



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Sampsa Raevaara

Savi-kiviseoksen vaikutus väli- ja alapohjarakenteen kuivumiseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (ylempi AMK)

Rakennustekniikka

Opinnäytetyö

Päivämäärä 6.2.2024

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Sampsa Raevaara Savi-kiviseoksen vaikutus väli- ja alapohjarakenteen kuivumiseen 57 sivua + 1 liite 6.2.2024
Tutkinto	Insinööri (ylempi AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Korjausrakentaminen
Ohjaajat	Yliopettaja, Hannu Hakkarainen Perustajaosakas, Kristiina Kuusiluoma Perustajaosakas, Martino De Rossi
<p>Opinnäytetyö sai alkunsa osana Luonnonbetoni-hanketta, jonka tavoitteena on tuoda todella pitkään käytetty rakennusmateriaali savi, takaisin tavallisen rakentamisen piiriin. Materiaalin uudelleen syntyminen vaatii kuitenkin ympärilleen paljon ajantasaista ja tutkittua tietoa, jotta sen käyttöä uskalletaan suositella nykypäivän vaatimuksiin soveltuvana.</p> <p>Opinnäytetyössä tutkittiin savi-kiviseoksen vaikutusta väli- ja alapohjarakenteen kuivumiseen. Tutkimus keskittyi uuden rakenteen rakennuskosteuden poistumiseen rakenteesta, mutta tuloksia voidaan hyödyntää myös olemassa olevan alapohjarakenteen kosteusongelmiin. Massiivisten betonirakenteiden kuivuminen on hidasta ja pinnoituskosteuksien odottaminen tahdittaa työmaata usein turhan paljon. Työssä etsittiin vaihtoehtoisia tapoja, joilla saadaan rakenteiden kuivumista nopeutettua, tai rakenteen toimintaa parannettua kosteissa olosuhteissa.</p> <p>Savi-kiviseoksen havaittiin nopeuttavan massiivisen betonirakenteen kuivumista silloin, kun betonirakennetta pystyttiin korvaamaan sillä. Tulokset viittaavat siihen, että betonisen pintarakenteen korvaamisella savi-kiviseoksella saavutetaan merkittäviä etuja kuivumisajoissa. Tutkimuksessa kuitenkin havaittiin paljon sen luottamusta heikentäviä tekijöitä, minkä vuoksi tarkkoja aikataulusäästöjä ei pystytty määrittämään.</p> <p>Tutkimustilannetta toistettiin myös rakennusfysikaalisilla mallinnuksilla savi-kiviseoksen materiaaliparametrien määrittämiseksi sekä tutkimuksen luotettavuuden parantamiseksi. Mallinnukset suoritettiin rakennusfysikaalisiin mallinuksiin tarkoitetulla Wufi 2D -ohjelmistolla. Mallinnuksien avulla savi-kiviseokselle onnistuttiin määrittämään tutkimuksia jäljittelevät materiaaliarvot. Näiden luotettavuutta kuitenkin heikentää tutkimuksen heikko luotettavuus.</p> <p>Kokonaisuutena savi-kiviseoksella voidaan sanoa olevan potentiaalia hengittävänä, kosteutta siirtävänä, vikasietoisena, vähähiilisenä ja kauniina materiaalina.</p>	
Avainsanat	savi, rakennusfysiikka, rakennuskosteus, Luonnonbetoni

Author Title Number of Pages Date	Sampsa Raevaara Effect of Clay-Stone Mixture on The Drying of Intermediate Floors and Base Floors 57 pages + 1 appendix 6 February 2024
Degree	Master of Engineering
Degree Program	Civil Engineering
Specialization option	Renovation
Supervisors	Hannu Hakkarainen, Principal Lecturer Kristiina Kuusiluoma, Founding Partner Martino De Rossi, Founding Partner
<p>The thesis originated as part of the Luonnonbetoni project, whose goal is to reintroduce clay, a long-used building material, back into mainstream construction. However, the revival of the material requires a significant amount of up-to-date and researched information surrounding it to confidently recommend its use in line with contemporary construction requirements.</p> <p>The thesis investigated the impact of a clay-stone mixture on the drying of intermediate and base floor structures. The focus of the research was on the removal of building moisture from the structure, but the results can also be applied to existing issues with moisture in base floor structures. The drying process of massive concrete structures is slow, and waiting for moisture to dissipate often slows down construction sites unnecessarily. The study explored alternative methods to expedite the drying of structures or improve their performance under moist conditions.</p> <p>It was observed that the clay-stone mixture accelerated the drying of massive concrete structures when it could replace part of the concrete structure. The results suggest that replacing the concrete surface structure with a clay-stone mixture can lead to significant advantages in drying times. However, the study identified several factors that undermined confidence in the results, making it challenging to determine precise schedule savings.</p> <p>The research situation was also repeated with building physics simulations to determine the material parameters of the clay-stone mixture and improve the reliability of the study. Simulations were carried out using the Wufi 2D software designed for building physics modeling. The simulations successfully determined material values that mimic the research, but their reliability was compromised by the overall weak confidence in the study.</p> <p>In conclusion, the clay-stone mixture can be considered as having the potential to be a breathable, moisture-transferring, fault-tolerant, low-carbon, and aesthetically pleasing material.</p>	
Keywords	clay, building physics, building moisture, Luonnonbetoni

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön tausta	1
1.2	Opinnäytetyön tavoite	2
1.3	Opinnäytetyön rajaus ja toteutus	2
2	Savirakentamisen historia	3
2.1	Savirakennusmenetelmiä	3
2.2	Savirakentaminen Saksassa	4
2.3	Savirakentaminen Suomessa	4
3	Savi	5
3.1	Saven ominaisuudet	5
3.2	Savilajit ja niiden esiintyminen	7
3.3	Luonnonbetoni	9
4	Testirakenteet	11
4.1	Testirakenteisiin liittyvä teoria	12
4.2	Koejärjestelyt	14
4.3	Mittaustulokset	18
4.3.1	Kahteen suuntaan kuivuvat teräsbetonivälipohjat	19
4.3.2	Yhteen suuntaan kuivuvat teräsbetonivälipohjat	24
4.3.3	Puurakenteiset välipohjat	28
5	Vertailutulokset Wufi 2D:llä	29
5.1	Betonin ja olosuhteiden lähtöarvojen luonti	30
5.2	Savi-kiviseoksen materiaaliparametrien luonti	36
5.3	Savi-kiviseoksen materiaaliparametrien varmennus	40
5.4	Kuvitteellinen tilanne, kuivuva välipohja kolmella eri pintarakenteella	43
6	Tulosten analysointi	46

6.1	Tutkimuksen luotettavuus	46
6.2	Tutkimuskysymys 1	49
6.3	Tutkimuskysymys 2	50
7	Yhteenveto	51
8	Pohdinta	53
	Lähteet	56
	Liitteet	
	Liite 1. Rakennekortit	

Sanasto ja lyhenteet

Arvostelusyvyys A	Rakenteen dimensioihin ja ominaisuuksiin perustuva syvyys rakenteessa, josta mitataan sen hetkellistä kosteuspitoisuutta pinnoitettavuuden arviointia varten.
Dataloggeri	Mittauslaitteen tietoa keräävä ja tallentava osa.
Kapillaarinen kosteus	Materiaalin kapillaarisesti siirtämä kosteus.
Kapillaarisuus	Tarkoittaa materiaalin kykyä siirtää vettä ohuissa materiaali-huokosputkissa vaikuttavien kapillaarivoimien vaikutuksesta [1, s. 390].
Kevytsavi	Massaa on kevennetty esimerkiksi oljella. Massan tiheys 300–1200 kg/m ³ [2].
Laiha savi	Massan savespitoisuus 30–50 % [3, s. 27].
Lihava savi	Massan savespitoisuus yli 50 % [3, s. 27].
Lustosavi	Jääkauden aikaansaama savilaji [4, s. 12].
Massiivisavi	Massan tiheys 1700–2200 kg/m ³ [3, s. 11].
Postglasiaalinen savi	Jääkauden jälkeen merivedestä sakkautunut savi [4, s. 12].
Rakennuskosteus	Rakenteissa ennen rakentamista tai sen aikana tullut kosteus, joka ylittää rakenteen tasapainokosteuden [5, s. 2].
Rammed earth	Kuvaa saviseinän valmistustekniikkaa, jossa massiiviseinä valmistetaan savesta voimakkaasti kerroksittain tiivistämällä.
Saves	Savimineraaleista muodostunut lajite.

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

”Savi on köyhien ihmisten ja huonojen aikojen rakennusaine [3, s. 6].” Näin sanotaan Franz Volhardin kirjan - Savirakentaminen - esipuheessa. Kirjassa esiintyvä virke kuvaa hyvin ihmisten ensireaktioita savirakentamiseen liittyen. Savea on käytetty rakentamisessa pitkään, mutta sen käyttäminen on perustunut lähinnä kokemuseräiseen tietoon. Hyvin tehdyt savirakenteet kestävät aikaa todella hyvin ja niiden kunnostaminen on helppoa. Saven tuominen takaisin käytettyjen rakennusmateriaalien joukkoon vaatii materiaalituntemusta enemmän, kuin mitä tällä hetkellä on saatavilla. Jotta saven käyttöä voisi perustella rakentamisessa tulee sen toimivuudesta olla näyttöä ja tutkittua tietoa sekä suunnittelun tueksi olla tarvittavat materiaaliarvot.

Joitakin vuosia sitten arkkitehtitoimisto Collaboratorio Oy ja Vihdin betoni Oy aloittivat kehittämään Suomeen soveltuvaa savesta ja kiviaineksesta sekoitettavaa massaa. Myöhemmin massa nimettiin Luonnonbetoniksi. Tarkoituksena oli vastata ekologisella vaihtoehdolla betonin suureen hiilijalanjälkeen, sekä saada pitkäikäinen ja toimiva rakennusmateriaali teolliseen tuotantoon. Luonnonbetoni-hankkeen ympärillä on toteutettu ja tullessaan toteuttamaan paljon pienempiä tutkimus- ja selvityshankkeita, esimerkiksi saven mikrobiologisesta vaikutuksesta sisäilmaan. Opinnäytetyön asiantuntijakumppanina toimii myös Vahanen Rakennusfysiikka Oy. Vahanen Rakennusfysiikka Oy on myös vuokrannut kokeiden suorittamiseen tarvittavaa kosteusmittauskalustoa yhteistyöhintaan. Vaisala Oy on antanut tukensa tutkimukselle vuokraamalla hankkeelle Vaisalan uusia jatkuvatoimisia kosteusmittareita yhteistyöhintaan. Mittareiden data tallentuu verkon yli Jade Smart Cloud -pilvipalveluun, josta tulokset ovat luettavissa reaaliajassa.

Tämä opinnäytetyö toimii osana Luonnonbetoni-hanketta ja pyrkii selvittämään kiviainekseen sekoitetun saven muodostaman massan vaikutusta teräsbetonisen ja puurankaisen rakenteen kuivumiseen. Työssä toimivat yhteistyökumppaneina Collaboratorio Oy ja Vihdin Betoni Oy. Collaboratorio Oy tukee työn suoritusta tarjoamalla materiaalitietoutta ja käytännön osaamista savirakentamisesta. Vihdin Betoni Oy tarjoaa koepalojen valmistuksen ja tutkimustilan sekä käytännön apua tutkimuksen suorittamiseen. Lisäksi

Collaboratorio Oy ja Vihdin Betoni Oy ovat yhdessä hoitaneet kosteusmittauslaitteiston vuokraukseen liittyvät kustannukset.

1.2 Opinnäytetyön tavoite

Työn tavoite on tutkia kokeellisesti ja laskennallisilla menetelmin savi-kiviseoksen vaikutusta ala- ja välipohjarakenteen kuivumiseen. Työssä pyritään selvittämään ja tarvitta- vilta osin määrittämään savi-kiviseoksen materiaaliarvot rakennusfysikaalisen mallinta- misen toteuttamiseksi. Opinnäytetyö pyrkii vastaamaan kahteen tutkimuskysymykseen: Aiheuttaako rakenteen pinnoitus savi-kiviseoksella merkittävän eron rakenteen kuivumi- seen verrattuna betonilla pinnoittamiseen, ja voidaanko savi-kiviseoksella rakenteen pin- nassa ratkaista kosteusongelmaisen alapohjan ongelmia?

1.3 Opinnäytetyön rajaus ja toteutus

Opinnäytetyön tutkimusosuus rajataan koskemaan uusia teräsbetonisia massiivivälipoh- jia ja sahanpurutäytteisiä puuvälipohjia. Teräsbetonisista välipohjista tutkitaan yhteen ja kahteen suuntaan kuivuvia rakenteita. Yhteen suuntaan kuivuvien rakenteiden koetulok- sia voidaan soveltaa laskentamalleissa alapohjiin. Tutkimuksessa ei toteuteta alapohja- rakenteen koetilannetta.

Tutkimus toteutetaan valettavien koepalojen avulla. Koepalat valetaan välipohjaraken- teissa normaalisti käytettävällä betonilla ja niille toteutetaan samat toimenpiteet kuin työ- maalla toteutettaisiin. Tutkimustilan olosuhteet vastaavat hyvin sääsuojatun työmaan olosuhteita. Koepalat sijaitsevat koko kokeen ajan Vihdin Betonin tiloissa. Käytettävä betoni tilataan toiselta betonitehtaalta kuten se tilattaisiin työmaalle. Puurakenteinen vä- lipohja rakennetaan koetiloissa kuivasta lujuusluokitellusta puusta. Koepalat ovat mitoil- taan noin 0,6 m x 0,6 m. Koepalojen kuivumista seurataan reaaliajassa Vaisalan jatku- vatoimisilla CWL100-dataloggereilla. CWL100-dataloggereihin on yhdistetty Vaisalan HMP110-mittapäät.

Laskennallinen osuus toteutetaan Wufi 2D-ohjelmistolla, joka on rakennusfysikaaliseen mallintamiseen kehitetty mallinnusohjelma. Mallinnukset toteutetaan 2D-tilassa. Saven

materiaaliarvojen haarukointi vaatii suuremman määrän eri mallinnuksia kuin mitä vaatisi mallintaminen täysin tunnetuilla materiaaliarvoilla. Kaikkia tehtyjä mallinnuksia ja välivaiheita ei ole mahdollista esitellä tässä opinnäytetyössä.

2 Savirakentamisen historia

2.1 Savirakennusmenetelmiä

Savimuurausrakentaminen on vanhimpia tunnettuja savirakennusmenetelmiä. Menetelmä muistuttaa hieman tiilestä rakentamista, mutta näitä savitiiliä ei poltettu. Massa valettiin muottiin, jossa sitä puristettiin ja lopuksi ilmakeivattiin. Savitiilen lujuutta lisättiin lisäämällä massaan useimmiten olkisilppua. Lopuksi rakentaminen tehtiin tiilen muurauksen tapaan. Laastina käytettiin savi- tai kalkkilaastia. Kyseistä menetelmää on käytetty esimerkiksi Mesopotamian varhaisten korkeakulttuurien kaupungeissa. [3, s. 11]

Savivalurakentaminen on myös erittäin vanha savirakennusmenetelmä. Sitä on pidetty kehittyneenä menetelmänä nopeutensa ansiosta. Seinät pystytettiin tekemään yhdellä työvaiheella, eikä erilliseen savitiilien muotoiluun ja kuivaamiseen mennyt aikaa. Menetelmässä maakostea savi painettiin muottiin ja sullottiin tiiviiksi. Sullomisesta huolimatta se voitti rakentamisajassa savumuurausrakentamisen. Menetelmää on myöhemmin kehitetty saven muokkauksen ja tiivistämisen koneistamisella. [3, s. 11–12.]

Massiivisavirakentaminen on tyypillinen savirakennusmenetelmä, kun rakenteelta vaaditaan rakenteellista kantavuutta [3, s. 11]. Massiivisaviseinät valmistetaan yleensä 50–70 cm paksuisiksi, jotta massan puristuslujuus riittää kantamaan väli- ja yläpohjarakenteiden kuormat [6]. Massan kuivuessa tasapainokosteuteensa, saavuttaa se jopa 3 N/mm² puristuslujuuden [7, s. 11]. Kylmillä alueilla kuten Suomessa, täytyy rakentaminen aloittaa varhain keväällä, jotta seinät ehtivät kuivua ennen pakkasia. Seinän kuivuttua pakkanen ei enää vaurioita sitä. [6.]

Kevytsavirakentaminen on lähtöisin Saksasta. Siinä liukoista savea sekoitetaan runsaaseen määrään kuitua. Kuidut olivat tavallisimmin olkea tai puupohjaista kuitua. Sekoittamisella saavutettiin kevyempi ja lämpöä eristävämpi massa, ja siitä pystyttiin tekemään

kylmempiin olosuhteisiin soveltuvia rakenteita ilman erillistä lämmöneristettä. Rakenteen puristuslujuus heikkeni verrattuna massiivisavirakenteisiin, joten se soveltui lähinnä itsensä kannattelemiseen. [8, s. 13.]

