ rakennuksille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Ennen lämmönjohtavuuden mittausta koekappaleiden sivumitat mitattiin rullamitalla. Lisäksi paksuus mitattiin työntömitalla neljän mittauksen keskiarvona. Lämpövirtalevyllä mittasi kappaleen paksuuden automaattisesti kokeen aikana. Koekappaleiden lämmönjohtavuudet määritettiin automaattisesti laitteella mitatun paksuuden mukaan. Koekappaleet myös punnittiin ennen mittausta. Koekappaleiden mitat ja paino on esitetty taulukoissa 2.

Taulukko 2. 50 % RH:ssa ja 23 °C lämpötilassa tasapainotettujen koekappaleiden painot ja mitat.

| Koekappale | Sivumitta (mm) | Paksuus (mm) käsin | Paksuus (mm) automaatti | Paino (g) |
|---------------------|----------------|--------------------|-------------------------|-----------|
| K-1 | 306x306 | 52,03 | 52,59 | 2089,36 |
| K-1, kuparipastalla | 306x306 | 52,15 | 52,89 | 2182,86 |
| K-2 | 303x305 | 52,65 | 52,78 | 2112,67 |
| K-3 | 305x305 | 52,85 | 52,52 | 2091,70 |
| K-4 | 301x305 | 52,22 | 52,69 | 1957,48 |
| K-5 | 305x302 | 52,58 | 53,71 | 1965,87 |
| K-6 | 303x303 | 54,03 | 54,21 | 1975,73 |

Käsinmittausten ja kappaleen painon perusteella laskettiin jokaiselle koekappaleelle tiheys. Kappaleiden tiheydet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. 50 % RH:ssa ja 23 °C lämpötilassa tasapainotettujen koekappaleiden tiheydet.

| Koekappale | Tiheys (kg/m ³) |
|------------|-----------------------------|
| K-1 | 429,1 |
| K-2 | 439,6 |
| K-3 | 432,4 |
| K-4 | 410,0 |
| K-5 | 410,4 |
| K-6 | 398,5 |

DRAFT

2.4 Mittausohjelma

Mittaukset tehtiin 10 °C keskilämpötilassa. Lämpövirtalevyllä ylä- ja alalevyjen välinen lämpötilaero oli 20 °C. Kokeen ajaksi kappaleet puristettiin lämpövirtalevyjen väliin siten, että materiaalin pinnan ja levyn väliin ei jäänyt ilmarakoa levyjen keskiosaan, josta lämmönjohtavuus mitataan noin 100x100 mm² suuruiselta alalta.



3 MITTAUSAJANKOHTA

Lämpövirtalevy mittaukset suoritettiin 7.1–20.1.2014 välisenä aikana.

4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Koekappaleille määritettiin lämmönjohtavuus 10 °C keskilämpötilassa (λ_{10}). Mittaustulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Lämpövirtalevyllä saadut mittausarvot 50 % RH:ssa ja 23 °C lämpötilassa tasapainotetuille koekappaleille.

| Koekappale | T_U (°C) | T_L (°C) | T_m (°C) | ΔT (°C) | λ_{10} (W/(m·K)) |
|------------|------------|------------|------------|-----------------|--------------------------|
| K-1 | 0,02 | 20,02 | 10,02 | 20,00 | 0,110 |
| K-2 | 0,01 | 20,02 | 10,01 | 20,01 | 0,114 |
| K-3 | 0,01 | 20,00 | 10,01 | 19,99 | 0,109 |
| K-4 | 0,01 | 20,01 | 10,01 | 20,00 | 0,112 |
| K-5 | 0,02 | 20,02 | 10,02 | 20,00 | 0,109 |
| K-6 | 0,02 | 20,02 | 10,02 | 20,00 | 0,110 |

T_U = Ylälevyn lämpötila (°C)
 T_L = Alalevyn lämpötila (°C)
 T_m = Koekappaleen keskilämpötila (°C)
 ΔT = Lämpötilaero (°C)
 λ_{10} = Lämmönjohtavuus (W/(m·K))

Materiaalin lämmönjohtavuus voidaan ilmoittaa usealla eri arvolla: laboratoriossa 10 °C keskilämpötilassa mitatulla λ_{10} -arvolla tai ilmoitetulla lämmönjohtavuudella λ_D -arvolla voimassa olevan SFS-EN standardin tai eurooppalaisen hyväksynnän mukaisesti. Lisäksi voidaan määrittää lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo, λ_U , joka on määritetty SFS-EN standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan. Ilmoitettua lämmönjohtavuutta käytetään lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvon lähtötietona.

Tässä tutkimuksessa tulokset on esitetty λ_{10} -arvoina. Tutkitun koesarjan lämmönjohtavuuden (λ_{10}) keskiarvo oli 0,11 W/(mK)

RakMK C4 ei anna hamppu-kalkkiseokselle λ_n -arvoa. Väitöskirjassa "Transient hygrothermal behavior of a Lime-Hemp hemp materials" /3/ on hamppu-kalkkiseokselle saatu mittauksissa lämmönjohtavuudeksi 0,115 W/(mK) 10 °C lämpötilassa. Lämmönjohtavuuteen vaikuttaa lisäksi materiaalin kosteuspitoisuus sekä tiheys.

DRAFT

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille koekappaleille/ tarkastelluille rakenteille/ rakennuksille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

**LÄHTEET**

- /1/ ISO 8301:1991. Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus. International Organization for Standardization, Geneve. 37 s.
- /2/ ISO 12429:1998. Thermal insulating products for building applications. Conditioning to moisture equilibrium under specified temperature and humidity conditions. International Organization for Standardization, Geneve. 9 s.
- /3/ Evrard, A. 2008. Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials. Louvain-la-Neuve, Catholic University of Louvain. 141 p. + app. 33p.

DRAFT



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

(9/9)