Savitäyttörakentaminen on menetelmä, jossa rakenteen kantavan osan muodostaa puurakenteet. Kantavien puurakenteiden väliin tehdään rimoista tai pajunoksista ristikko, mikä vuorataan olkisavella. Puupilarien väliin saatettiin myös nostaa savirullia. Savirullat olivat puukapuloiden ympärille käärittyä olkisavea. [3, s. 12–13.]

2.2 Savirakentaminen Saksassa

Saksassa on pääasiallisesti rakennettu saviristikkorakenteita. Massiivisavirakentaminen on ollut huomattavasti harvinaisempaa ja se on keskittynyt lähinnä tietyille alueille 1700-luvun lopun ja 1800-luvun puolivälin väliselle ajalle. Saviristikkorakentaminen on ollut pääasiallinen rakennustapa aina 1800-luvun loppuun asti. [3, s. 14.]

2.3 Savirakentaminen Suomessa

Suomessa on havaittu arkeologisissa tutkimuksissa, että savea on käytetty rakennusmateriaalina ainakin jo kivikautisissa asumuksissa. Varsinainen savirakentaminen on alkanut 1800-luvun vaihteessa. Tieto perustuu arkkitehti F. Cointreauxin kirjoituksiin. Savirakentaminen keskittyi massiivirakentamiseen savesta ja hiekasta sekoitetun massan avulla. Tekniikkana käytettiin valumenetelmää. Myös hirsiseinien sisäpintoja on perinteisesti rapattu savella. [3, s. 9.]

Yksi Suomen vanhimmista olemassa olevista savirakennuksista on nykyisin Strömforsin ruukin majatalo. Tällä hetkellä yksityisessä omistuksessa oleva Krouvinmäen rakennus on rakennettu vuonna 1784. [9.]

3 Savi

Savi on erittäin pitkään käytetty rakennusmateriaali. Syyriasta on kaivettu maan sisältä esiin jopa 10 000 vuotta vanhoja savirakennuksia [10, s. 56]. Polttamattomana käytetyn saven lujittuminen perustuu pelkästään massan kuivumiseen. Tästä syystä se on täysin uudelleenkäytettävää. Savesta valmistettu rakennus palaa alkuperäisessä muodossaan luonnon kiertokulkuun, jos se jätetään sateen armoille. Savesta tehtyjä rakenteita voidaan myös purkaa ja massa voidaan käyttää uudestaan toisessa rakennuskohteessa. Savi lujittuu peruuttamattomasti vasta 600 °C:ssa, jolloin savikiteen pintoihin kemiallisesti sitoutunut vesi haihtuu. [3, s. 10–11, 28.]

Savirakentamisen uudelleentuleminen liittyy luultavasti pääasiassa sen ekologisuuteen. Rakennetun ympäristömme kuormitus luonnolle on suuri, ja kaikki sitä pienentävät teot ovat tarpeellisia. Läheltä kaivettu savi ja kiviaines sekoitettuna, muodostavat rakennusmateriaalin, jonka kuormitus ympäristölle on lähes olematon. Lisäksi se on täysin uusiokäytettävää. [7, s.10–11]

3.1 Saven ominaisuudet

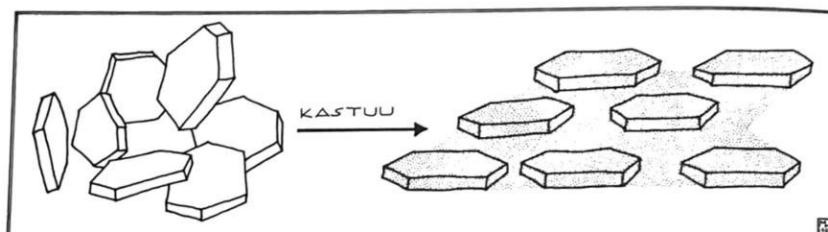
Savi on maalajien hienoin aines. Savilajite on savimineraaleista muodostunut lajite, eli saves. Sen rakeiden läpimitta on alle 2 µm. Geoteknisen luokituksen mukaan saveksi kutsutaan maalajia, jossa savesta on yli 30 %. Saveshiukkaset ovat liuskemaisia hiutaleita, joiden välissä on vettä saven normaaliolosuhteissa. Siitä syystä märkä savi on vetelää ja muovailtavaa. Savea muodostuu, kun maalajit saostuvat hidastuvassa vesivirrassa. Maalajit pysähtyvät raekokonsa mukaan suuruusjärjestyksessä. Ensin pysähtyvät kivet, sorat, hiekat, siltit ja viimeisenä savi. Tästä syystä savi päätyy saostumisvaiheessa yleensä meren tai järven pohjaan. Maanpinnan noustessa jääkauden jälkeen tulevat savikot esiin homogeenisina yhtenäisinä alueina. Saven kuivuessa saveshiukkasten välissä kitkaa pienentävä vesi poistuu ja savi alkaa stabiloitua. Saven puristuslujuus lisääntyy sen kuivuessa, koska liuskeiden välinen kitka kasvaa. Saven puristuslujuus kuivana vaihtelee 1–4,5 MPa välillä [10, s. 62]. Se vastaa melko tarkkaan puun puristuslujuutta syitä vastaan, mikä on tilanne esimerkiksi hirsirakennuksissa. C24-luokitellun puumateriaalin laskennassa käytetty puristuslujuus syitä vastaan on 2,5 MPa [11, s. 17].

Hirsirakennuksessa materiaalin oma kuorma on kuitenkin pienempi. Taulukossa 1 on esitetty suomalaisen saven keskimääräinen kemiallinen koostumus. [3, s. 27.]

Taulukko 1. Suomalaisen saven keskimääräinen kemiallinen koostumus [3, s. 27].

Yhdiste	Keskiarvo [%]
SiO ₂	58,67 %
Al ₂ O ₃	16,60 %
Fe ₂ O ₃	5,42 %
FeO	2,95 %
MnO	0,11 %
MgO	2,81 %
CaO	2,17 %
Na ₂ O	2,65 %
K ₂ O	3,27 %
H ₂ O	3,31 %
TiO ₂	0,69 %
P ₂ O ₅	0,36 %
Cl	0,01 %
SO ₃	0,19 %
S	0,14 %
Orgaaninen aines	0,87 %

Saven lujuusominaisuudet heikkenevät merkittävästi sen kastuessa. Märässä savessa sen litteät liuskeet ovat järjestäytyneenä ja niiden välinen kitka on pienempi. Kuiva savi on haurasta ja sitä kasteltaessa ei saven muovattavuus synny heti. Kuitenkin ajan kuluessa liuskeet järjestäytyvät itsekseen ja muovattavuus palautuu. Kuvassa 1 on havainnollistettu kiteiden järjestäytymistä saven kastuessa.



Kuva 1. Saven kiteiden järjestäytyminen saven kastuessa. [10, s. 62.]

3.2 Savilajit ja niiden esiintyminen

Suomessa esiintyy pääasiassa kahdella eri tavalla muodostunutta savea. Varhaisemmat savet ovat muodostuneet jääkauden aikana jään irrottaessa kalliosta moreenia, josta hienoaines on huuhtoutunut meren pohjaan. Savi esiintyy pääasiassa kerroksellisena ja niistä on havaittavissa eri vuodenaikojen vaihtelut. Jääkauden aikaansaamaa savea kutsutaan lustosaveksi. Jääkauden jälkeen muodostuneita saviesiintymiä kutsutaan postglasiaaliksi saviksi. Ne ovat lustosavia tasalaatuisempia. Suomen postglasiaalisia savia on syntynyt huuhtoutumalla lustosavista ja Itämerestä sakkautumalla. Sakkautumista on aiheuttanut Itämeren suolapitoisuuden muutokset. Suolapitoisuuden ollessa korkea, savi sakkautuu meressä ja vajoaa pohjaan. [4, s. 12.]

Hienorakeiset maalajit voidaan geologisen maaluokituksen mukaan jakaa kolmeen ryhmään [3, s. 27]:

- Lihavat savet, savesta yli 50 %
- Laihat savet, savesta 30–50 %
- Saviset siltit, savesta alle 10–30 %.

Savityyppejä on useita ja ne viittaavat saveen syntymekanismiin. Niiden ominaisuudet eroavat toisistaan, minkä vuoksi niiden tunnistaminen on tärkeää. Alla on esitelty ensiksi eurooppalaisia savilajeja ja niiden jälkeen Suomessa esiintyviä savilajeja.

Euroopassa esiintyviä savilajeja

- Vuorisavi on rapautunut perus- tai sedimenttikalliosta ja kerrostunut niiden päälle. Vuorisavi voi olla pyöreärakeista, tai kulmikasta kivimurskaa riippuen materiaalista, josta se on muodostunut. Saviliuskeesta tai hiekkakivestä muodostuneet rakeet ovat pyöreitä. Gneissistä, sveniitistä tai peruskalliograniitista hioutunut savi on kulmikasta kivimurskaa, jonka rakeisuus kasvaa syvemmälle mentäessä.

Vuorisavea esiintyy pääasiassa vuoristoisilla alueilla, mutta sitä löytyy myös Euroopan tasangoilta. [3, s. 29.]

- Jyrkännesavi on vuorisavea, joka on valunut alaspäin [3, s. 29].
- Liuossavi on sekoitus vanhoja savia. Sen ominaisuudet eivät kelpaa rakentamiseen, jos väri on tumma ja haju viittaa humukseen. [3, s. 29.]
- Vaalea merkeli on kalkkipitoista savea. Sitä on syntynyt jääkauden aikana Saksan keskivuoriston reunaan. Rakentamiskelpoisuus riippuu saven kalkkipitoisuudesta. Liiallinen kalkkipitoisuus voi estää sen käytön rakentamisessa. [3, s. 29.]
- Lössisavi on ruskehtavaa ja se syntyy, kun lössistä liukenee kalkki pois. Lösssi on keltaista hiekkaa, joka on muodostunut savesta ja kalkista. Lössisavi on erittäin hienorakeista ja sen savipitoisuus on melko pieni. [3, s. 29.]

Etelä-Suomen ja rannikoiden savikot ovat pääasiassa muodostuneet kahden viimeisimmän jääkauden aikana ja ovat verrattain nuoria. Niiden erot ovat havaittavissa lähinnä suolapitoisuudessa ja mineraalikoostumuksessa. Savia voidaan lajitella lihavuusasteen ja värisävyjen suhteen. Värierot johtuvat savessa olevien rautayhdisteiden hapettumiseroista. [3, s. 29.]

Suomessa esiintyviä savilajeja

- Pohjaveden pinnan alla sijaitsevat savikerrokset eivät ole päässeet hapettumaan ja niitä kutsutaan sinisaveksi tai tinasaveksi [3, s. 29].
- Harmaasavi tai kuorisavi esiintyy pohjaveden pinnan yläpuolella ja siinä olevat rautayhdisteet ovat hapettuneet [3, s. 30].

3.3 Luonnonbetoni

Opinnäytetyön ajavana voimana on ollut Luonnonbetoni-hanke. Tämän työn myöhemmissä luvuissa Luonnonbetonia kutsutaan savi-kiviseokseksi väärinkäsitysten välttämiseksi. Työssä kuitenkin pyritään selvittämään nimenomaan Luonnonbetonin materiaaliominaisuuksia.

Luonnonbetoni on savesta ja kiviaineksesta sekoitettu massa, joka puristetaan tai tärytetään tiiviiseen muotoon ja saadaan aikaan haluttu rakenne. Materiaalin valmistuksessa ei nimestä huolimatta käytetä lainkaan sementtiä. Sen hiilijalanjälki on huomattavasti betonia pienempi ja se on täysin uusikäyttävää [10, s. 59]. Tilaan tehty Luonnonbetoni-lattia voidaan kaapia irti ja asentaa seuraavaan kohteeseen. Purkutyön jälkeen massaan lisätään vettä, ja sekoitetaan uudestaan levitettäväksi. Levittämisen ja tiivistämisen jälkeen pinta suljetaan esimerkiksi pellavaöljyvahalla. Vaha antaa pinnalle lujuutta ja mahdollistaa sen helpon puhdistuksen. Luonnonbetoni-lattia on myös täysin korjattavissa ilman järeitä saneeraustoimenpiteitä. Pintaa voidaan muovata ja paikata koska tahansa valmistuksen jälkeen. [12.]

Luonnonbetonin valmistus on hyvin käytännönläheistä, eikä sen valmistuksesta aiheudu hiilidioksidipäästöjä. Ainekset sekoitetaan sopivassa suhteessa ja sekoitusvaiheessa valmiin pinnan ulkonäköön voidaan vaikuttaa esimerkiksi kiven raekoolla ja värillä. Valmiit pinnat muistuttavat hieman hiottua ja värjättyä betonia, mutta tuntuma on lämpimämpi ja pehmeämpi. Kuvassa 2 näkyy Luonnonbetonin valmistusta Vihdin Betonin tuotantotilassa.



Kuva 2. Luonnonbetonin valmistus käynnissä Vihdin betonin tuotantotilassa. Valokuva: Sampsa Raevaara (2021).

Luonnonbetonilla saadaan hyvin monipuolisesti toteutettua erinäköisiä pintoja ja rakenteita. Saven sävyt ja kiviaineksen muoto, sekä väri näkyvät hienosti valmiissa pinnassa, koska sitä ei tarvitse pinnoittaa peittävällä pinnoitteella. Pelkkä vahakäsittely riittää, ja se ei peitä rakenteen värejä tai muotoja. Luonnonbetonista voi tehdä ala- ja välipohjien pintarakenteiden lisäksi maanvaraisia alapohjia, seiniä tai vaikka pöydän kokonaan ilman betonia. Vain mielikuvitus on rajana. Kuvassa 3 näkyy esimerkkejä seoksista. Ulkonäössä on paljon samaa kuin hiotussa betonissa. Lisää tietoa Luonnonbetonista löytyy osoitteesta luonnonbetoni.fi. [12.]



Kuva 3. Esimerkkejä Luonnonbetonin seoksista [12].

4 Testirakenteet

Kosteusmittauksia varten suunniteltiin koerakenteita ja niistä piirrettiin rakennetyypit. Alkuperäisenä tarkoituksena oli valmistaa 16 eri rakennetta, joista 14 olisi betonirakenteisia ja kaksi puurakenteisia. Neljä betonirakenteisista oli tarkoitus olla O37-ontelolaattarakenteella, mutta toimitusvaikeuksien vuoksi nämä jäivät pois. Toteutuneet rakenteet on esitetty taulukossa 2. TRx tarkoittaa testirakennetta, joissa pintamateriaalina on savi-kiviseos. VRx tarkoittaa vertailurakennetta, ja pintamateriaalina on lattiabetoni. Testi- ja vertailurakenteen samat numerot tarkoittavat, että niiden kantava rakenne ja rakenne-paksuudet ovat vastaavat.

Taulukko 2. Suunnitellut testi- ja vertailurakenteet. Yliviivattuja rakenteita ei toteutettu.

Tunnus	Kuvaus
TR1	Ontelolaatta 037 + 20 mm pintasavi, VP-rakenne
VR1	Ontelolaatta 037 + 20 mm lattiabetoni, VP-rakenne
TR2	Ontelolaatta 037 + 50 mm pintasavi, VP-rakenne
VR2	Ontelolaatta 037 + 50 mm lattiabetoni, VP-rakenne
TR3	Massiivilaatta 260 mm + 20 mm pintasavi, VP-rakenne
VR3	Massiivilaatta 260 mm + 20 mm lattiabetoni, VP-rakenne
TR4	Massiivilaatta 260 mm + 50 mm pintasavi, VP-rakenne
VR4	Massiivilaatta 260 mm + 50 mm lattiabetoni, VP-rakenne
TR5	Massiivilaatta 260 mm + 100 mm pintasavi, VP-rakenne
TR6	Massiivilaatta 260 mm + 20 mm pintasavi, AP-rakenne
VR6	Massiivilaatta 260 mm + 20 mm lattiabetoni, AP-rakenne
TR7	Massiivilaatta 260 mm + 50 mm pintasavi, AP-rakenne
VR7	Massiivilaatta 260 mm + 50 mm lattiabetoni, AP-rakenne
TR8	Massiivilaatta 260 mm + 50 mm pintasavi + pintakäsittely, VP-rakenne
TR9	Puurankalattia + 50 mm pintasavi, VP-rakenne
VR9	Puurankalattia + 50 mm lattiabetoni, VP-rakenne

Testirakenteet TR5 ja TR8 ovat ylimääräisiä testirakenteita. Niille ei ole vertailurakenteita. Testirakenteessa 5 testattiin paksumman savipinnan vaikutusta rakenteen kuivumiseen. Vastaavasti kantava massiivibetonilaatta oli hieman ohuempi. Testirakenteessa 8 testattiin pintasaven lopullisen pintakäsittelyn vaikutusta rakenteen kuivumiseen.