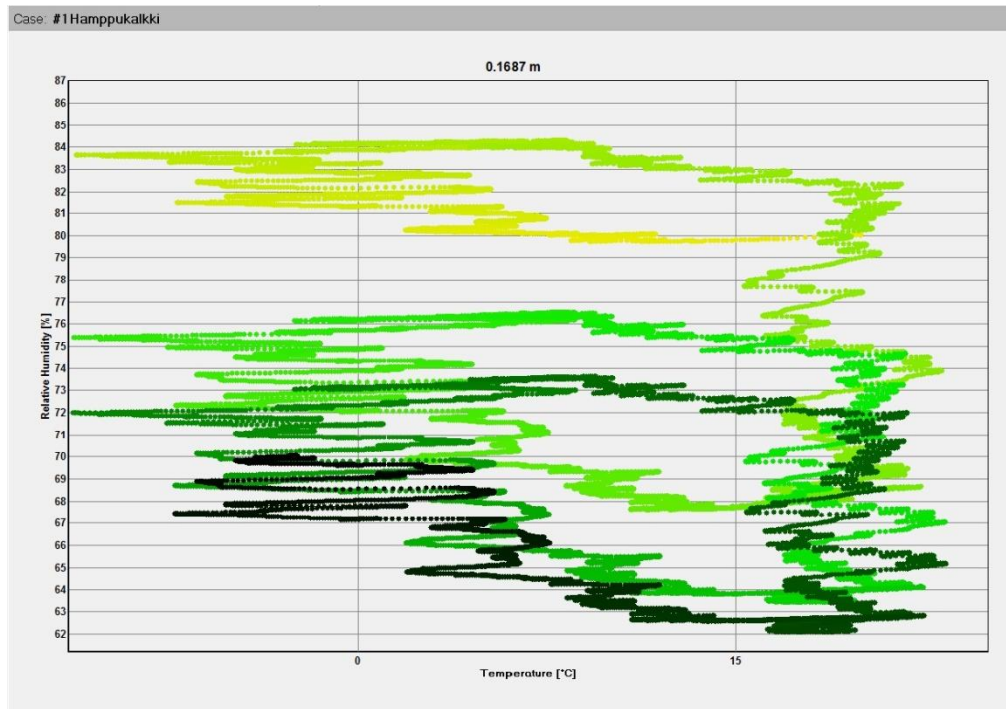
Tutkimusselostus
Nro 2287
28.3.2014

Tampere 28.3.2014

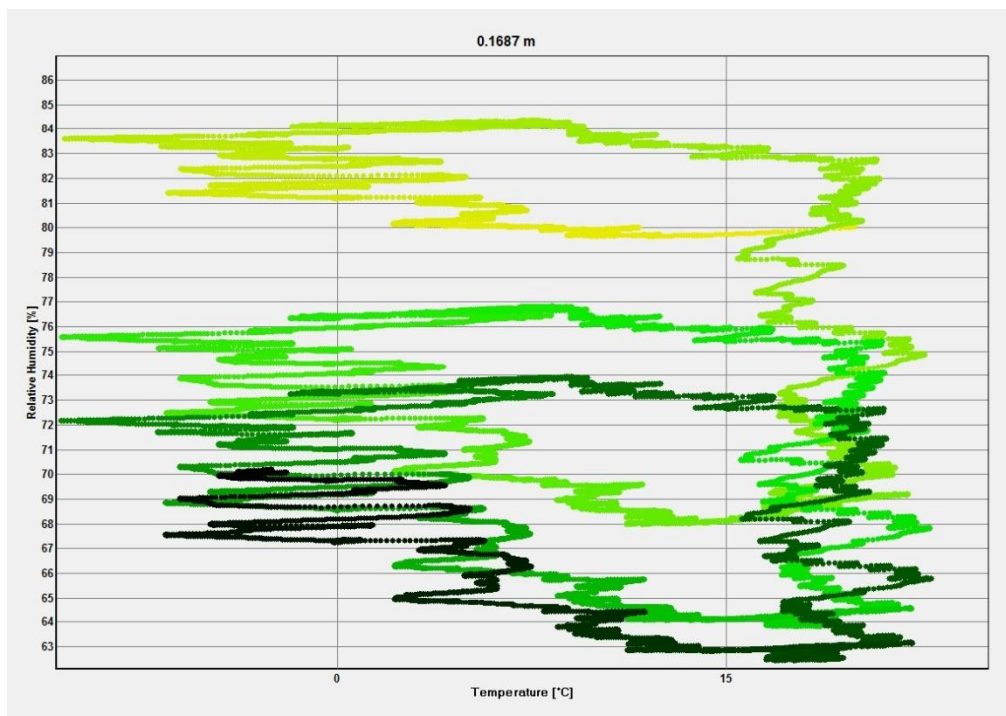
TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Rakennustekniikan laitos
RakennetekniikkaMarko Kiili
Tutkimusapulainen, rak.ins.Juha Vinha
Professori, tekn. toht.**DRAFT**

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille koekappaleille/ tarkastetuille rakenteille/ rakennuksille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Suhteellisen kosteuden- ja lämpötilan kuvaajat eri lähtöarvoilla