4.1 Testirakenteisiin liittyvä teoria

Betonirakenteisiin välipohjiin liittyvä rakennusfysiikka on laboratorio-olosuhteissa melko suoraviivaista, vaikka todellisuudessa sen laskeminen saattaa olla monimutkaista. Laskemisen vaativuus johtuu tarkkojen materiaaliarvojen määrittämisen vaikeudesta. Käytön aikaisessa tilanteessa välipohjat ovat pääasiassa tasaisessa lämpötilassa, eikä niihin kohdistu suuria kosteusrasituksia. Välipohjien kosteusrasitus johtuu pääasiassa rakentamisen aikaisesta rakennuskosteudesta sekä vikatilanteiden aiheuttamasta ylimääräisestä kosteudesta. Lisäksi välipohjia kuormittaa sisäilman kosteus, joka voi olla märkätiloissa ajoittain suurta. Pysyvämpää suurta sisäilman kosteutta saattaa esiintyä esimerkiksi uimahalleissa, pesuloissa tai muissa tuotantotiloissa.

Suurimmat haasteet betonirakenteisten välipohjien kanssa esiintyvät yleensä rakennuskosteuden, sekä vesivaurioiden jälkeisen kuivatuksen yhteydessä. Betoni sisältää valun jälkeen suuren määrän kosteutta, joka tulee kuivattaa riittävän kattavasti, jotta rakenne voidaan pinnoittaa. Kuivatustarve riippuu käytettävästä pintamateriaalista ja mahdollisesti herkemmin vaurioituvista liittyvistä rakenteista. Rakenteen kuivumisnopeus riippuu vahvasti käytetyn betonin vesi-sementtisuhteesta ja kuivumisen aikaisista olosuhteista. Mitä pienempi käytetyn betonin vesi-sementtisuhte on, sitä lujempaa ja tiiviimpää se on. Betonin vedenläpäisykyky heikkenee betonin kuivuessa. Betonirakenteisiin saatetaan lisätä jälkihoitovaiheessa lisää kosteutta, tai ne saattavat olla sään armoilla lujittumisen alkuvaiheessa. Ontelolaattarakenteissa saattaa olla lunta tai jäätä onteloissa asennusvaiheessa. Rakenteen lämmitessä sulamisvedet jäävät onteloon, jos niille ei ole poisto-reikiä tehtynä. Kokonaisuutena tästä saadaan melko monimutkainen yhtälö, jonka laskennallinen ennustaminen on vaikeaa. [1, s. 117–118.]

Betonirakenteille on kehitetty kosteudenmittausohjeita, joiden avulla pyritään varmistamaan rakentamisen aikana, ennen pinnoitusta, että rakenne on tarpeeksi kuiva ja turvallista pinnoittaa. Kosteuden mittaaminen on mahdollista tehdä usealla eri menetelmällä, ja mittausmenetelmän valinnassa tulisi huomioida menetelmien erityispiirteet. Ohjeissa on esitetty oikeat mittaustekniikat, mittausapojen erityispiirteet ja mittauksiin liittyvät epävarmuustekijät. Ei ole toistaiseksi olemassa luotettavaa pintaa rikkomatonta mittausmenetelmää, jota voisi käyttää rakentamisessa. [1, s. 117–118.]

Betonirakenteisissa alapohjissa rakennusfysiikka muuttuu hieman välipohjia monimutkaisemmaksi. Rakennuksen sisäilman puolella tilanne on välipohjia vastaava. Käytetyt pintamateriaalit ja sisäilman kosteus vaikuttavat rakenteen toimintaan ja käyttäytymiseen. Rakenteen toisella puolella on maa, jonka olosuhteet vaihtelevat ulkoisten tekijöiden sekä alarakenteen ominaisuuksien mukaan. Alapohjan lämmöneristävyyden ja sisäilman lämpötila vaikuttavat maapohjan lämpötilaan pitkällä aikavälillä. Huonommin eristetty rakenne läpäisee lämpöenergiaa maahan, ja maan lämpötila rakennuksen alla nousee. Rakenteen alla olevan perusmaan rakeisuus vaikuttaa mahdolliseen kapillaarisesti nousevaan kosteuteen. [1, s. 151–157.]

Salaojitukset, pintamaiden muotoilut ja pohjavesi vaikuttavat maapohjan kosteustasapainoon. Maapohjassa esiintyy normaalitilanteessa vettä kahdessa eri muodossa.

Pohjavedet, sulamisvedet tai muut virtaavat vedet esiintyvät maatyössä nestemäisessä muodossa. Niiden yläpinnan korkeusasema vaihtelee vuodenaikojen mukaan ja salaojitukset sekä pumppaamot pyrkivät rajoittamaan niiden yläpinnan tasoa nousemasta haitallisen korkealle. Nestemäisen veden lisäksi maatyön ilmahuokosissa esiintyy kosteutta vesihöyrynä. Nykyisen tietämyksen mukaan suhteellisen kosteuden oletetaan olevan jatkuvasti RH 100 % maatyön ilmahuokosissa. Tästä syystä alapohjan eristäminen alentaa rakenteen kosteusrasitusta merkittävästi. Rakenteen eristäminen alentaa maatyön lämpötilaa, mikä vastaavasti alentaa ilman absoluuttista kosteutta. Alapohjan tiiviit pintamateriaalit ovat riskirakenteita, jos alapohjassa ei ole riittävää lämmöneristystä, kapillaarisen nousun estävää maakerrosta ja riittävää pohja- ja hulevesien hallintaa. [1, s. 151–157.]

4.2 Koejärjestelyt

Koetta varten valmistettiin koerakenteita eri rakennekerroksilla. Betonirakenteet valettiin vanerista ja höyrynsulkumuovista valmistettuihin muotteihin. Betonina käytettiin tavanomaista rakennebetonia. Betonin tarkkaa reseptiä ei saatu käyttöön. Tyypillinen sisäkäyttöön tarkoitettu rakennebetoni on lujuudeltaan C30/37, sen suurin raekoko on 16 mm ja rasitusluokka XC1. Rasitusluokan XC1 betoni soveltuu jatkuvasti kuiviin, tai jatkuvasti märkiin rakenteisiin, esimerkiksi vedenalaisiin rakenteisiin. Höyrynsulkumuovilla varmistettiin, ettei kuivumista tapahdu testiä häiritseviin suuntiin. Koska koerakenteiden sivumitat olivat noin 60 cm molempiin suuntiin, täytyi muotin sivut pinnoittaa sisäpuolelta höyrynsulkumuovilla. Todellisessa väli- tai alapohjarakenteessa ei tapahdu kuivumista sivusuuntiin rakenteen keskialueella. Alapohjarakenteita simuloitiin muotin pohjalle asennettavalla höyrynsulkumuovilla ja vanerilla. Välipohjarakenteissa pohja oli kuivumistilanteessa avoin. Koerakenteet valettiin pöydällä, josta ne nostettiin puurakenteiselle kuivumisalustalle. Puualustan katsottiin vaikuttavan mittaustuloksiin vähäisesti. Kuvassa 4 näkyy koepaloja kuivumassa Vihdin Betonin tuotantotilassa.

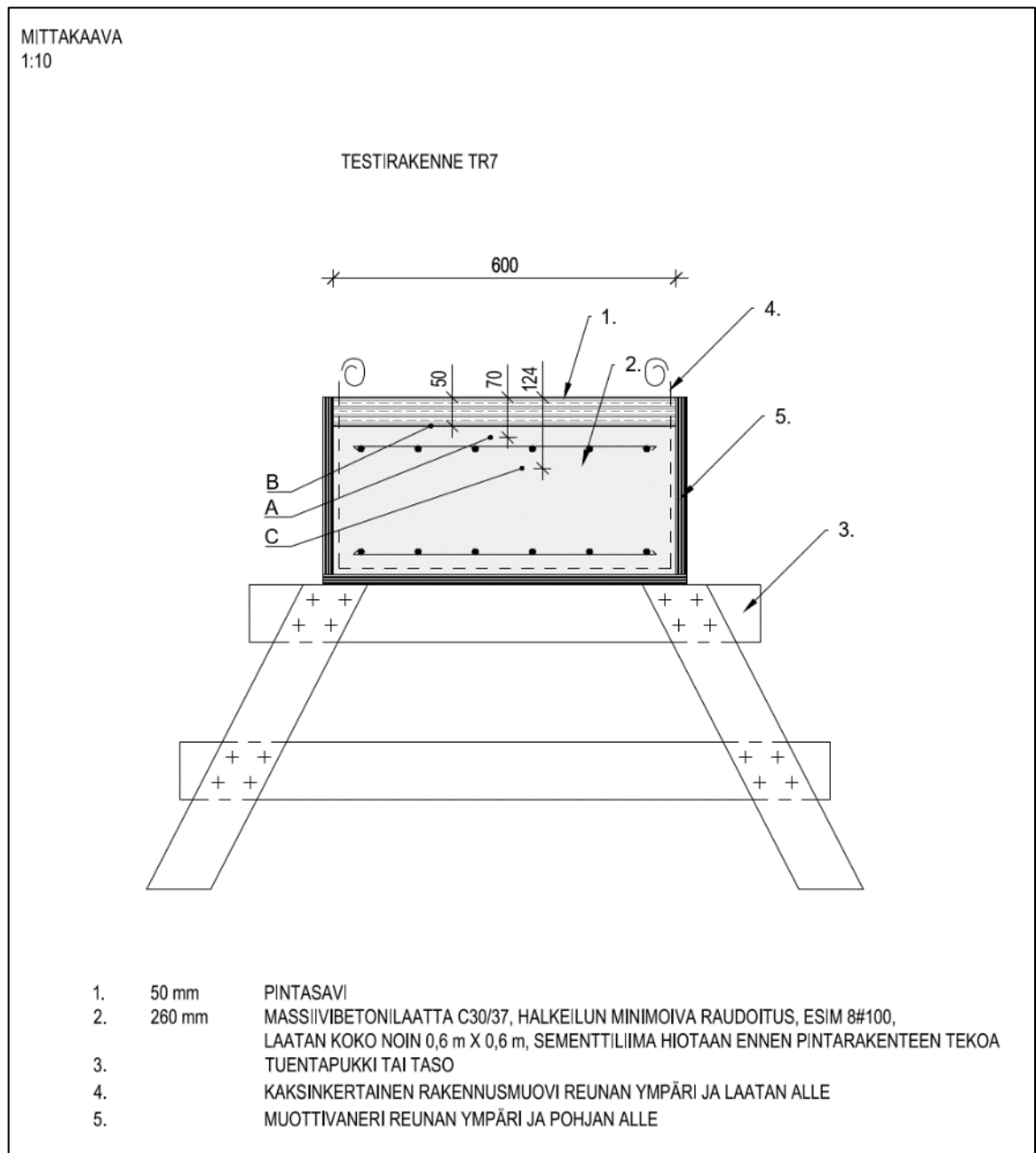


Kuva 4. Koepaloja kuivumassa Vihdin Betonin tuotantotilassa. Valokuva: Sampsu Raevaara (2020).

Rakennekortit koostuivat yleisistä ohjeista sekä jokaiselle rakenteelle tehdystä rakennetyypistä. Jokainen rakenne valmistettiin sille tehdyn rakennetyypin mukaisesti. Tutkimusta varten tehdyt rakennekortit on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1. Yleisissä ohjeissa kerrottiin esimerkiksi rakenteen valmistuksesta ja kosteusmittauksista. Rakenteen kantava osa jälkihoidettiin ensin kastelemalla ja sitten peittämällä muovilla kahden viikon ajan. Jälkihoidon jälkeen pinnasta hiottiin sementtiliimat pois ja asennettiin pintakerrokset.

Rakenteiden kosteusmittaukset suoritettiin pääasiassa Vaisalan jatkuvatoimisilla kosteusantureilla porareikämittausperiaatteella. Näytepalamittauksia ei tehty. Tutkimuksessa päästiin testaamaan Vaisalan uutta Jade Smart Cloud -palvelua, joka mahdollisti jatkuvatoimisen kosteus seurannan pilvipalvelussa. Tilaan tuli asentaa verkkoyhteys, johon Vaisalan CA10 Cloud Access Point -tukiasema liittyi. CA10-tukiasema keräsi mittausdataa kaikilta langattomasti toimivilta CWL100 Wireless data -loggereilta, joihin oli liitetty Vaisala HMP110 -mittapäät. Koska langattomia verkon yli tallentavia mittapäitä oli rajallinen määrä, niiden käyttö keskitettiin rakenteiden mittapisteesiin A. Mittapiste A määriteltiin jokaiselle rakenteelle erikseen arvostelusyvyydelle A, joka on rakenteen kosteus pitoisuuden mittaukseen käytettävä mittaussyvyys, kun rakenteen pinnoitettavuutta

arvioidaan. Kuvassa 5 on esimerkki koerakenteiden rakennetyypistä. Rakennetyypissä on esitetty rakenteen mitat, käytettävät materiaalit, kosteusmittauksien syvyydet ja niiden tunnuksat. TR7 on testirakenne, joka yhteen suuntaan kuivuva rakenne 50 mm:n savi-kiviseospinnalla. Rakenne vastaa alapohjarakennetta, koska sen kuivuminen alaspäin on estetty. Tämän rakenteen vertailurakenne on VR7, jossa savi-kiviseospinta on vaihdettu lattiabetoniin.



Kuva 5. Rakennetyyppi testirakenteesta TR7.

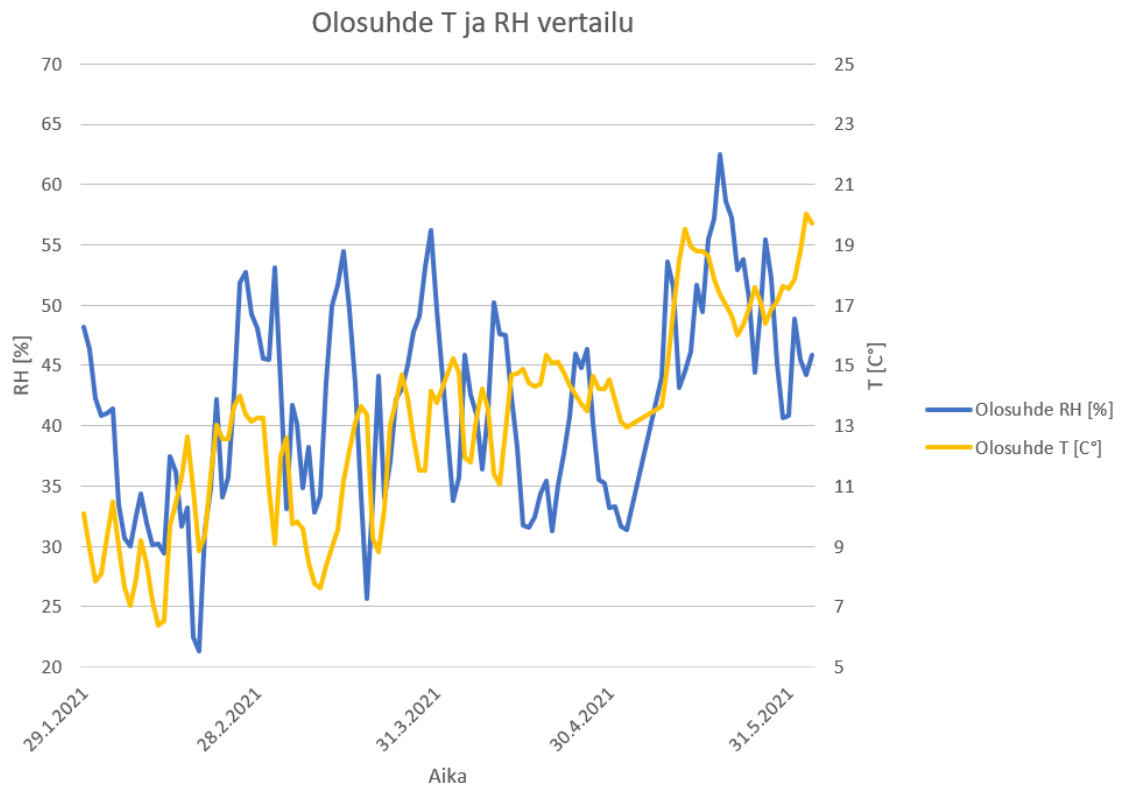
Muista mittapisteistä (B ja C) oli varauduttu tekemään kertamittauksia rakenteen kosteusprofiilin muodostamiseksi. Kertamittaukset kuitenkin jäivät koejakson aikana suunniteltua vähäisemmiksi. Koetilan olosuhteita seurattiin koko tutkimuksen ajan yhdellä jatkuvatoimisella CWL100-loggerilla. Olosuhdeseuranta on ensiarvoisen tärkeä osa tulosten analysoinnin kannalta.

Suunnitellut mittapisteet tehtiin kaikki tutkimuksen alussa. Kaikki syvyydet porattiin, imuroitiin, putkitettiin ja tulpattiin samalla käynnillä. Mittapisteiden tekemisessä noudatettiin RT 14-10984 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus -ohjekortin periaatteita. Kortti on sittemmin päivittynyt korttiin RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. Jatkuvatoimiset anturit asennettiin putkiin ja putkien suut, sekä rakenteiden ja putkien rajakohdat tiivistettiin sinitarratyypisellä kitillä. B- ja C- mittapisteet suljettiin kitillä odottamaan kertamittauksia. Putkien paikkoja ei vaihdettu testijakson aikana, eli uusia porauksia ei tehty myöhemmin. Kuvassa 6 näkyy VR6-rakenteen valmiit mittapisteet. Mittapisteeseen A on asennettu HMP110-anturi.



Kuva 6. VR6 rakenteen mittapisteet asennettuna. Valokuva: Sampsa Raevaara (2020).

Tilassa mitattiin sisäilman olosuhdetta 29.1.2021 – 4.6.2021 välisenä aikana. Mittaus suoritettiin Vaisalan pilvipalveluun yhdistetyillä mittapäillä. Tilan olosuhteet olivat haastavat kokeen kannalta. Olosuhteet simuloivat hyvin rakennustyömaan olosuhteita, mutta samalla tekivät testijakson alkupään mittauksista epäluotettavia. Porareikämittauksen hyväksytyt olosuhteet on käsitelty luvussa 4.2. Kuvassa 7 on esitetty koetilan lämpötila ja suhteellinen kosteus ajan funktiona.



Kuva 7. Koetilan lämpötila ja suhteellinen kosteus ajan funktiona.

4.3 Mittaustulokset

Mittaustuloksilla pyrittiin selvittämään savi-kiviseoksen vaikutus rakenteen kuivumiseen, ja miten se näkyy rakenteiden kuivumisajoissa. Rakenteiden kuivumisolosuhteet vastasivat hyvin todellista tilannetta rakennustyömaalla. Tutkimuksen alkuvaiheessa tilan lämpötila oli hyvin alhainen, mikä aiheutti ongelman mittauksien luotettavuuden kanssa. Rakenteen lämpötilan tulisi olla porareikämittauksissa +18 °C - +25 °C, jotta tulos on

tarpeeksi luotettava päällystettävyyssmittauksiin [13, s. 5]. Tilan kuivumisolosuhteissa olisi pitänyt oikeaoppisesti käyttää mittausmenetelmänä näytepalamittausta. Näytepalamittaus ei kuitenkaan sopinut tutkimukseen, koska koepalat olivat pieniä, eikä mittauksia olisi saatu tarpeeksi. Suuresta rakenteesta voidaan ottaa useita näytepalamittauksia niin, että paikkaa vaihdetaan tarpeeksi jokaisen mittauskerran välillä. Näin pienissä tutkimuskappaleissa se ei ole mahdollista.

Mittaustuloksia ei ole tallessa kuivumisjakson alkupäästä. Tulosten häviäminen johtuu käyttäjän virheestä liittyen Vaisalan CWL100 Wireless data -loggereihin. Opinnäytetyöntekijä oli aluksi siinä luulossa, että kuukauden tallentava muisti on mittapäihin liitettävissä mittauslaitteissa. Kuitenkin myöhemmin ilmeni, että tietoja keräävä laite on pilvipalveluunkin yhteydessä oleva Vaisalan CA10 Cloud Access Point -tukiasema. Tämä olisi toki kytketty heti käyttöön, jos asia olisi ollut tiedossa. Tukiasema kuitenkin jätettiin alussa kytkemättä, koska tilan internetyhteys ei ollut vielä kytkettynä. Tutkimustulosten kannalta aivan alkupään mittaustulosten katoaminen ei ole kovin merkittävää.

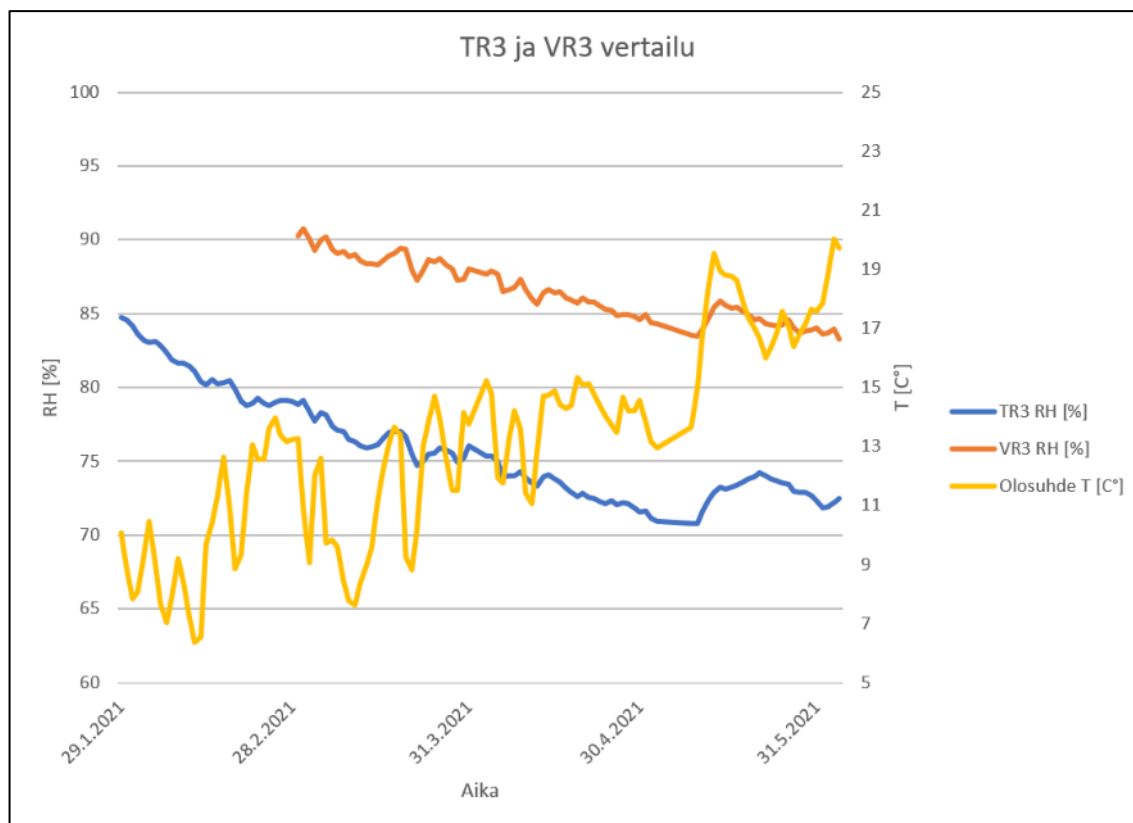
Kaikki koepalojen rungot valettiin samaan aikaan. Valupäivä oli 26.11.2020. Pintarakenteet asennettiin 3.12.2020. Kosteusmittauspäät asennettiin 9.12.2020. Jälkihoito ei kestänyt ohjeissa esitettyä kahta viikkoa, vaan se lyhennettiin noin viikkoon.

4.3.1 Kahteen suuntaan kuivuvat teräsbetonivälipohjat

Yhteen suuntaan kuivuvia teräsbetonivälipohjia oli yhteensä kuusi kappaletta. Näistä TR5- ja TR8-rakenteilla ei ollut vertailurakenteita.

Koerakenteissa TR3 ja VR3 oli 260 mm paksu massiivibetonilaatta. Niiden kuivuminen sivusuunnassa oli estetty kaksinkertaisella höyrynsulkumuovilla. Rakenteet olivat kahteen suuntaan kuivuvia, eli ne kuvastivat välipohjarakenteita. TR3-rakenteessa oli pintarakenteena 20 mm paksu savi-kiviseos. Savi-kiviseosta ei pinnoitettu lopullisella pinnoitteella, esimerkiksi vahalla. VR3-rakenteen pintarakenteena oli kuituvahvistettu sementtipohjainen tasoite. Rakenteiden rakennetyypit on esitetty liitteessä 1.

Kuvassa 8 on esitetty TR3- ja VR3-rakenteiden suhteellinen kosteus syvyydellä 52 mm ajan funktiona. Mittaussyvyys vastaa rakenteen arvostelusyvyyttä A [13, Liite 3].



Kuva 8. TR3 ja VR3 kosteuspitoisuus mittapisteessä A, sekä sisäilman olosuhde ajan funktiona.

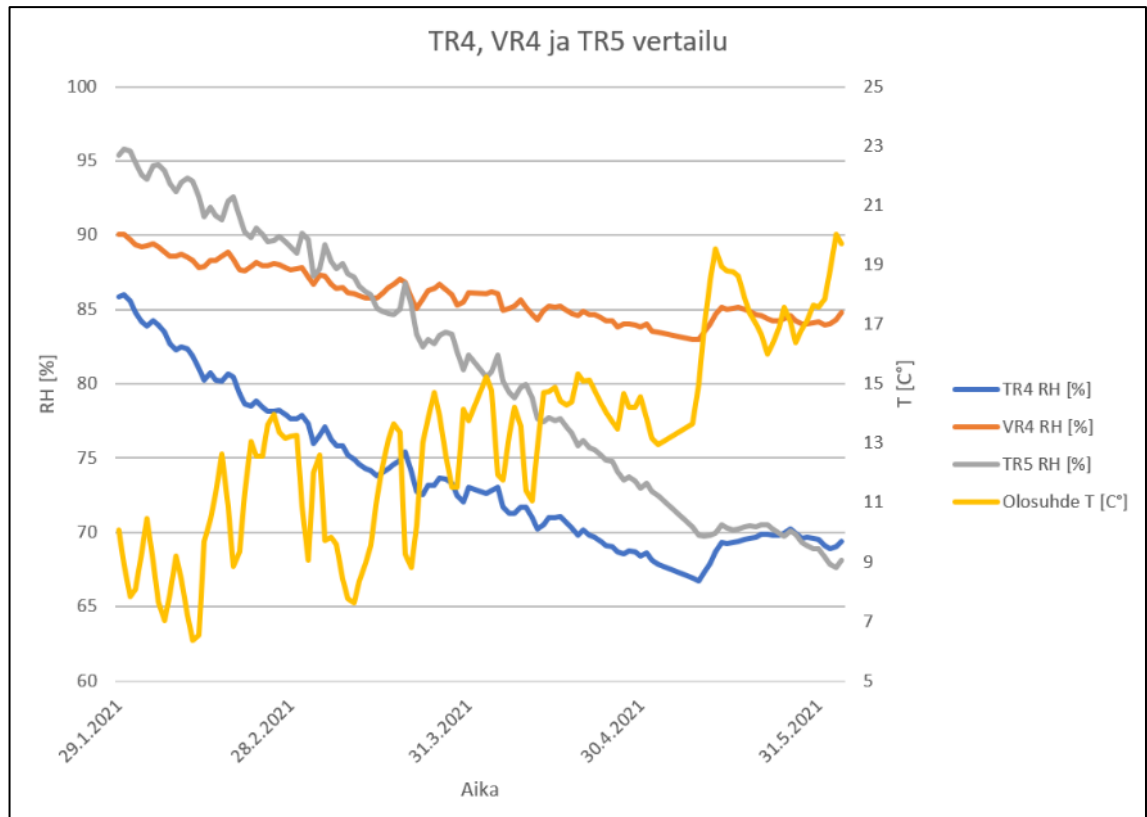
Sisäilman olosuhteet ovat kuivumisjakson alkupäässä viileitä. Kylmin mitattu lämpötila mittausjakson aikana on +6 °C. Koepalojen yhteinen mittausjakso alkaa 1.3.2021. Testirakenteen TR3 keskimääräinen kosteus mittapisteessä A 1.3.2021 on RH 79 %, kun vertailurakenteen VR3 vastaava arvo on RH 90 %. Ero pysyy mittausjakson aikana melko samana. Mittausjakson loppupäässä 4.6.2021 testirakenteen TR3 RH on 72 % ja VR3 RH on 83 %. Molempina tarkasteluhetkinä koepalojen kosteusmittaustuloksissa on 11 prosenttiyksikön ero.

Mittausjakson alkupään tuloksia ei voida pitää luotettavina, koska olosuhteet ovat liian kylmät porareikämittauksille. Niiden keskinäinen suhde on kuitenkin vertailukelpoinen, ja se osoittaa savi-kiviseospintaisen rakenteen olevan jatkuvasti kuivempi samalla syvyydellä. Mittausjakson loppupäässä sisäilman olosuhteet ovat lämmenneet porareikämittauksille sopivaan lämpötilaan. Näin ollen myös viimeistä tulosta voidaan pitää luotettavana. Molemmista rakenteista on mitattu kosteus 100 mm:n syvyydeltä kertamittauksella 4.6.2021. TR3 testirakenteen kosteus syvyydellä 100 mm oli RH 86,7 %, ja VR3

vertailurakenteen vastaava arvo oli RH 88,9 %. Näin syvällä rakenteessa kuivuminen on hidasta ja 2,3 prosenttiyksikköä kuivempi rakenne 100 mm:n syvyydellä tarkoittaa pinnoitettavuudessa viikkoja aikaisempaa pinnoitettavuutta.

Koerakenteissa TR4 ja VR4 oli 260 mm paksu massiivibetonilaatta. TR5 oli ylimääräinen testirakenne, jossa testattiin paksumman savikerroksen vaikutusta kokonaisuuteen. Siinä oli ohuempi 210 mm paksu kantava rakenne. Kaikkien rakenteiden kuivuminen sivusuunnassa oli estetty kaksinkertaisella höyrynsulkumuovilla. Rakenteet olivat kahteen suuntaan kuivuvia, eli ne kuvastivat välipohjarakenteita. TR4-rakenteessa oli pintarakenteena 50 mm paksu savi-kiviseos. Savi-kiviseosta ei pinnoitettu lopullisella pinnoitteella, esimerkiksi vahalla. VR4-rakenteen pintarakenteena oli 50 mm paksu lattiabetoni. TR5-rakenteessa oli 100 mm vahvuinen savi-kiviseos.

Kuvassa 9 on esitetty TR4-, VR4- ja TR5-rakenteiden suhteellinen kosteus syvyydellä 62 mm ajan funktiona. Mittaussyvyys vastaa rakenteen arvostelusyvyttä A [13, Liite 3].



Kuva 9. TR3:n ja VR3:n kosteuspitoisuus mittapisteessä A, sekä sisäilman olosuhte ajan funktiona.

Sisäilman olosuhteet ovat kuivumisjakson alkupäässä viileitä. Kylmin mitattu lämpötila mittaussjakson aikana on +6 °C. Koepalojen mittaussjakso alkaa 29.1.2021. Testirakenteen TR4 keskimääräinen kosteus mittapisteessä A 29.1.2021 on RH 86 %, kun vertailurakenteen VR4 vastaava arvo on RH 90 %. Ylimääräisen testirakenteen TR5 vastaava arvo on RH 95 %.

Graafista on havaittavissa, että TR4-rakenne kuivuu nopeammin mittaussjakson aikana verrattuna VR4-rakenteeseen. 50 mm savi-kiviseoksen vaikutus on selkeästi havaittavissa mittaustuloksesta. Mittausjakso päättyy 4.6.2021 ja viimeinen mittaustulos TR4-rakenteelle mittapisteessä A on RH 69 %. Ylimääräinen testirakenne TR5 on kuivunut muita nopeammin ja on mittaussjakson loppupäässä vastaavissa lukemissa kuin TR4. Vastaava tulos VR4-rakenteelle on RH 85 %. TR4- ja VR4-rakenteiden ero on kasvanut mittaussjakson aikana 12 prosenttiyksikköä ja on mittaussjakson lopussa 16 prosenttiyksikköä. Ero on hyvin merkittävä. Koska loppupään mittauksissa olosuhteet ovat suotuisat porareikämittaukselle, voidaan viimeisiä mittaustuloksia pitää luotettavina.

4.6.2021 tehtiin myös syvemmälle ulottuvat kertamittaukset rakenteille TR4, VR4 ja TR5. Mittaukset ulottuivat syvyydelle 150 mm. TR4-rakenteen tulos oli RH 90,6 % ja VR4-rakenteen tulos oli RH 85,5 %. Tulokset eivät ole uskottavia. Mittauksessa on luultavasti tapahtunut jotain tuloksen luotettavuuteen vaikuttavaa. Mahdollinen syy voisi olla mittaputken päässä oleva suurehko kivi, joka vaikuttaa mittaputken kosteuden tasaantumiseen. Taulukossa 3 on esitetty 4.6.2021 tehtyjen kertamittausten tulokset. Niistä on nähtävissä, että 62 mm:n syvyydellä olleet jatkuvatoimisten kosteusmittausantureiden näyttämät tulokset ovat hyvin vastaavat. 150 mm:n syvyydeltä tehdyt mittaukset eivät korreloi lähempänä pintaa tehtyihin mittauksiin. Suurella todennäköisyydellä VR4-rakenteen 150 mm syvyyden mittaustulos on liian kuiva. Näillä tiedoilla tulosten analysointi luotettavasti ei ole mahdollista, mutta niiden luoma epävarmuus huomioidaan tutkimuksen kokonaisluotettavuuden arvioinnissa.