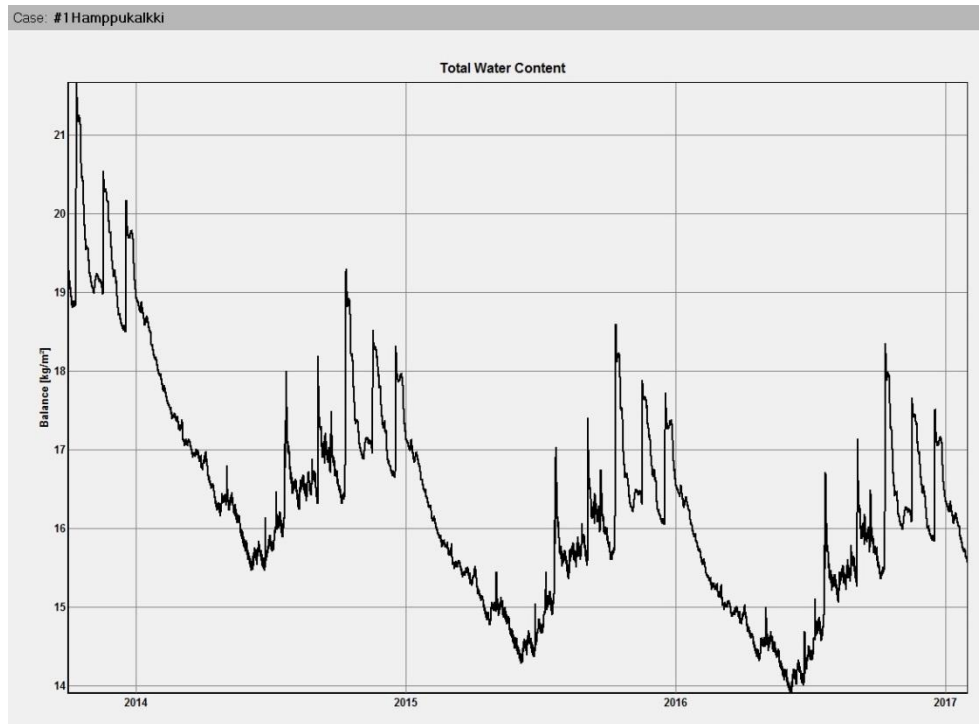


Tutkimusten perusteella saaduilla lähtöarvoilla mallinnettu seinärakenne

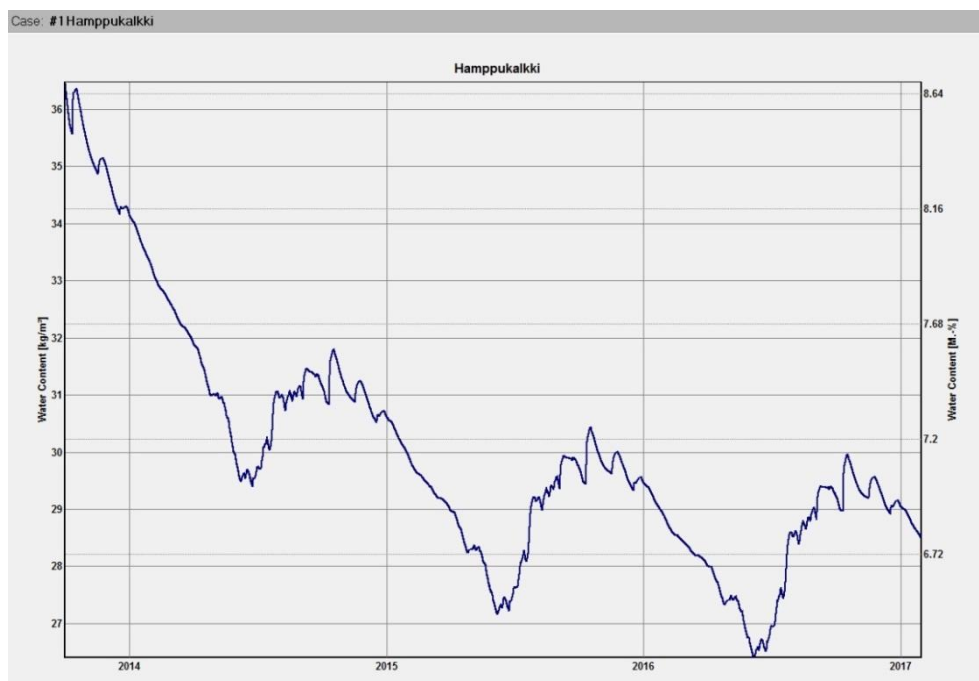


Tradical Hemcrete:n lähtöarvoilla mallinnettu seinärakenne

Kokonaiskosteusmäärä ajan suhteen

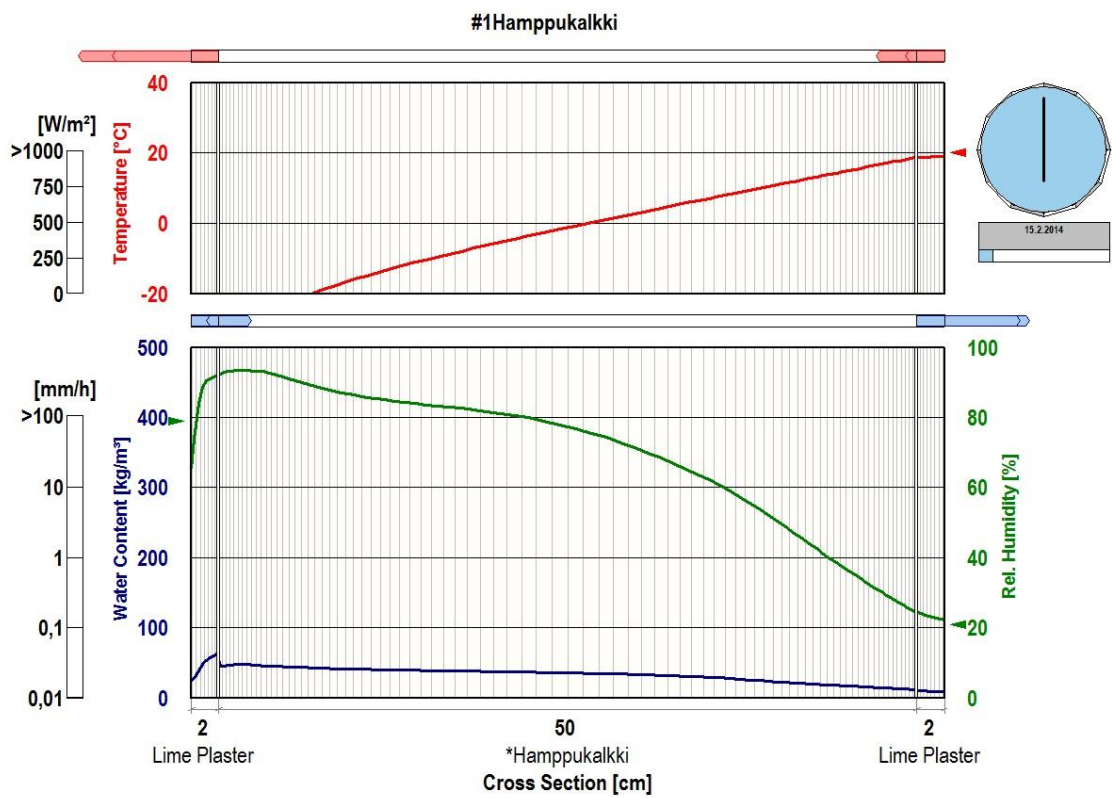
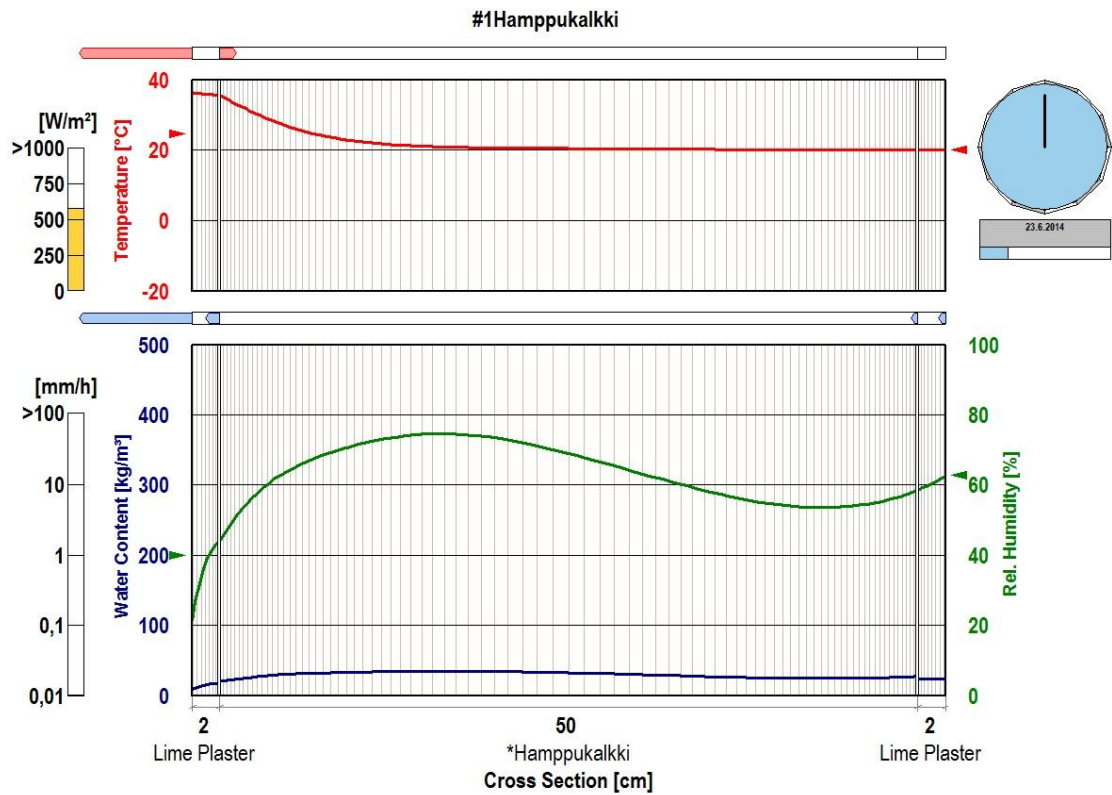


Seinän kokonaiskosteusmäärä



Hamppu-kalkkikomposiitin kokonaiskosteusmäärä

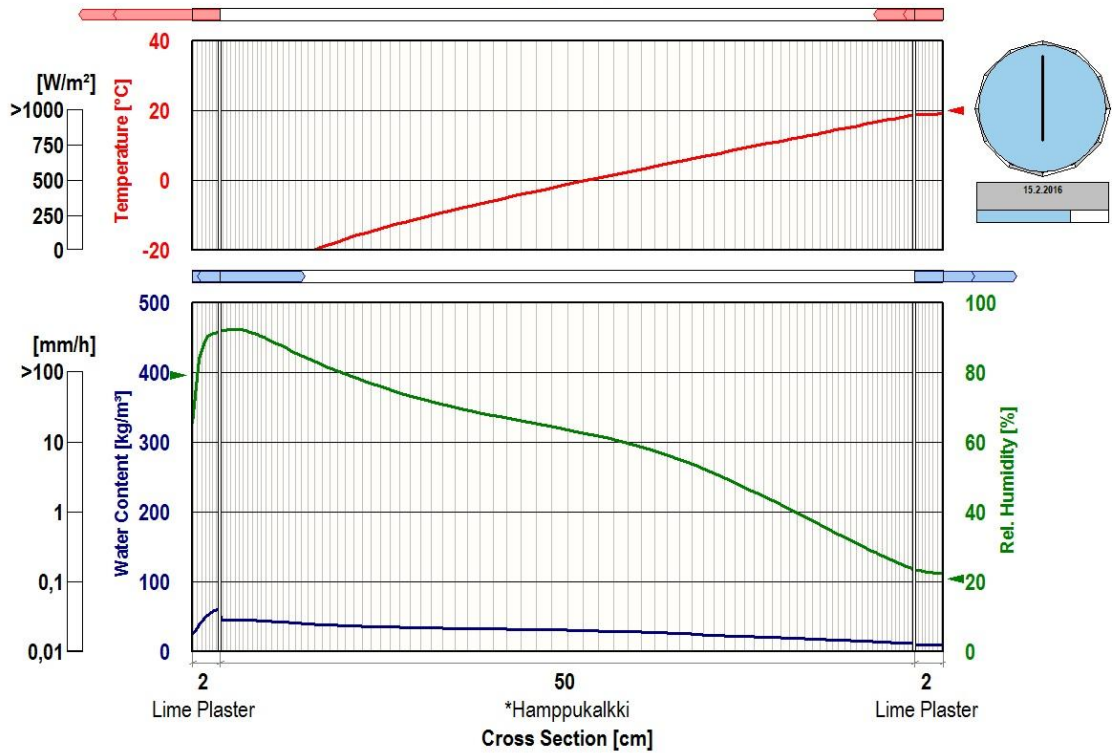
Kosteuden ja lämmön siirtyminen kylmimpänä ja kuumimpana aikana



Location: Jyväskylä; Finnish Meteorological Institute;