Taulukko 3. Taulukossa on esitetty TR4-, VR4- ja TR5-rakenteiden 4.6.2021 tehtyjen kertamittausten tulokset syvyyksillä 62 mm ja 150 mm.

Koepala	Syvyys [mm]	RH [%]	T [°C]
TR4	62	67,7	19,7
VR4	62	84,7	19,4
TR5	62	63,8	20,1
TR4	150	90,6	19,9
VR4	150	85,5	20,4
TR5	150	88,9	20,0

Koerakenne TR8 oli rakenteiltaan vastaava kuin TR4, mutta sen savi-kiviseospinta vahattiin nestemäisellä Karnaub-vahalla kuivumisen alkuvaiheessa. Vahaaminen on normaali toimenpide savi-kiviseospinnalle, jotta sen pinnasta tulee luja, murenematon ja kulutusta kestävä. TR8-rakenteen tarkoitus oli tutkia tämän vahauksen vaikutusta rakenteen kuivumiseen. Mittapäiden rajallisen määrän takia TR8-rakenteella ei ollut jatkuvaa mittausta käytössä. Rakenteesta otettiin vastaavat loppumittaukset, kuin TR4-rakenteesta. Ne on esitetty taulukossa 4. Rakenteeseen tehtiin myös muita mittauksia, mutta matalien mittaustilapötilojen takia niitä ei esitetä. Niiden käyttö voisi johtaa harhaan.

Taulukko 4. Taulukossa on esitetty TR8-rakenteen loppumittaukset 4.6.2021.

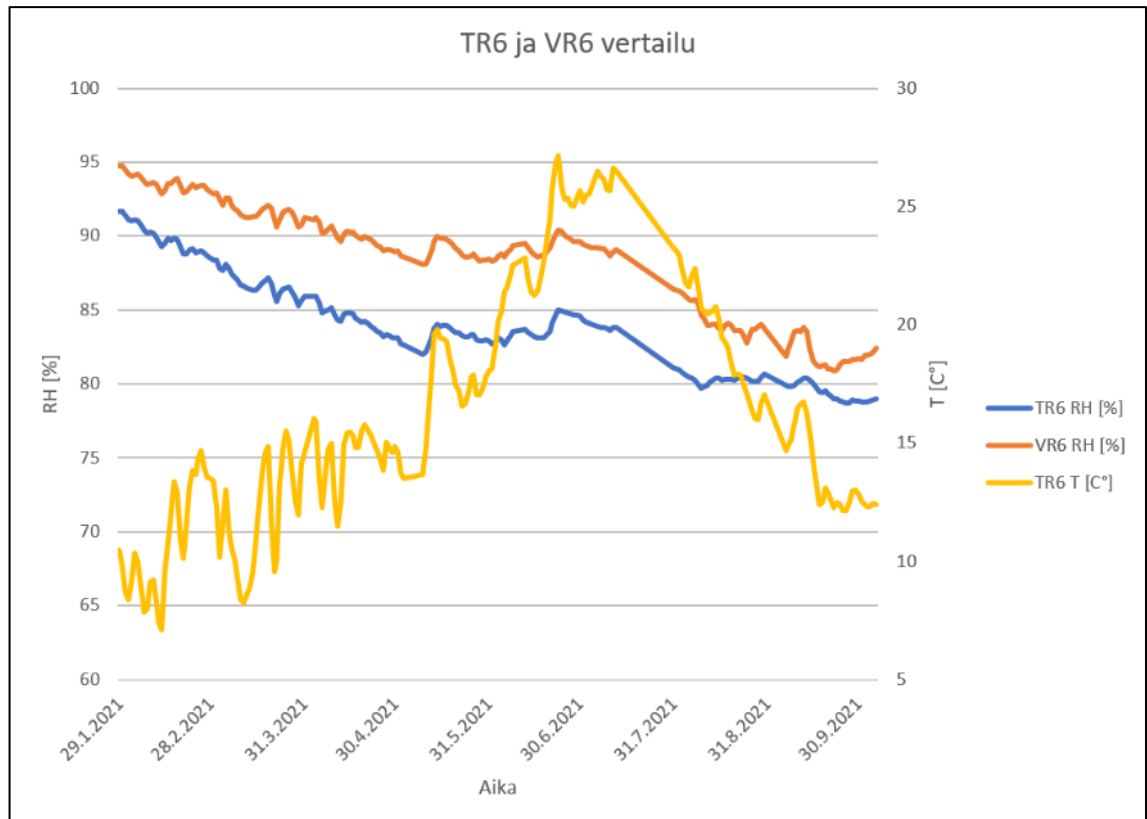
Koepala	Syvyys [mm]	RH [%]	T [°C]
TR8	62	74,2	20,5
TR8	150	91,9	20,3

TR4- ja TR8-rakenteiden tuloksia verratessa huomataan selkeä ero. TR8-rakenteen vahakäsittely pinnassa on vaikuttanut rakenteen kokonaiskuivumiseen. Kuivuminen on ollut silti selkeästi nopeampaa syvyydellä 62 mm, kuin vertailurakenteen VR4 kuivuminen. Pinnan vahakäsittelyä ei kannata tehdä tarpeettoman aikaisin silloin, kun kuivumisajalla on merkitystä.

4.3.2 Yhteen suuntaan kuivuvat teräsbetonivälipohjat

Koerakenteissa TR6 ja VR6 oli 260 mm paksu massiivibetonilaatta. Niiden kuivuminen oli estetty kaksinkertaisella höyrynsulkumuovilla kaikkiin muihin suuntiin paitsi ylöspäin. Rakenteet olivat yhteen suuntaan kuivuvia, eli ne kuvastivat alapohjarakenteita. TR6-rakenteessa oli pintarakenteena 20 mm paksu savi-kiviseos. Savi-kiviseosta ei pinnoitettu lopullisella pinnoitteella, esimerkiksi vahalla. VR6-rakenteen pintarakenteena oli kuituvahvistettu sementtipohjainen tasoite. Rakenteiden rakennetyypit on esitetty liitteessä 1.

Kuvassa 10 on esitetty TR6- ja VR6-rakenteiden suhteellinen kosteus syvyydellä 70 mm ajan funktiona. Mittaussyvyys vastaa rakenteen arvostelusyvyttä A [13, Liite 3].



Kuva 10. TR6:n ja VR6:n kosteuspitoisuus mittapisteessä A, sekä TR6-rakenteen lämpötila ajan funktiona.

Yhteen suuntaan kuivuvia rakenteita mitattiin kahteen suuntaan kuivuvia rakenteita pidempään. Koska hidas kuivuminen oli ennalta tiedossa, vuokrattiin osa kosteusmittareista pidemmäksi aikaa. Testirakenteiden tulokset kulkevat maltillisesti rinnakkain koko mittausjakson ajan. Ero näyttää kasvavan hieman lämpötilojen noustessa ja kapenee taas olosuhteen viiletessä. Graafista on hyvä huomata, että aiemmista graafeista poiketen, mittausteknisistä syistä johtuen, lämpötila ei ole tilan olosuhtelämpötila, vaan kosteusanturin mittaama rakenteen lämpötila. Koepalojen oltua samassa tilassa, oletetaan TR6- ja VR6-rakenteiden lämpötila samaksi. Asia on myös nähtävissä antureiden tallentamasta datasta, mutta graafin selkeyden vuoksi sitä ei tässä esitetä.

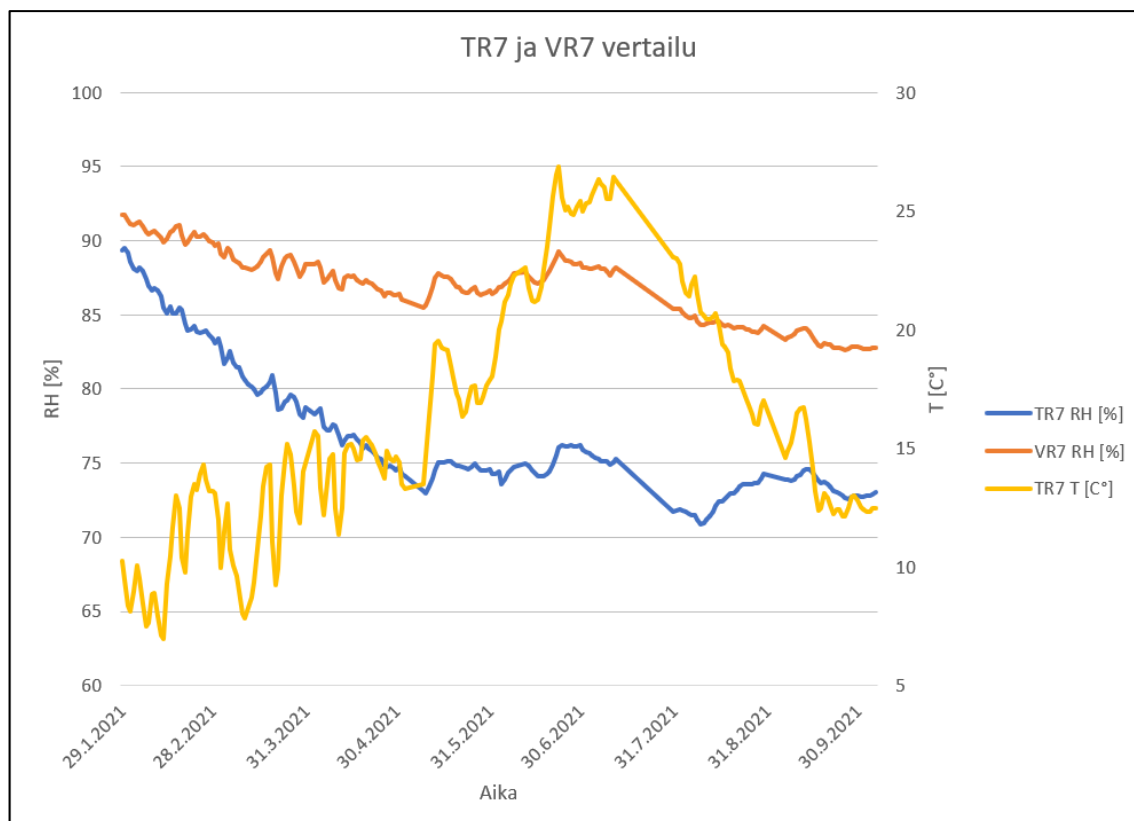
Mielenkiintoinen ajanjakso mittausdatassa on kesän loppupuolella, kun lämpötila alkaa laskea syksyä kohden ja saadaan viimeiset tulokset hyväksyttävältä lämpötila-alueelta. Elokuun puolivälissä rakenteiden lämpötila oli vielä noin 20 °C ja siitä hetkestä on hyvä katsoa tulokset tarkemmin. 15.8.2021 rakenteiden lämpötilat oli 20,2 °C. TR6 -rakenteen

suhteellinen kosteus syvyydellä 70 mm oli RH 80 % ja vastaavasti VR6 -rakenteen suhteellinen kosteus oli RH 84 %. Yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen pinnoitettavuudessa tämä tarkoittaa viikkoja aikaisempaa pinnoitettavuutta.

Rakenteista tehtiin kertamittauksia syvemmältä rakenteesta. Nopeampi kuivuminen ei juuri näy yhteen suuntaan kuivuvassa rakenteessa syvältä mitatessa. 4.6.2021 tehdyissä mittauksissa mitattiin suhteellinen kosteus rakenteista syvyydeltä 112 mm. TR6-rakenteessa suhteellinen kosteus oli RH 89,2 % rakenteen lämpötilan ollessa 20,6 °C. VR6-rakenteessa suhteellinen kosteus oli RH 88,4 % rakenteen lämpötilan ollessa 20,2 °C. Mittaustulos on testirakenteen osalta jopa isompi, mikä voi johtua rakenteen hieman suuremmasta lämpötilasta. Kuitenkaan ero ei ole iso ja se jää mittauserävarmuuden sisään etenkin, kun porareiät on tehty kuukausia aiemmin.

Koerakenteissa TR7 ja VR7 oli 260 mm paksu massiivibetonilaatta. Niiden kuivuminen oli estetty kaksinkertaisella höyrynsulkumuovilla kaikkiin muihin suuntiin paitsi ylöspäin. Rakenteet olivat yhteen suuntaan kuivuvia, eli ne kuvastivat alapohjarakenteita. TR7-rakenteessa oli pintarakenteena 50 mm paksu savi-kiviseos. Savi-kiviseosta ei pinnoitettu lopullisella pinnoitteella, esimerkiksi vahalla. TR7-rakenteen pintarakenteena oli 50 mm paksu lattiabetoni. Rakenteiden rakennetyypit on esitetty liitteessä 1.

Kuvassa 11 on esitetty TR7- ja VR7-rakenteiden suhteellinen kosteus syvyydellä 70 mm ajan funktiona. Mittaussyvyys vastaa rakenteen arvostelusyvyyttä A [13, Liite 3].



Kuva 11. TR7:n ja VR7:n kosteusprofiili mittapisteessä A, sekä TR7-rakenteen lämpötila ajan funktiona.

Testirakenteen TR7 ja vertailurakenteen VR7 kosteuskäyrät erkanevat merkittävästi tutkimusjakson aikana. Rakenteet käyttäytyvät selvästi eri tavalla. Vaikka yhden mittausvyöhykkeen seuranta ei kerro rakenteen kosteusprofiilia, on siitä selvästi pääteltävissä, että rakenteen kokonaiskosteus on mittausjakson loppupäässä matalampi savi-kiviseospinnoitettussa rakenteessa. Jo yhdestä mittauspisteestä voidaan havaita, että savipinta läpäisee kosteutta betonipintaa enemmän. Muuten kosteuskäyrät eivät voi erkaantua toisistaan. Ilmiötä tarkastellaan tarkemmin luvussa 6.

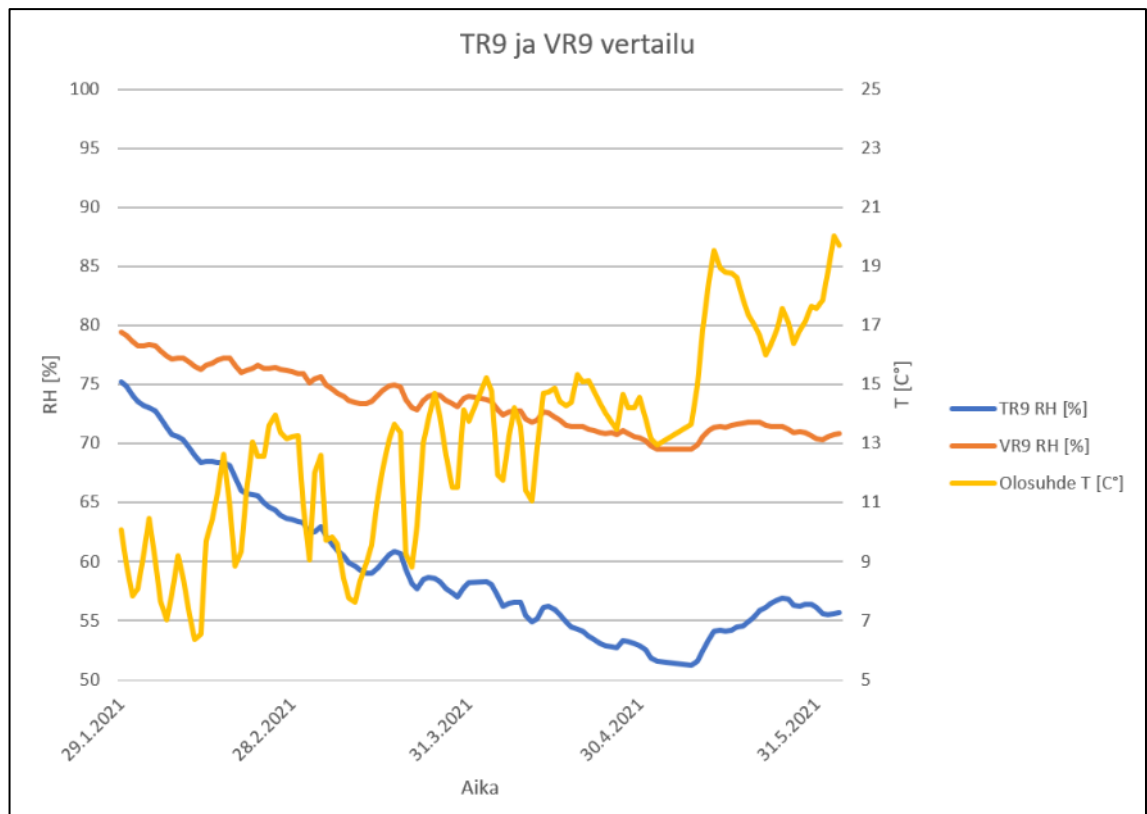
Elokuun puolivälin mittaus tulokset ovat TR6- ja VR6-rakenteiden tapaan viimeiset mittausolosuhteiltaan hyväksyttävät tulokset. 15.8.2021 rakenteiden lämpötilat oli 20,2 °C. TR7-rakenteen suhteellinen kosteus syvyydellä 70 mm oli RH 72 % ja vastaavasti VR7-rakenteen suhteellinen kosteus oli RH 85 %. Ero on iso ja todellinen. Se kuitenkin herättää kysymyksen arvosteluvyöhykkeen toimivuudesta savi-kiviseospinnoitettussa rakenteessa. Ongelmaa käsitellään tarkemmin luvussa 6.