#1Hamppukalkki

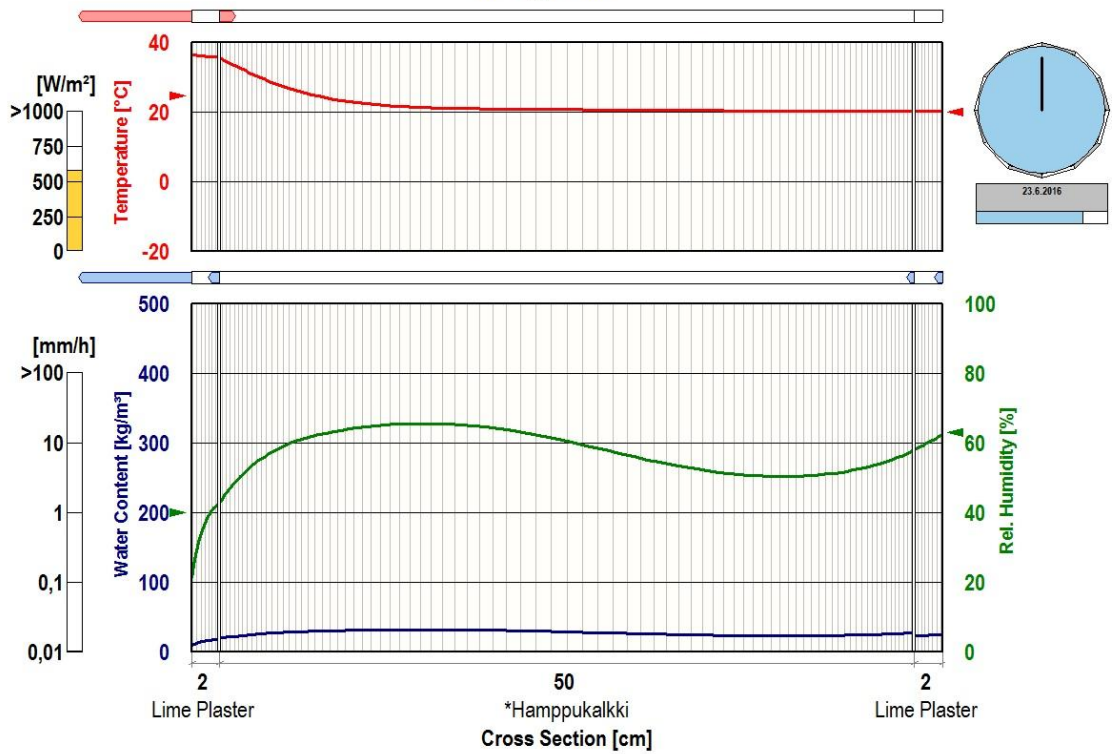
WUFI®



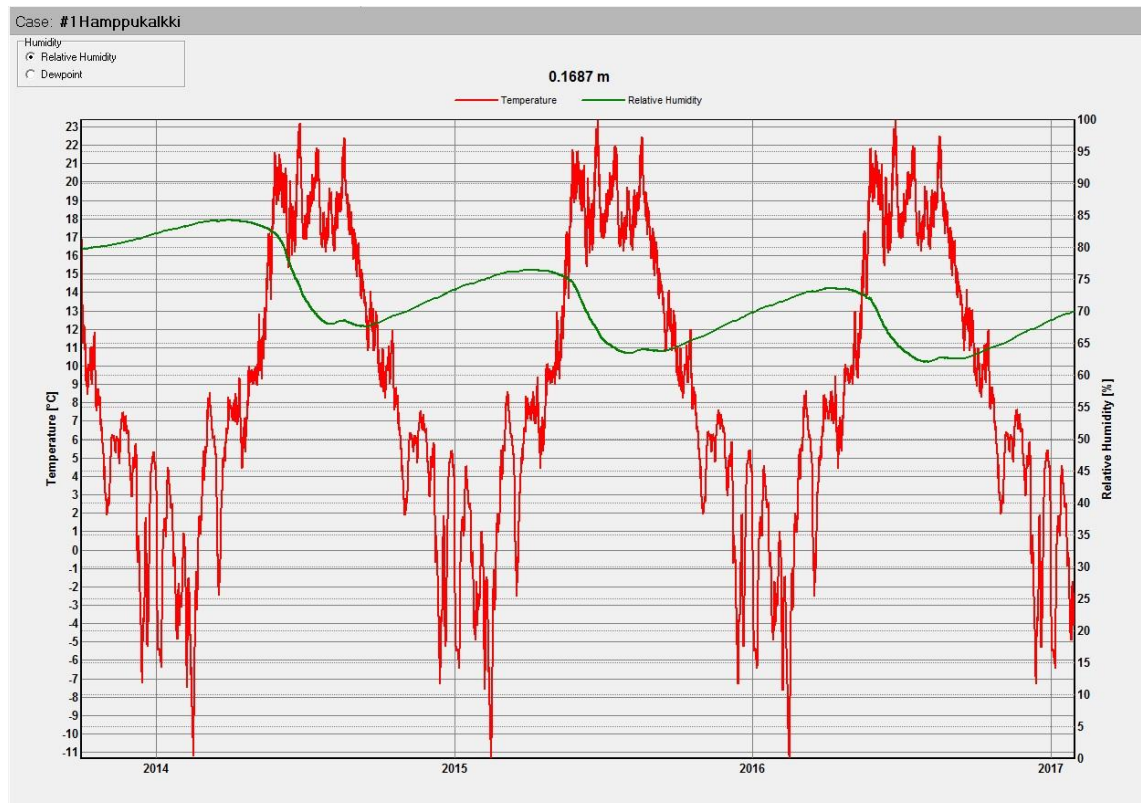
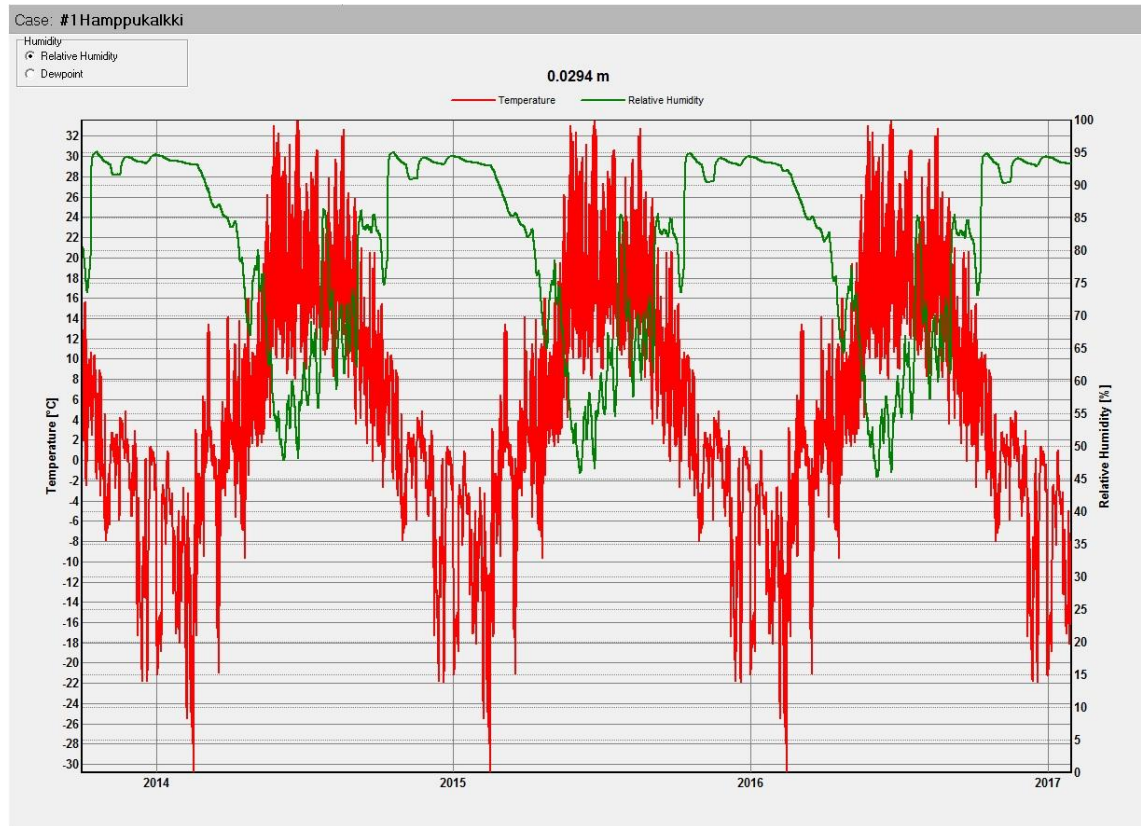
Location: Jyväskylä; Finnish Meteorological Institute;

#1Hamppukalkki

WUFI®



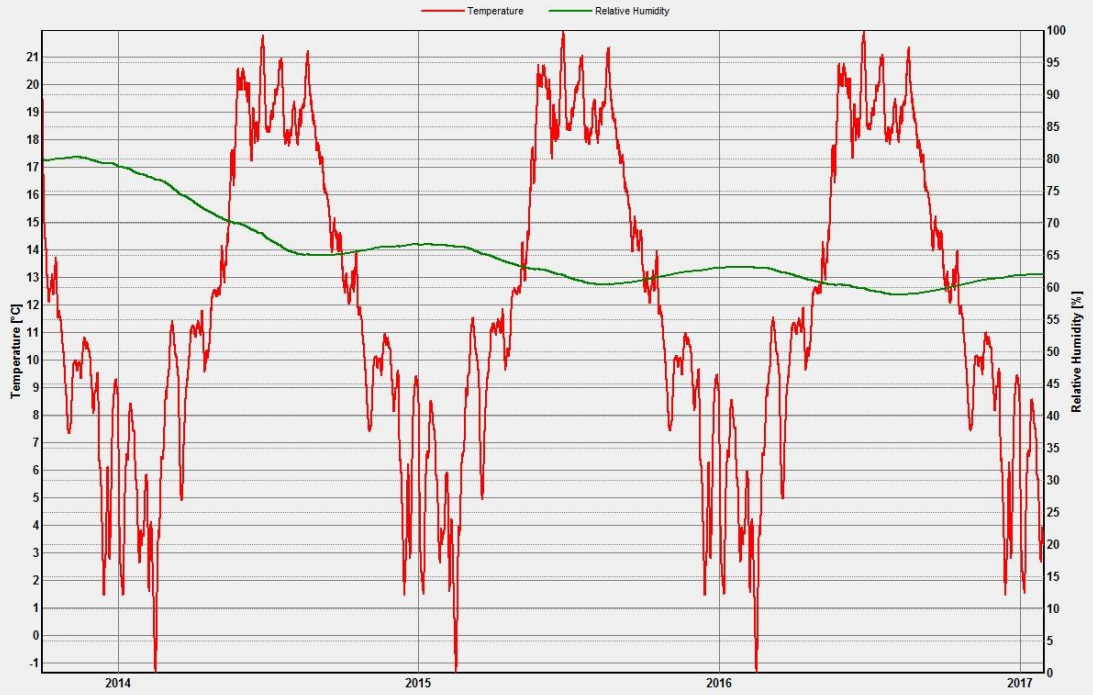
Hamppu-kalkkikomposiitin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden käyrät eri mittauspisteissä