Rakenteista tehtiin kertamittauksia syvemmältä rakenteesta. 4.6.2021 tehdyissä mittauksissa mitattiin suhteellinen kosteus rakenteista syvyydeltä 124 mm. TR7-rakenteessa suhteellinen kosteus oli RH 86,0 % rakenteen lämpötilan ollessa 20,3 °C. VR7-rakenteessa suhteellinen kosteus oli RH 89,6 % rakenteen lämpötilan ollessa 20,2 °C. Erona ohuemman pintarakenteen testipaloihin, TR7- ja VR7-rakenteissa on havaittavissa selkeämmin eroa syvemmältä tehdyissä kosteusmittauksissa. Savi-kiviseoksen paksuudella on selvästi merkitystä rakenteen kuivumiseen.

4.3.3 Puurakenteiset välipohjat

Koerakenteissa TR9 ja VR9 rakenne vastasi puurankaista välipohjaa. Niiden kuivuminen oli estetty kaksinkertaisella höyrynsulkumuovilla sivusuuntiin. Rakenteiden sisällä oli puukoolaukset ja eristeenä sahanpuru. Puukoolauksen päällä ja pintakerroksen välissä oli 12 mm:n havuvaneri. TR9-rakenteessa oli pintarakenteena 50 mm paksu savi-kiviseos. Savi-kiviseosta ei pinnoitettu lopullisella pinnoitteella, esimerkiksi vahalla. VR9-rakenteen pintarakenteena oli 50 mm paksu lattiabetoni. Rakenteiden rakennetyypit on esitetty liitteessä 1.

Kuvassa 12 on esitetty TR9- ja VR9-rakenteiden suhteellinen kosteus syvyydellä 50 mm ajan funktiona. Kosteus on mitattu vanerin yläpinnasta, tarkoituksena kuvastaa kuivuvan pintarakenteen muodostamaa riskiä puu- ja eristemateriaaleille.



Kuva 12. TR9:n ja VR9:n kosteuspitoisuus 50 mm:n syvyydellä vanerin yläpinnassa sekä sisäilman olosuhde ajan funktiona.

TR9- ja VR9-rakenteissa alkupään mittaustuloksien katoaminen oli tutkimusta harmillisesti haittaava takaisku. Rakenteen kuivuminen oli niin nopeaa, että 29.1.2021 alkava mittausjakso oli auttamatta myöhässä. Rakenteet olivat tässä vaiheessa kuivuneet kylmissä olosuhteissa hieman alle kaksi kuukautta. Koepaloista voidaan kuitenkin todeta, että pelkästään pintarakenteita tarkastelemalla, savi-kiviseoksen kuivuminen on merkittävästi nopeampaa. Sillä perusteella voidaan todeta, että savi-kiviseoksen rakennuskosteus aiheuttaa puu- ja eristemateriaaleille lattiabetonia pienemmän riskin. Onko erolla merkitystä, se ei selviä tästä tutkimuksesta.

5 Vertailutulokset Wufi 2D:llä

Testituloksia ja olosuhteita pyrittiin toistamaan Wufi 2D -ohjelmalla. Alkuperäisestä ajatuksesta poiketen, kaikki laskenta suoritettiin 2D-tilassa. Testitilan vaihtelevat olosuhteet tekivät laskennasta vaikeaa ja vaikuttivat tulosten luotettavuuteen. Laskelmien tavoite oli

löytää savi-kiviseokselle sopivat parametrit, jotta uusien rakenteiden toimintaa voitaisiin tutkia luotettavasti mallintamalla. Laskennan lähtötiedot eivät olleet riittävän tarkat, jotta luotettavaan tulokseen olisi päästy. Epäluotettavuutta aiheuttivat pääasiassa runkobetonin tarkan reseptin puuttuminen ja tutkimustilan vaihtelevat olosuhteet, jotka tekivät kosteusmittausten tuloksista epäluotettavia.

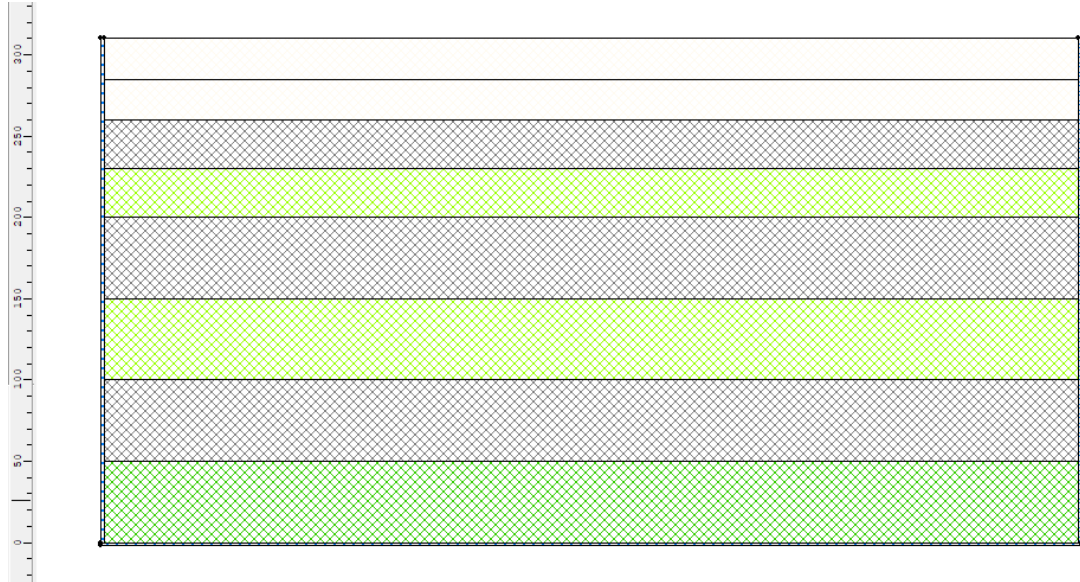
Opinnäytetyöntekijälle tuli myös epäily siitä, että Wufi 2D -ohjelmisto ei tulkitse oikein lämpötilan muutosta rakenteiden alkuolosuhteissa (initial conditions). Alkuolosuhteissa valitaan kunkin materiaalin alkulämpötila [$^{\circ}\text{C}$], kosteuspitoisuus [kg/m^3] ja suhteellinen kosteus [RH %]. Materiaalin kosteuspitoisuus ilmoittaa materiaalin kokonaiskosteuden verrattuna sen kuivapainoon tai kuivatilavuuteen [9, s. 390]. Materiaalin suhteellinen kosteus kertoo materiaalin ilmahuokosissa olevan kosteuspitoisuuden prosentteina vastaavan lämpötilan kyllästyskosteudesta [9, s. 391]. Parametreissa kosteuspitoisuus ja suhteellinen kosteus ovat dynaamisia toisiinsa nähden, mutta valittu alkulämpötila ei vaikuta näihin. Voi olla, että ohjelma korjaa virheen laskennan alkaessa, mutta sitä on vaikea selvittää, eikä ole tiedossa mitkä parametreista ovat määrääviä. Kuitenkin alkutilannetta pyritään simuloimaan mittaustulosten pohjalta, joten tiedossa olevat parametrit ovat vain rakenteen lämpötila ja tietyltä syvyydeltä mitattu suhteellinen kosteus. Materiaalin kosteuspitoisuutta ei tiedetä. Tämä voi osaltaan aiheuttaa laskentaan epävarmuutta.

5.1 Betonin ja olosuhteiden lähtöarvojen luonti

Lähtöarvojen luonti aloitettiin luomalla laskentamalli, joka vastaa mahdollisimman hyvin VR7-rakenteen käyttäytymistä kokeen aikana. VR7-rakenne valittiin tähän sillä perusteella, että siinä oli kaikista vähiten tuntemattomia tekijöitä. Kuivuminen oli estetty kaikkiin muihin suuntiin paitsi ylöspäin. Materiaalina oli ainoastaan betonia, joskin kahta eri laatua.

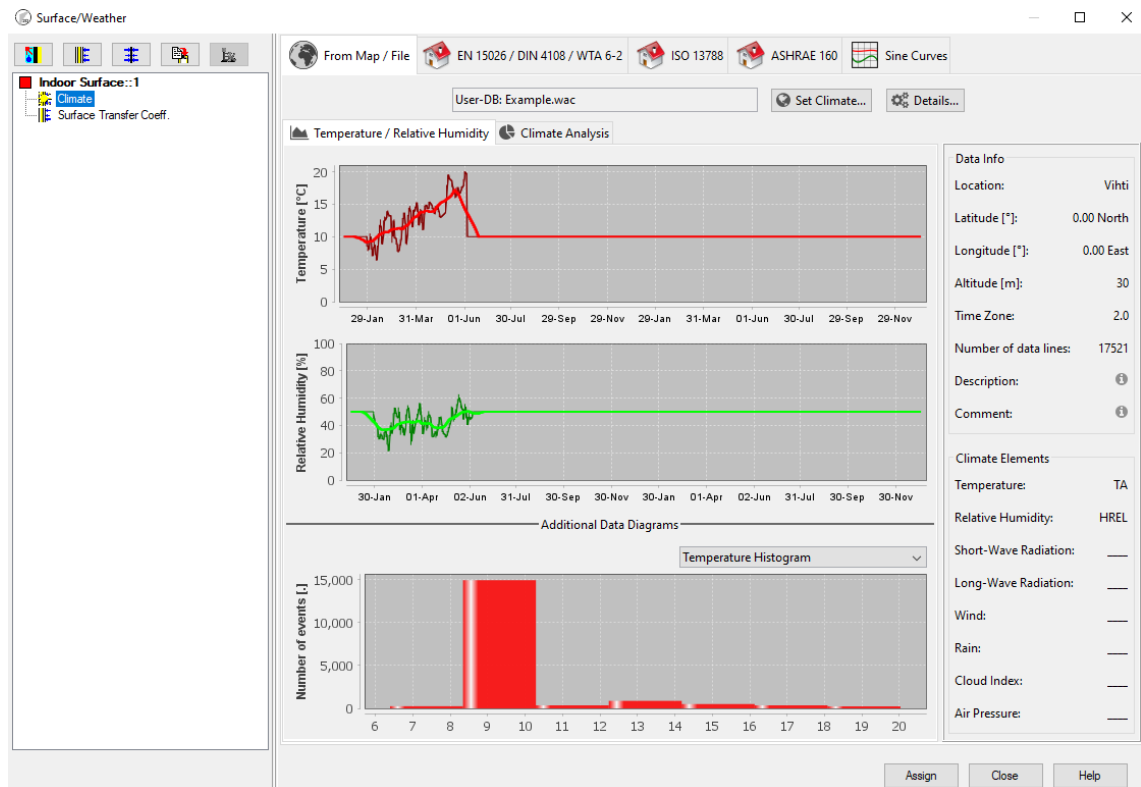
Ensimmäisenä luotiin rakenteen geometria. Erehdyksen ja oppimisen kautta rakenne viipaloitiin korkeussuunnassa kuuteen eri materiaaliin. Alhaalta ylöspäin lueteltuna rakenteeseen tuli ensin neljä 50 mm paksua kerrosta, näiden jälkeen kaksi 30 mm paksua kerrosta ja pintaan kaksi 25 mm paksua kerrosta. Vaikka näistä osa oli laskennassa samaa materiaalia, pystyttiin niille antamaan eri lähtöarvot, kun ne oli mallinnettu eri materiaaleina, joilla oli samat materiaaliominaisuudet. Höyrynsulkumuovilla tiivistetyt reunat

mallinnettiin Wufiin höyrynsulkukalvoilla. Näin estettiin rakenteen kuivuminen väriin suuntiin, mutta lämpötilamuutokset saatiin vaikuttamaan höyrynsulkumuovin läpi. Eri materiaaleja korostettiin eri väreillä tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi. Kuvassa 13 näkyy Wufin geometriavälilehdelle mallinnettu rakenne.



Kuva 13. Wufin geometriavälilehdelle mallinnettu rakenne.

Koetilan olosuhteet tallentuivat Vaisalan pilvipalveluun 29.1.2021 – 4.6.2021 väliseltä ajalta. Tämä tarkoitti sitä, että mallinnus pystyttiin aloittamaan vasta ajankohdasta 29.1.2021. Mallinnusta ei olisi muutenkaan hyvä aloittaa vasta valetusta rakenteesta, koska Wufi ei osaa huomioida betonin lujittumisvaiheessa tapahtuvaa veden kemiallista sitoutumista ja lämmöntuottoa. Olosuhteet tuli muuntaa loggereista saadusta datasta Wufille sopivaan muotoon. Wufiin on mahdollista viedä oma olosuhdetieto Excel-tiedostona, mutta sen täytyy olla oikeassa muodossa. Vuosi, kuukausi, päivä ja tunti tulee merkitä omaan sarakkeeseensa, ja jokaiselta tunnilta saa olla vain yksi arvo. Loggereista vastaava tieto saatiin minuutin tarkkuudella. Tiedon viemiseksi Wufiin tuli tehdä muunto- taulukko, joka laskee tuntikohtaisen keskiarvon olosuhdetiedoista jokaiselle tunnille. Taulukon valmistuttua se vietiin Wufiin sisätilan olosuhdetiedoksi. Kuvassa 14 näkyy Wufin olosuhdeasetuksiin tallennettu oma olosuhdetieto. Jos mallinnusta tehdään aikavälin 29.1.–4.6. ulkopuolella, alkavat tulokset vääristyä puuttuvan olosuhdetiedon takia.



Kuva 14. Wufin olosuhdeasetuksiin tallennettu oma olosuhdetieto.

Jotta mallinnus voitiin aloittaa kesken rakenteen kuivumisen, tuli eri materiaalikerroksille arvioida lähtötilanteen kosteuspitoisuus. Kosteuspitoisuus arvioitiin eri syvyyksille tehtyjen mittauksien perusteella ja lähtöarvoja korjattiin laskennan edetessä. Iteroinnista teki vaikeaa myös tarkan betonireseptin puuttuminen. Käytännössä betonin vesi-sementtisuhdetta ja materiaalien alkuolosuhteita täytyi muokata samanaikaisesti, eikä niistä tunnut löytyvän sopivaa yhdistelmää vastaamaan mittaustuloksia. Oletuksena oli, että koerakenteissa on normaalia rakennebetonia, joka vastaa melko tarkkaan vesi-sementtisuhdetta 0,7. Wufin materiaalikirjastosta löytyy valmiita betonimateriaaleja useasta kansista. LTH Lund University, Sweden -kansista löytyy betonit vesi-sementtisuhteilla 0,4–0,7. Mallinnus aloitettiin näistä pehmeimmällä betonilla, eli parhaiten hengittäväällä betonilla. Sen vesi-sementtisuhte on 0,7. Mallinnus ei kuitenkaan vastannut yhtään koetilassa mitattuja arvoja. Koska käytetyn betonin reseptiä ei saatu betonin valmistajalta, täytyi kokeilla vielä pehmeämpää betonia. Mallinnus alkoi toimia melko hyvin vasta C12/15-betonilla, joka vastaa lujuudeltaan vanhaa K15-betonia. K15-betonin vesi-sementtisuhte on 1,1 [14, s. 145]. C12/15-betoni löytyi Wufin materiaalikirjaston kansista Fraunhofer-IBP / Concrete and Screeds.