Case: #1Hamppukalkki

- Humidity
- Relative Humidity
- Dewpoint

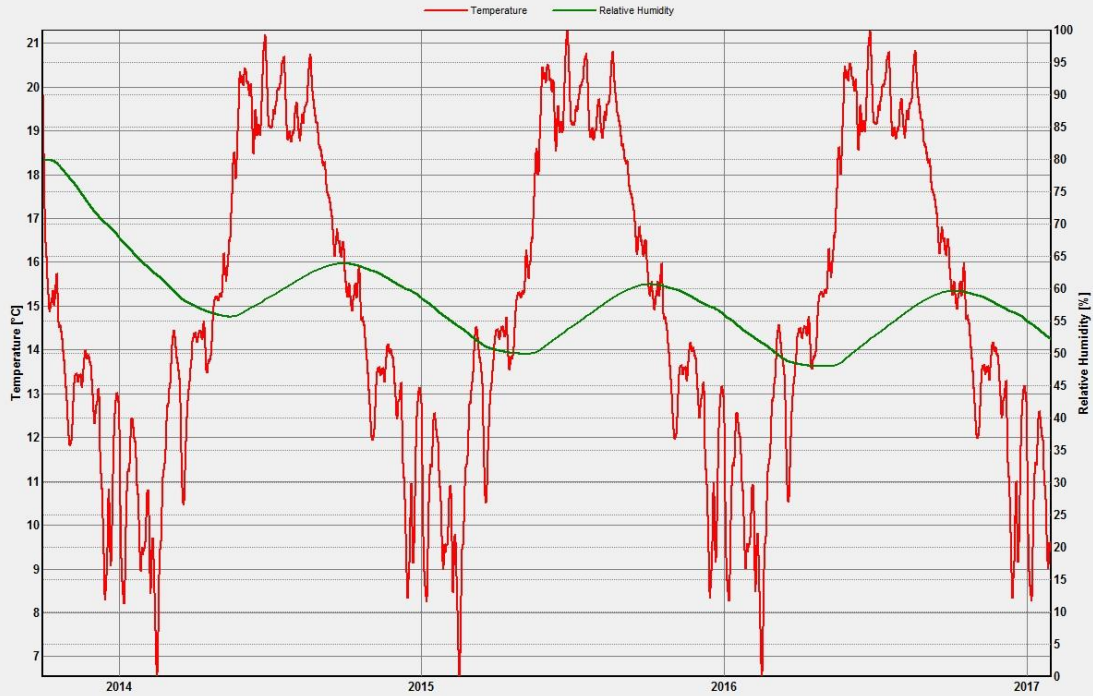
0,2757 m

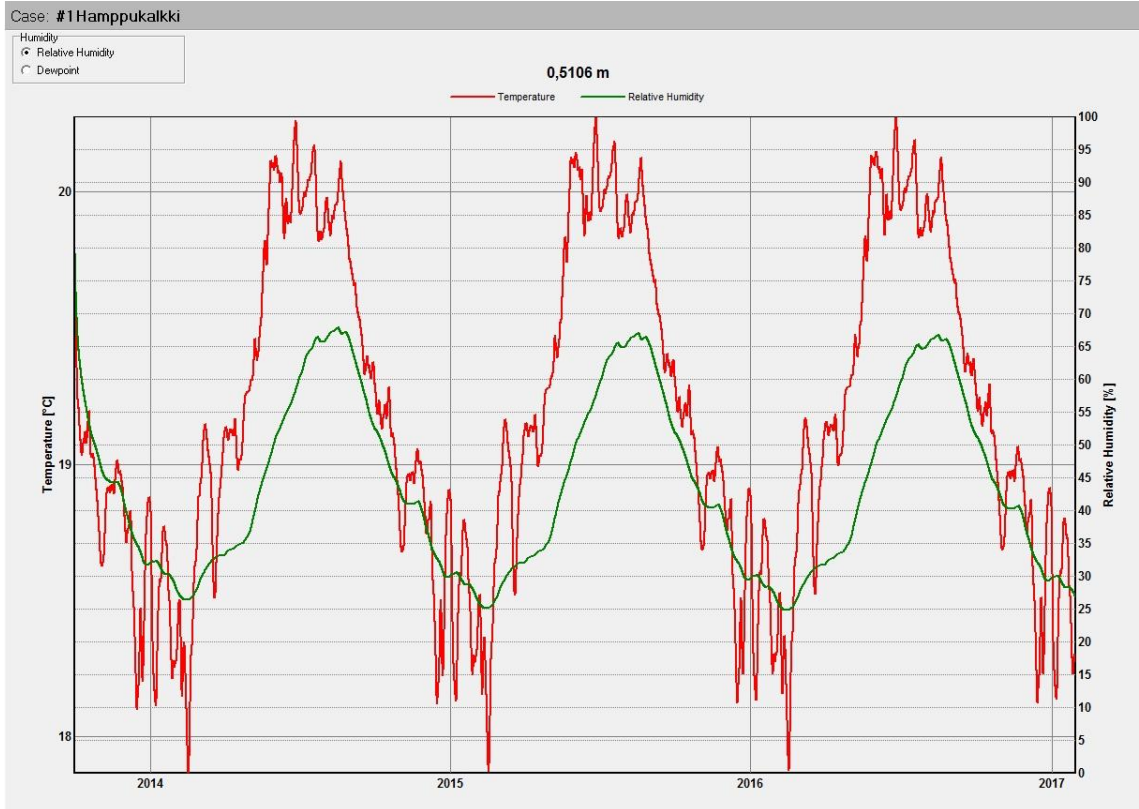


Case: #1Hamppukalkki

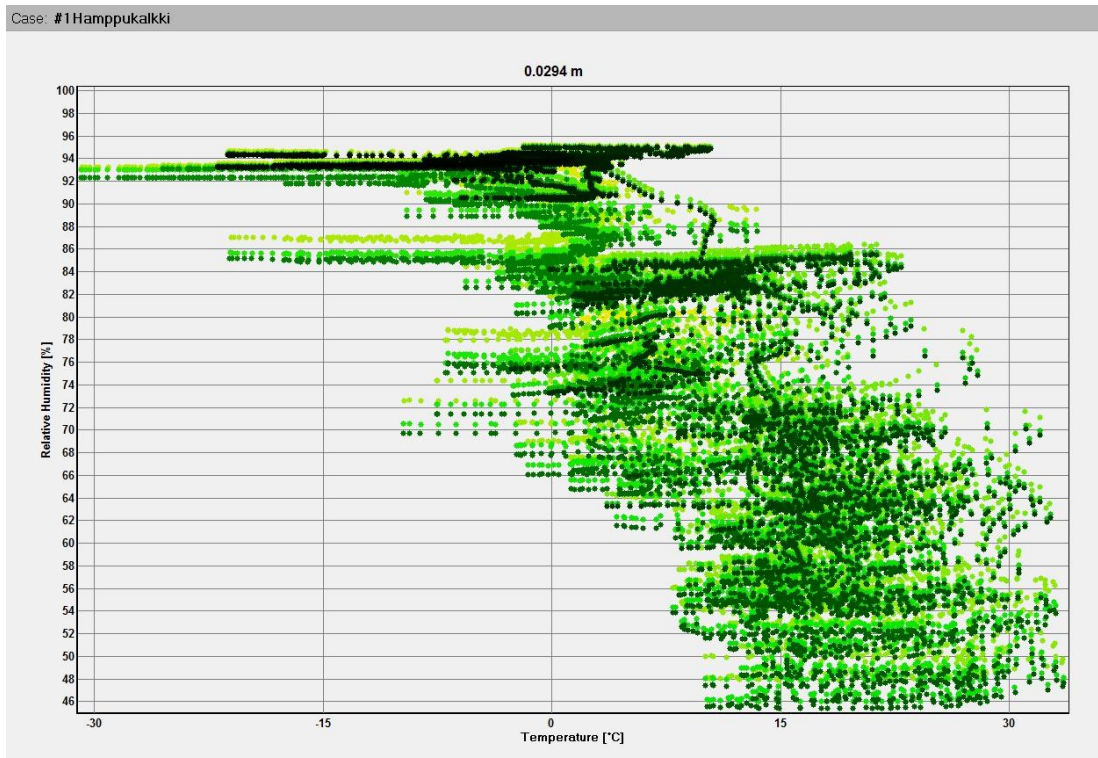
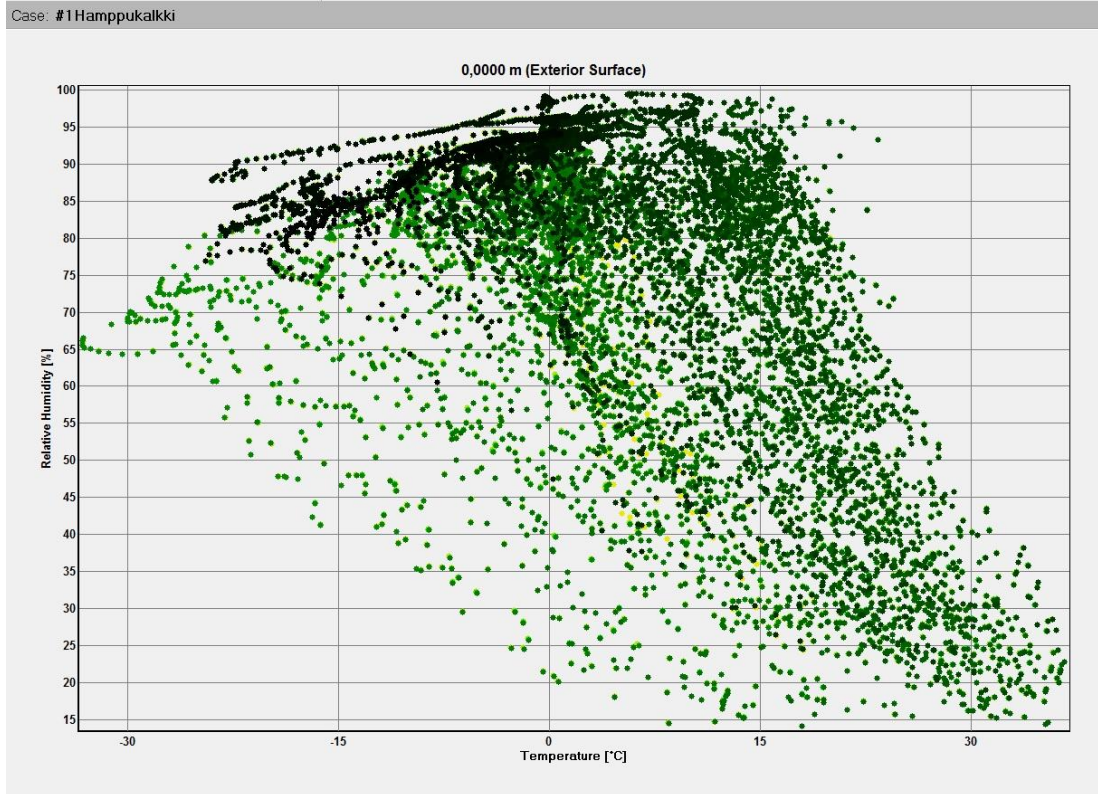
- Humidity
- Relative Humidity
- Dewpoint

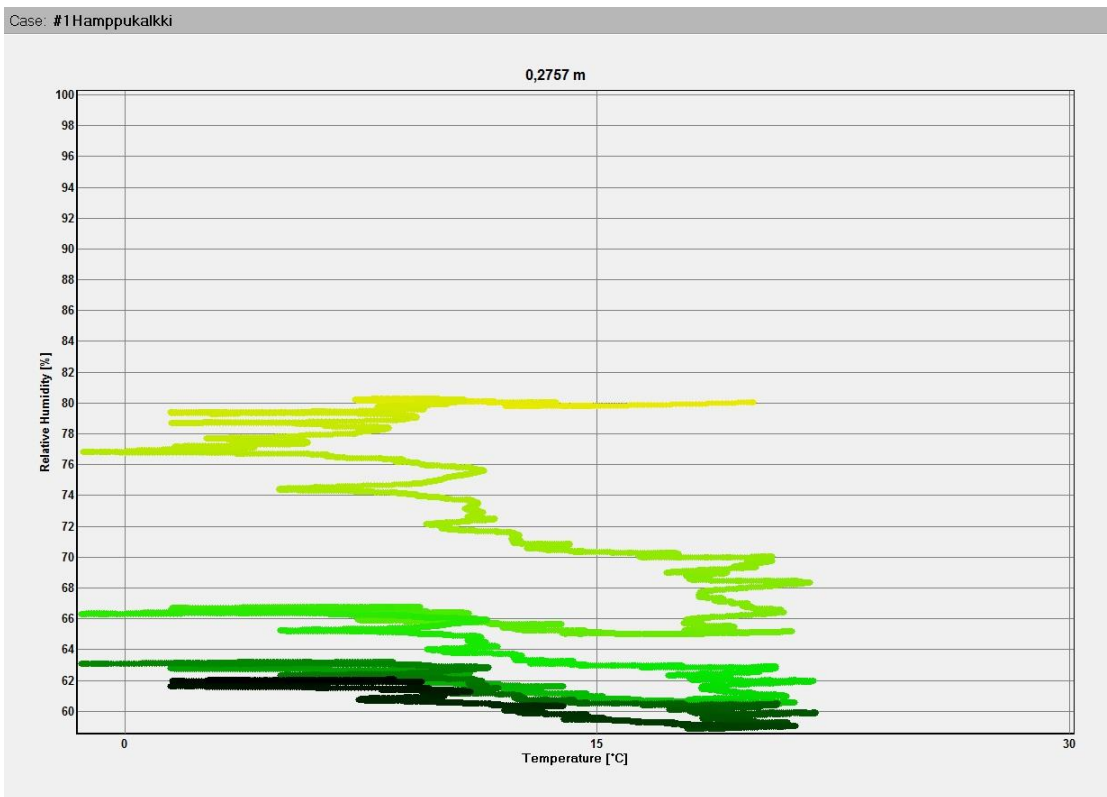
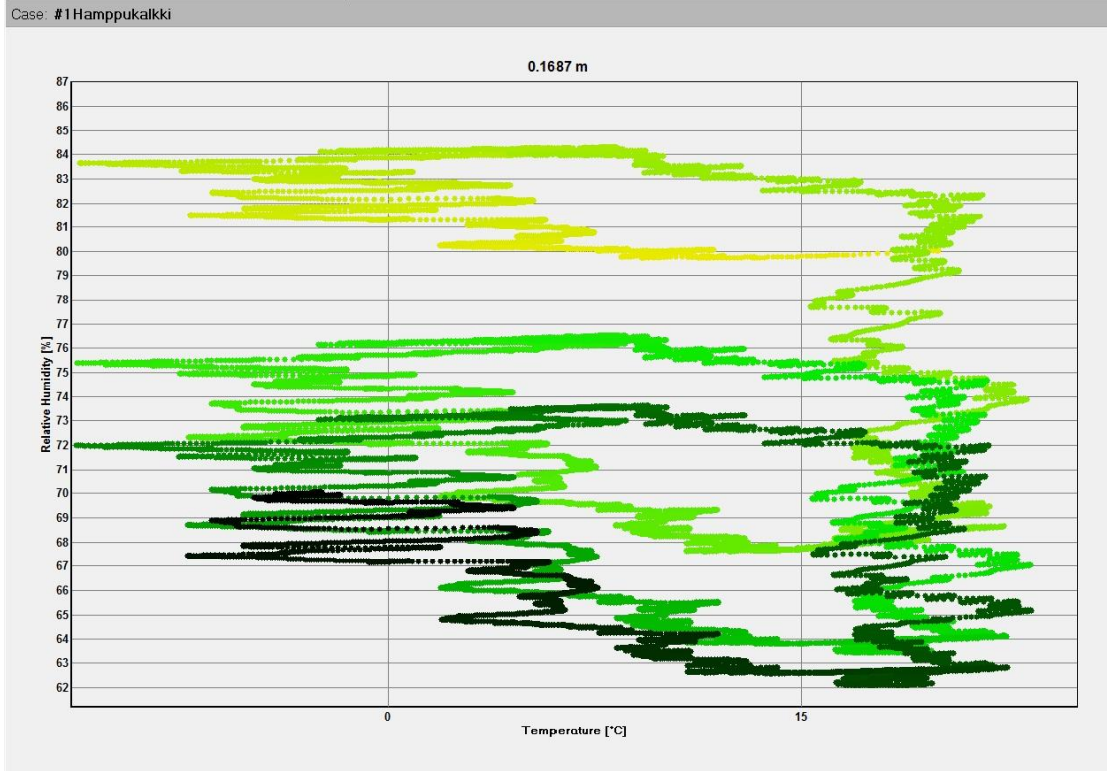
0,3713 m