Taulukossa 5 on esitetty laskennassa käytetyt materiaalien alkuolosuhteet. Arvot perustuvat 22.12.2020 ja 30.1.2021 tehtyihin kertamittauksiin, sekä 29.1.2021 luetun jatkuvatoimisen kosteanturin antamaan tulokseen. 22.12.2020 tehtiin kaksi kertamittausta. Syvyydelle 124 mm tehdyssä mittauksessa suhteellinen kosteus oli RH 94,6 % ja lämpötila 14,4 °C. Syvyydelle 50 mm tehdyssä mittauksessa suhteellinen kosteus oli RH 91,1 % ja lämpötila 15,2 °C. 30.1.2021 tehtiin kaksi kertamittausta. Syvyydelle 124 mm tehty mittaus osoitti suhteelliseksi kosteudeksi RH 94,8 % ja lämpötilaksi 8,4 °C. Syvyydelle 50 mm tehty mittaus osoitti suhteelliseksi kosteudeksi RH 91,2 % ja lämpötilaksi 8,2 °C. 29.1.2021 jatkuvatoiminen kosteusanhuri antoi syvyydeltä 70 mm suhteellisen kosteuden arvoksi RH 91,8 % tilan lämpötilan ollessa 8,5 °C.

Taulukko 5. Rakenteen VR7 laskennassa käytetyt materiaalien alkuolosuhteet.

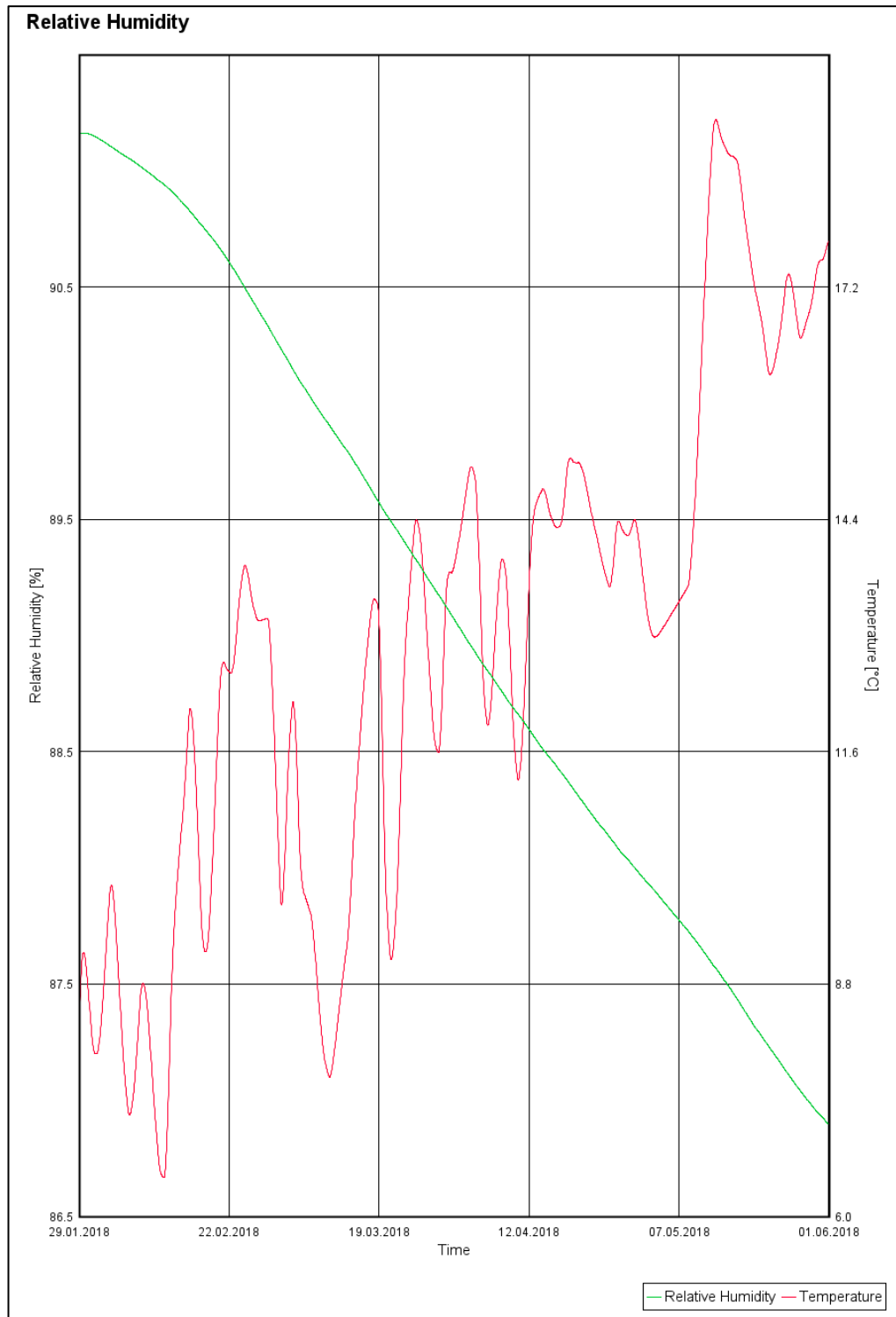
Rakenteen korkeus [mm]	Materiaali	Lämpötila [°C]	Kosteuspitoisuus [kg/m ³]	Suhteellinen kosteus RH [%]
285–310	Concrete C12/15	8,5	58,8	0,86
260–285	Concrete C12/15	8,5	74,6	0,90
230–260	Concrete C12/15	8,5	78,1	0,91
200–230	Concrete C12/15	8,5	79,0	0,91
150–200	Concrete C12/15	8,5	79,0	0,91
100–150	Concrete C12/15	8,5	79,9	0,92
50–100	Concrete C12/15	8,5	79,9	0,92
0–50	Concrete C12/15	8,5	80,7	0,92

Vaikka tiedossa oli, että betonin ei pitäisi olla näin pehmeää, tehtiin laskenta taulukossa 5 esitetyillä arvoilla ja betonilla C12/15. Tutkimuksen kannalta on epämieluisia arvata lähtötietoja, joka aiheuttavat lopputuloksiin suurta epävarmuutta. Kaikkien arvojen rakentaminen ja alkuarvojen iterointi kesti kauan ja olisi ollut epävarmuuden pelkäämistä jättää laskenta tekemättä. Tästä syystä tuloksiin tulee kuitenkin suhtautua varauksella, eikä niitä voidaan pitää tarkkana lähtötietona tulevaisuuden tutkimuksiin tai käytännön sovelluksiin. Taulukossa 6 on esitetty Wufin materiaalikirjastosta otetun C12/15-betonin materiaaliparametrit.

Taulukko 6. Wufin materiaalikirjaston C12/15-betonin materiaaliparametrit.

Materiaalikansio	Materiaalin nimi	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin [-]
Fraunhofer-IBP	Concrete, C12/15	2200	0,18	850	1,6	92

Laskennasta saadut tulokset vastasivat nyt melko hyvin mitattuja tuloksia. VR7-rakenteen Wufi-mallinnuksesta tuotetut viivadiagrammit on esitetty kuvassa 15. Suhteellinen kosteus syvyydellä 70 mm alkaa ja päättyy hyvin tarkasti samoihin arvoihin kuin mitatussa datassa. Rakenteen lämpötila seuraa riittävällä tarkkuudella tilan olosuhteen mitausdataa, joten Wufiin viety olosuhdetieto toimii. Tätä pohjatietoa käytettiin myös jatkossa savi-kiviseoksen materiaaliparametrien iteroinnissa.



Kuva 15. VR7-rakenteen Wufi-mallinnuksesta tuotettu viivadiagrammi. Arvot on esitetty rakenteen yläpinnasta laskettuna 70 mm:n syvyydeltä.

5.2 Savi-kiviseoksen materiaaliparametrien luonti

Lähtöarvojen luonti tehtiin rakenteesta VR7, koska siinä oli kaikista vähiten epävarmoja lähtötietoja, vaikka siinäkin niitä oli liikaa. Saven materiaaliparametrien luonti on luontevaa tehdä rakenteesta TR7. Oletettavasti VR7-rakenteen muut osat toimivat nyt oikein ja 50 mm paksu lattiabetoni voidaan vaihtaa savi-kivipinnoitteeksi. Materiaaliparametrien luontiin epävarmuutta luo VR7-rakenteessa käytetyn runkobetonin ja lattiabetonin materiaalierot. Koska kummastakaan ei ole tarkkoja lähtötietoja käytössä, mallinnettiin ne samalla materiaalilla ja vain alkukosteutta säädettiin. Tämä on epävarmuus, jonka kanssa täytyy tulla toimeen tämän tutkimuksen osalta.

Savea on käytetty rakentamiseen todella pitkään, mutta se ei ole nykyaikana laajasti käytetty materiaali. Mahdollisesti tästä syystä siitä löytyvä rakennusfysikaaliseen mallin-
nusohjelmaan soveltuva materiaalitieto on vähäistä. Wufin materiaalikirjasto löytyy kaksi materiaalia, jotka viittaavat polttamattomaan saveen. Näiden materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Sopivien savimateriaalien materiaaliparametrit Wufin materiaalikirjastossa.

Materiaalikansio	Materiaalin nimi	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin [-]
MASEA Database, Germany	Clay Mortar	1568	0,41	488	0,48	11
Fraunhofer-IBP	Clay Rendering	1514	0,42	850	0,65	11,3

- Taulukossa 7 esitettyjen materiaalien ominaisuuksista Clay Rendering vaikutti ominaisuuksiltaan enemmän käytetyn savi-kiviseoksen kaltaiselta. Poltetun tiilen ominaislämpökapasiteetti on 840–1000 J/kgK [1, s. 430]. Taulukossa 7 esitetty Clay Mortar ilmoittaa ominaislämpökapasiteetikseen 488 J/kgK. On epätodennäköistä, että savi-kiviseoksen ominaislämpökapasiteetti olisi pienempi kuin poltetun saven, vaikka sitä ei tässä tutkimuksessa tutkittukaan. Tästä syystä mallin-
nusta jatkettiin Clay Rendering -materiaalilla.

Ensimmäinen mallinnus tehtiin kopiona VR7-rakenteen mallinnuksesta niin, että 50 mm:n pintabetoni vaihdettiin Clay Rendering -materiaaliksi. Tuloksista oli havaittavissa, että kuivuminen oli hitaampaa, kuin kenttäkokeissa mitatut arvot. Mallinnustulokset muokattiin vastaamaan mitattuja tuloksia säätämällä Clay Rendering -materiaalin vesihöyryn diffuusiovastuskerrointa. Sopiva arvo antamaan halutut tulokset löytyi, ja se oli lopulta 8. Kokonaisuutena kaikkien materiaalien hengittävyksiä jouduttiin parantamaan odotetusta, jotta mallinnetut ja mitatut tulokset saatiin vastaamaan toisiaan. On mahdollista, että tutkimustilan mittaussakson alkupään kylmät olosuhteet ovat vaikuttaneet mitattuihin tuloksiin niin, että mallinnusta ei saada täysin kohdilleen ja materiaalien hengittävydet eivät oikeasti ole näin hyvät. Mahdollisia syitä on analysoitu tarkemmin luvussa 6. Taulukossa 8 on esitetty TR7-rakenteen mallinnuksessa käytetyt lopulliset materiaaliparametrit. Arvon vieressä on esitetty suluissa alkuperäinen materiaalikirjaston arvo, jos arvoa on muutettu oletusarvosta.

Taulukko 8. TR7-rakenteen mallinnuksessa käytetyt lopulliset materiaaliparametrit.

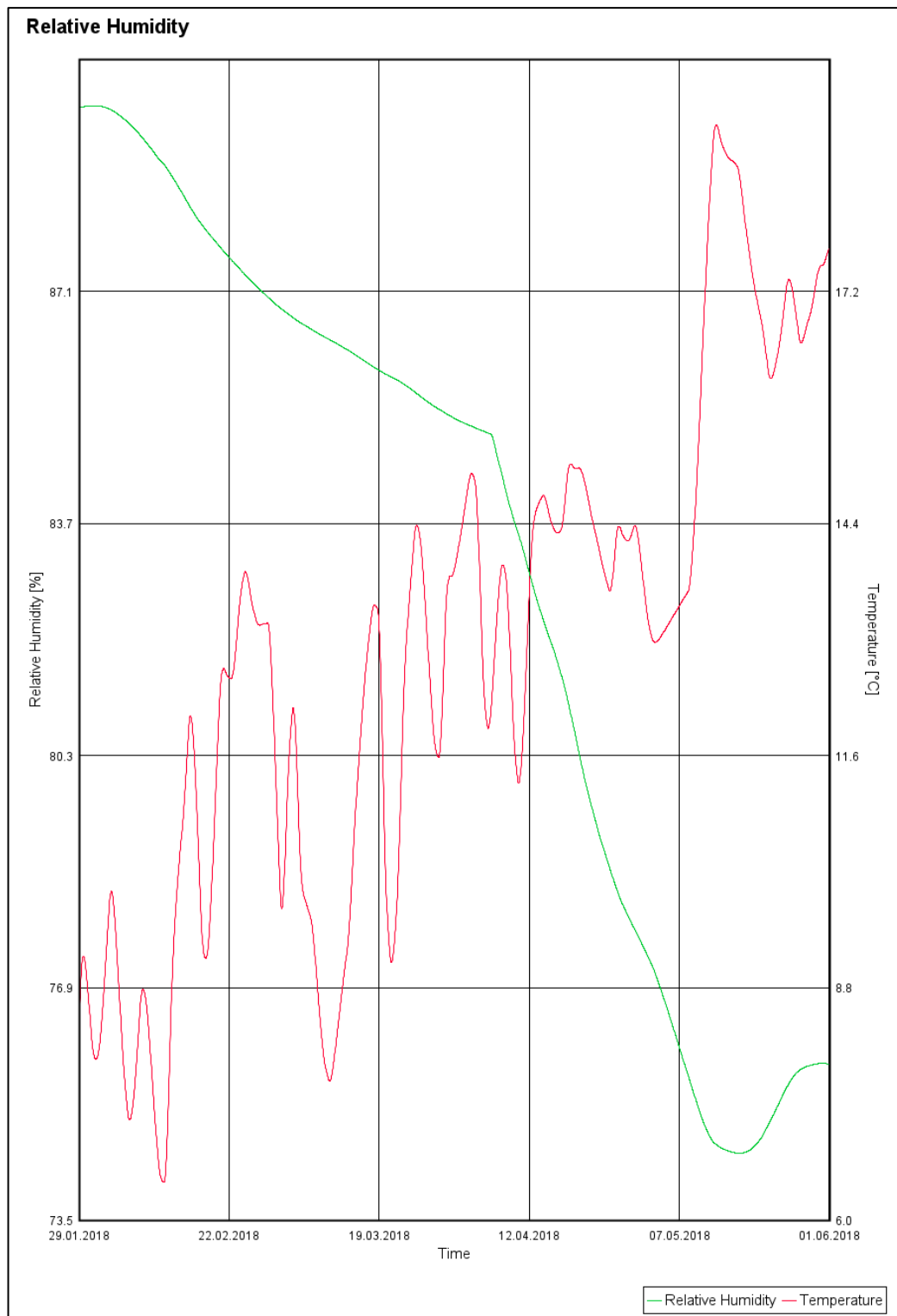
Materiaalikansio	Materiaalin nimi	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin [-]
Fraunhofer-IBP	Concrete, C12/15	2200	0,18	850	1,6	92
Fraunhofer-IBP	Clay Rendering	1514	0,42	850	0,65	8 (11,3)

Taulukossa 9 on esitetty TR7-rakenteen mallinnuksessa käytetyt materiaalien alkuolosuhteet. Arvot perustuvat 22.12.2020 ja 30.1.2021 tehtyihin kertamittauksiin, sekä 29.1.2021 luetun jatkuvatoimisen kosteanturin antamaan tulokseen. 22.12.2020 tehtiin kaksi kertamittausta. Syvyydelle 124 mm tehty mittaus näytti kosteudeksi RH 95,7 % ja lämpötilaksi 15,2 °C. Syvyydelle 50 mm tehty mittaus näytti kosteudeksi RH 93,3 % ja lämpötilaksi 14,7 °C. 30.1.2021 tehtiin kaksi kertamittausta. Syvyydelle 124 mm tehty osoitti kosteusarvoksi RH 90,7 % ja lämpötilaksi 7,5 °C. Syvyydelle 50 mm tehty mittaus näytti kosteusarvoksi RH 88,7 % ja lämpötilaksi 7,9 °C. 29.1.2021 jatkuvatoiminen kosteasanturi antoi syvyydeltä 70 mm:n tuloksen RH 89,4 % tilan lämpötilan ollessa 8,5 °C.

Taulukko 9. Rakenteen TR7 laskennassa käytetyt materiaalien alkuolosuhteet.