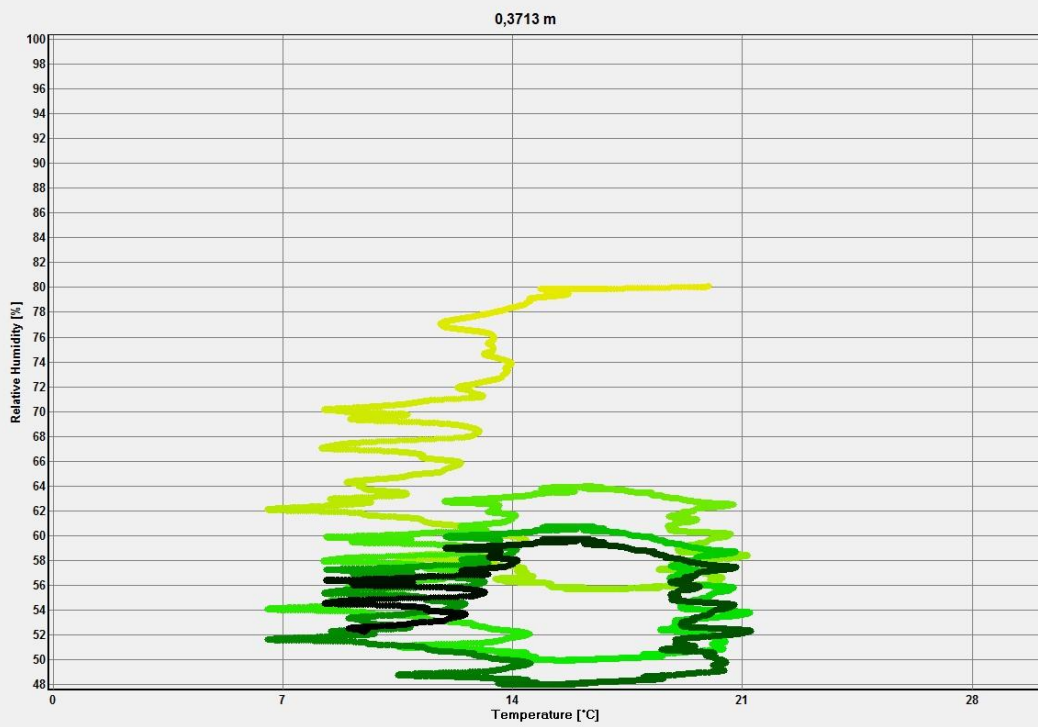


Lämpötila ja suhteellinen kosteus koko tarkasteluajana eri tarkastelupisteissä

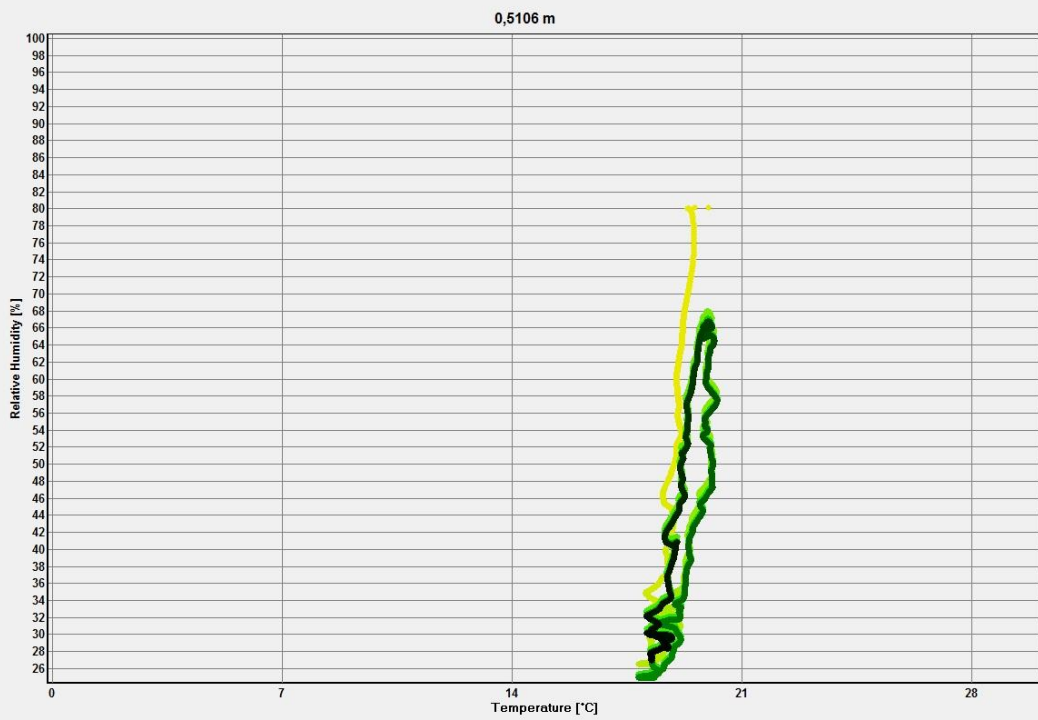


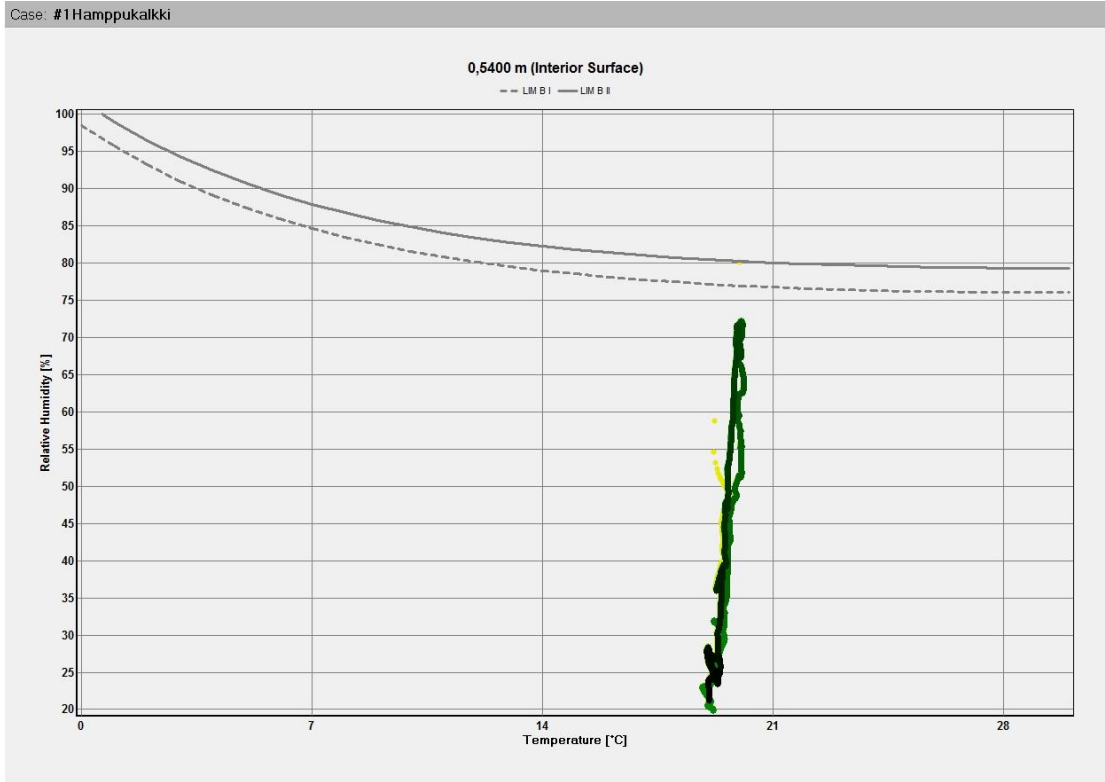


Case: #1 Hamppekalkki

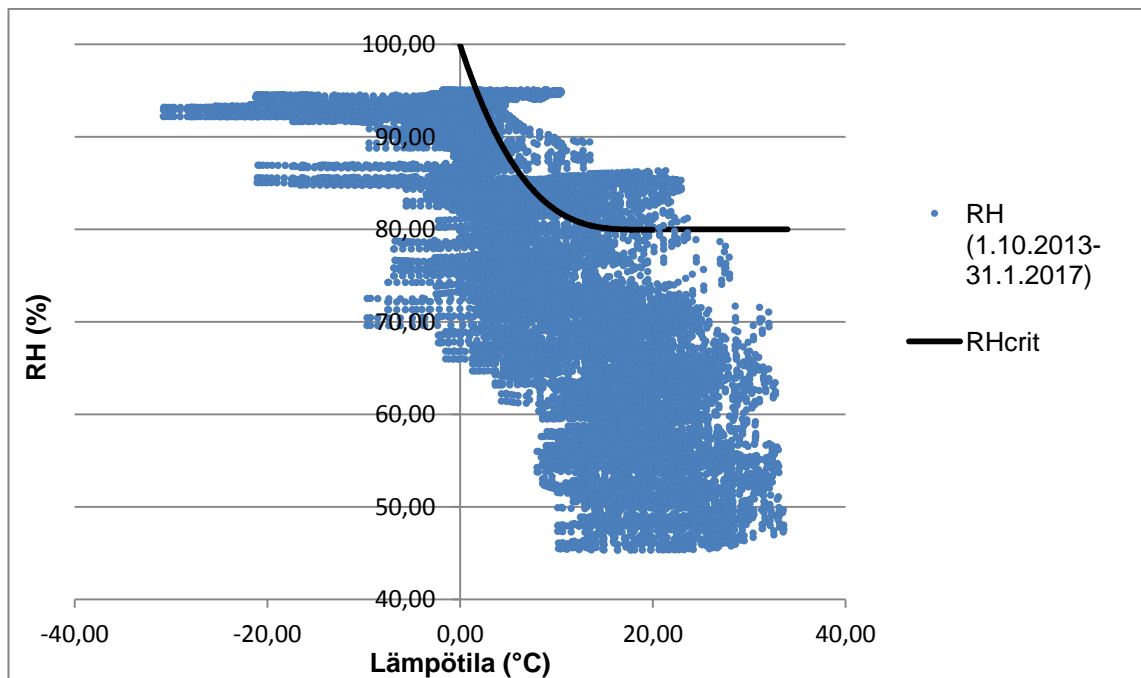


Case: #1 Hamppekalkki

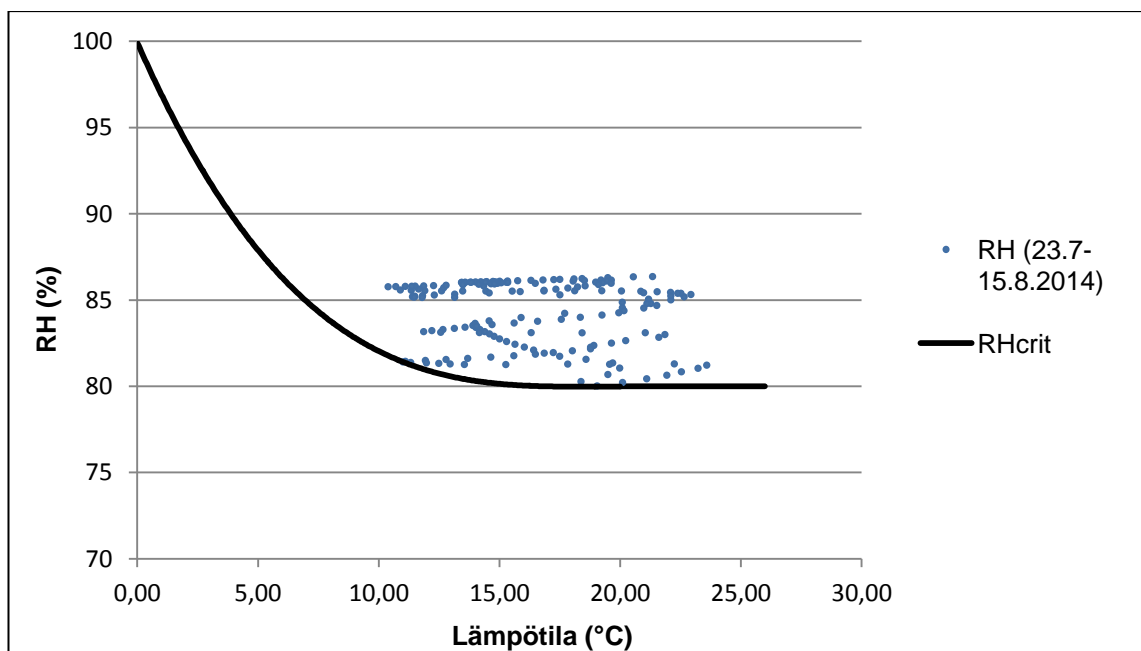




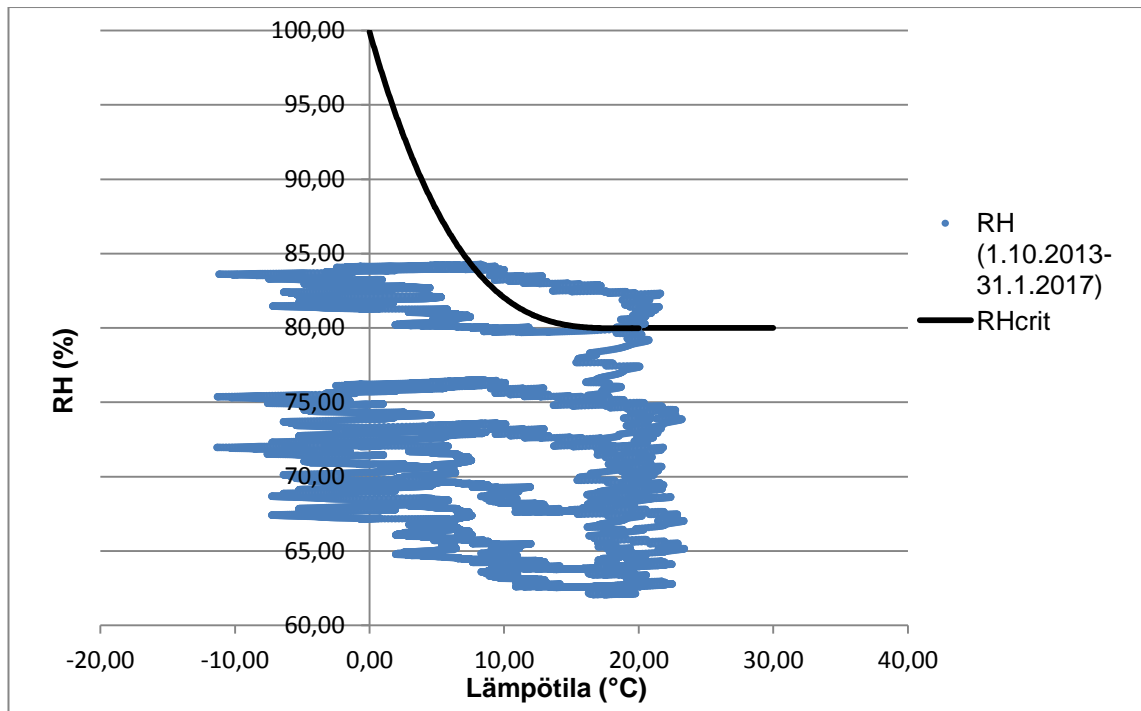
Kriittisen suhteellisen kosteuden käyrät ja sen ylittävät ajat



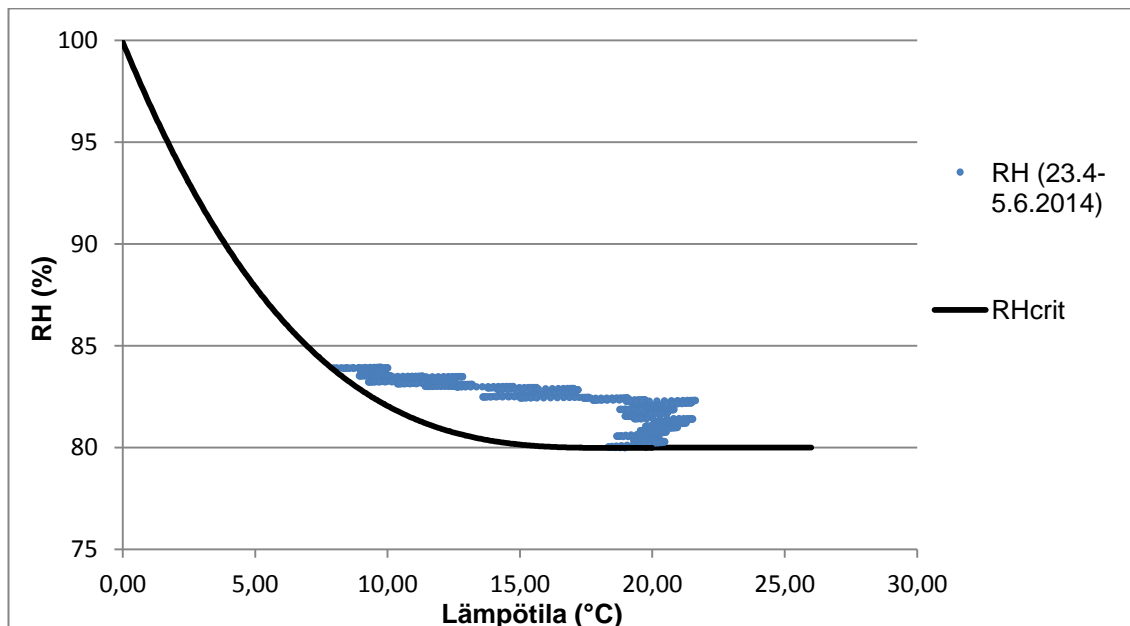
Tarkastelupisteen 2 koko tarkastelujakson suhteellinen kosteus, lämpötila ja kriittisen suhteellisen kosteuden käyrä.



Tarkastelupisteen 3 pisin kriittisen suhteellisen kosteuden ylittävä ajanjakso.



Tarkastelupisteen 3 koko tarkastelujakson suhteellinen kosteus, lämpötila ja kriittisen suhteellisen kosteuden käyrä.



Tarkastelupisteen 3 pisin kriittisen suhteellisen kosteuden ylittävä ajanjakso.

E-mail Hemprefine Oy

Hei Tommi,

Päistäreen partikkelikoosta, puhtaudesta ja pakkaustavasta riip-
puen hinta vaihtelee 300-600€:n välillä tonnilta. Hamppurakenta-
miseen soveltuva päistäre irtotavarana n. 400€/t.

Hamppurakentamisesta vaikuttaa olevan tekeillä Suomessa useampi-
kin opinnäytetyö ja referenssikohteitakin on nousemassa useam-
pia. Merkittävin lienee Vantaan asuntomessuille tulevan ekoker-
rostalon ulkorakennusten seinät.

Toimitimme myös BioBi-hankkeelle päistärettä kuivikekokeisiin
viime syksynä, josta pitäisi valmistua opinnäytetyö Karelia
amk:sta lähiaikoina.

Terveisin,

Mikko Neuvo

-----Alkuperäinen viesti-----

Lähettäjä: Nuutinen Tommi P.

[<mailto:Tommi.P.Nuutinen@edu.karelia.fi>]

Lähetetty: 7. toukokuuta 2014 9:40

Vastaanottaja: info@hemprefine.fi

Aihe: Hampun päistäreen myyntihinnat

Hei,

Teemme Karelia ammattikorkeakoulussa opinnäytetyötä hampukalk-
kirakentamisesta Suomen ilmasto-olosuhteissa.
Huomasin vastikään, että Pohjois-Karjalan alueella toimii teidän
kuidunerotteluyritys.

Kiinnostaisi tietää missä hinnoissa hampunpäistäreet ovat kun
puhutaan pientalonrakentamiseen menevistä määristä (noin 6-
12tn)?

Terv. Tommi Nuutinen / Karelia ammattikorkeakoulu