Rakenteen korkeus [mm]	Materiaali	Lämpötila [°C]	Kosteuspitoisuus [kg/m ³]	Suhteellinen kosteus RH [%]
285–310	Clay Rendering	8,5	21,8	0,86
260–285	Clay Rendering	8,5	23,0	0,88
230–260	Concrete C12/15	8,5	73,0	0,90
200–230	Concrete C12/15	8,5	75,5	0,90
150–200	Concrete C12/15	8,5	77,0	0,91
100–150	Concrete C12/15	8,5	78,0	0,91
50–100	Concrete C12/15	8,5	78,5	0,91
0–50	Concrete C12/15	8,5	79,0	0,91

Kuvassa 16 on esitetty TR7-rakenteen mallinnuksesta saadut viivadiagrammit aikaväliltä 29.1.2021 – 4.6.2021. Arvot on tulostettu rakenteen pinnasta laskettuna 70 mm:n syvyydeltä.



Kuva 16. TR7-rakenteen Wufi-mallinnuksesta tuotetut viivadiagrammi. Arvot esitety rakenteen yläpinnasta laskettuna 70 mm:n syvyydeltä.

5.3 Savi-kiviseoksen materiaaliparametrien varmennus

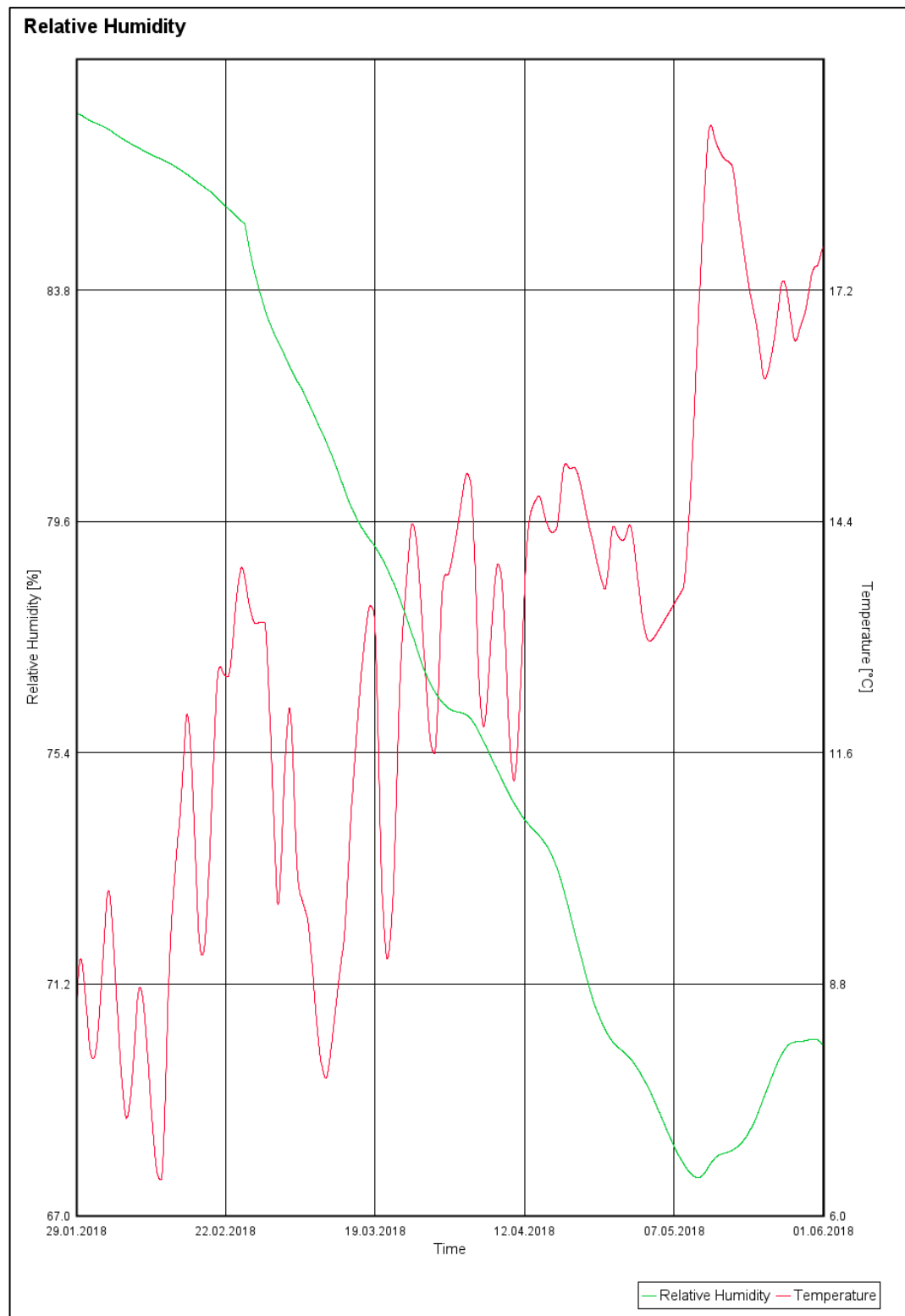
VR7- ja TR7-rakenteille tuotetuissa mallinuksissa on pyritty löytämään koetapahtumaa vastaavat materiaaliparametrit ja olosuhdetiedot. Materiaaliparametrien luotettavuuden lisäämiseksi on suositeltavaa testata niitä eri rakenteeseen muokkaamattomina. Jos erillisen mallinuksen tulos vastaa hyvin mitattuja tuloksia, lisää se arvojen luotettavuutta. Varmennusrakenteeksi valikoitui testirakenne TR4, koska se on ehkä tyypillisin sovellus, mitä savi-kiviseoksella voitaisiin tulevaisuudessa tehdä. TR4-rakenne on kahteen suuntaan kuivuva välipohjarakenne, jossa on 50 mm paksu savi-kiviseospinnoite. Mallinuksen tuottamiseksi TR7-rakenteen geometriaa tulee muokata hieman Wufissa. Rakenteesta poistetaan alapinnasta höyrynsulkumuovi ja rakenteen alkuolosuhteet muokataan vastaamaan mittauksissa todettuja.

Rakenteen alapinnan alkuolosuhteet täytyy arvioida, mutta niiden vaikutus tuloksiin vähenee mitä kauemmaksi yläpinnasta mennään. Rakenteiden alkuolosuhteet ovat juuri ne, jotka voivat sotkea mallinuksia. Jos mittapäiden antamat tulokset ovat vääristyneitä rakenteen alhaisesta lämpötilasta johtuen, myös mallinnus alkaa vääriillä arvoilla ja ongelmat kertaantuvat. Tämä riski jää voimaan tämän tutkimuksen osalta ja siitä syystä uusia tutkimusehdotuksia on esitetty luvussa 8. Taulukossa 10 on esitetty valitut alkuolosuhteet mallinukselle. Arvot perustuvat 22.12.2020 tehtyihin kertamittauksiin ja 29.1.2021 luetun jatkuvatoimisen kosteanturin antamaan tulokseen. 22.12.2020 tehtiin kaksi kertamittausta. Syvyydelle 150 mm tehty mittaus näytti kosteusarvoksi RH 91,9 % ja lämpötilaksi 13,7 °C. Syvyydelle 25 mm tehty mittaus näytti kosteudeksi RH 87,0 % ja lämpötilaksi 14,8 °C. 29.1.2021 jatkuvatoiminen kosteasanturi antoi syvyydelle 62 mm tuloksen RH 85,9 % tilan lämpötilan ollessa 8,5 °C. Varmennusmallinuksen idea on, että mallinnus tehdään kerran, eikä arvoja säädetä sen jälkeen.

Taulukko 10. Rakenteen TR4 mallinnuksessa käytetyt materiaalien alkuolosuhteet.

Rakenteen korkeus [mm]	Materiaali	Lämpötila [°C]	Kosteuspitoisuus [kg/m ³]	Suhteellinen kosteus RH [%]
285–310	Clay rendering	8,5	18,8	0,80
260–285	Clay rendering	8,5	20,3	0,83
230–260	Concrete C12/15	8,5	62,5	0,87
200–230	Concrete C12/15	8,5	73,8	0,90
150–200	Concrete C12/15	8,5	77,5	0,91
100–150	Concrete C12/15	8,5	81,3	0,92
50–100	Concrete C12/15	8,5	77,5	0,91
0–50	Concrete C12/15	8,5	58,5	0,86

Mallinnuksesta saadut arvot vastaavat hyvin mitattuja arvoja. Materiaaliparametrien luominen on onnistunut hyvin, vaikka epävarmuuksia tulee jäämään. Tällä perusteella olisi mahdollista tutkia savi-kiviseosta sisältävien rakenteiden kosteuskäyttäytymistä mallintamalla. Tulokset ovat suuntaa antavia, mutta niistä voidaan saada hyötyä esimerkiksi aikataulusuunnittelussa. Tulosten epävarmuuksia ja merkityksiä on käsitelty tarkemmin luvussa 6. Kuvassa 17 on esitetty TR4-rakenteen mallinnuksesta saadut tulokset. Arvot on esitetty 62 mm:n syvyydeltä rakenteen yläpinnasta laskettuna. Mallinnus tehtiin keran, eikä mitään arvoja iteroitu sen jälkeen.



Kuva 17. TR4-rakenteen Wufi-mallinnuksesta tuotetut viivadiagrammi. Arvot esitetty rakenteen yläpinnasta laskettuna 62 mm:n syvyydeltä.

5.4 Kuvitteellinen tilanne, kuivuva välipohja kolmella eri pintarakenteella

Aiemmissa mallinuksissa selvitettyä savi-kiviseoksen materiaaliarvoja testattiin kuvitteellisessa tilanteessa. Kuvitteellisessa tilanteessa mallinnettiin kolme eri rakennetta, joissa kaikissa oli sama kantava välipohjarakenne. Kantava rakenne oli 260 mm paksu välipohjalaatta, jonka vesi-sementtisuhde 0,7 valittiin normaalia rakennebetonia vastaavaksi. Kaikille materiaalikerroksille määritettiin alkuolosuhteeksi RH 98 %. Sisäilman olosuhteeksi valittiin Wufin olosuhdekirjastosta löytyvään Helsingin testivuoteen perustuva sisäilman olosuhde. Sisäilman olosuhteessa tilan lämmitys käynnistyy, kun sisäilman lämpötila saavuttaa +20 °C. Rakenteita kuivattiin mallinuksessa tasan 12 kuukautta. Alla on listattu mallinnetut rakenteet niiden raportointijärjestyksessä:

- Rakenne 1: kantava betonilaatta 260 mm ja päällä 50 mm:n savi-kiviseos
- Rakenne 2: kantava betonilaatta 260 mm ja päällä 50 mm:n betoni, vesi-sementtisuhde 0,7
- Rakenne 3: kantava betonilaatta 260 mm ja päälle ei tehdä mitään rakennekerrosta.

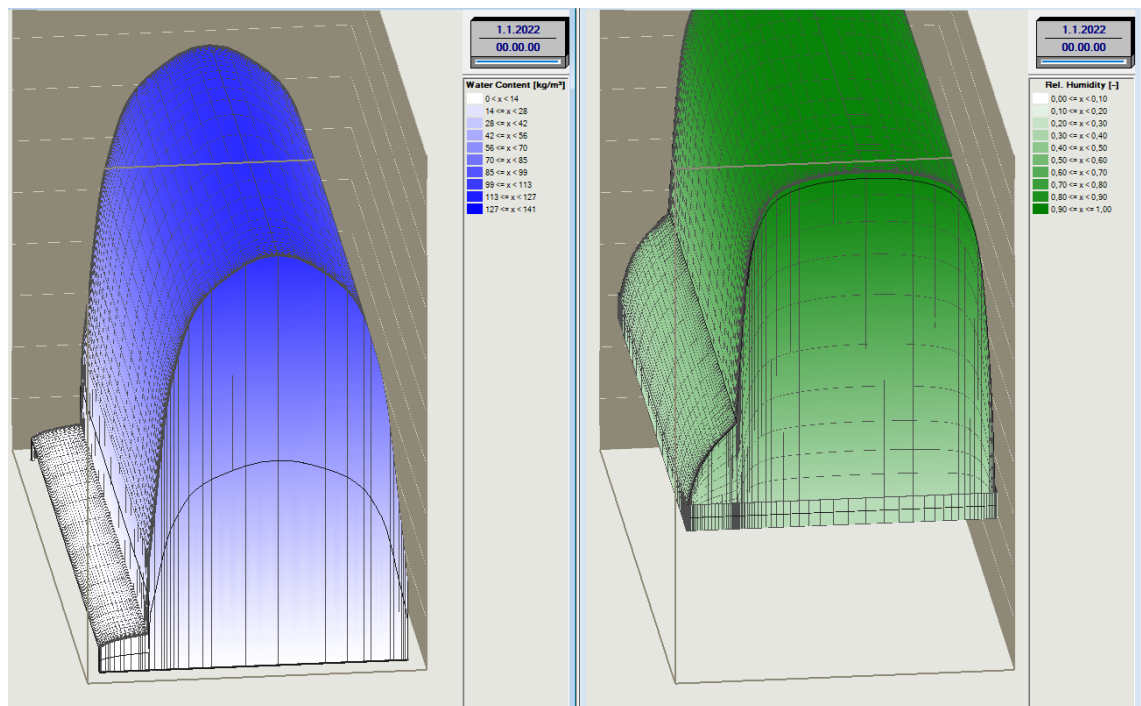
Taulukossa 11 on esitetty mallinuksissa toteutuneet vuoden kuivumisen jälkeen esiintyvät huippuarvot. Huippuarvojen sijainti ei ole kaikissa rakenteissa samalla syvyydellä, mutta ne kuvastavat rakenteeseen jäävää kosteutta ja ovat ainakin karkealla tasolla vertailukelpoisia

Taulukko 11. Kuvitteellisten rakenteiden kosteussisällön ja suhteellisen kosteuden huippuarvot vuoden kuivumisen jälkeen.

Rakenne	Rakenteen korkein kosteussisältö [kg/m ³]	Rakenteen korkein suhteellinen kosteus RH [%]
Rakenne 1	112,2	95,7
Rakenne 2	119,1	96,5
Rakenne 3	112,3	95,7

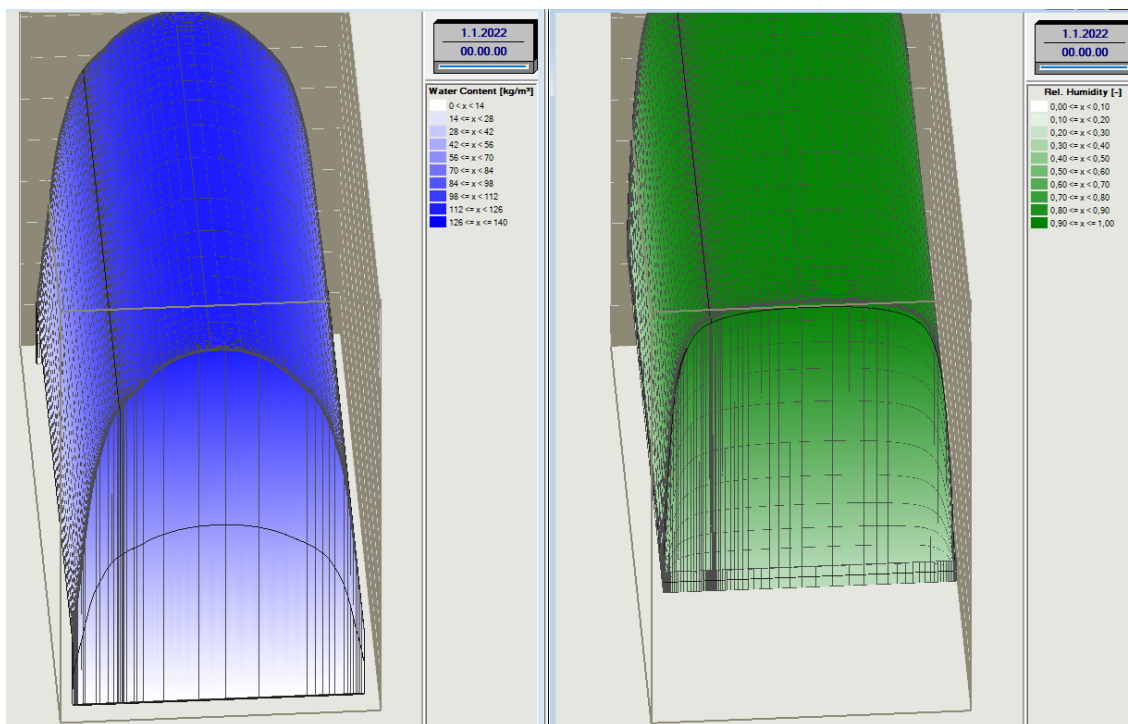
Arvojen erot eivät ole vielä kovin suuret vuodenvuorokauden kuivumisen jälkeen, mutta niistä voidaan tehdä yksi tärkeä havainto. Rakenne 1 ja rakenne 3 saavat hyvin vastaavat arvot vuoden kuivumisen jälkeen. Tämä tarkoittaa sitä, että betonirakenteen pintaan asennettava savi-kiviseos ei hidasta betonirakenteen kuivumista tässä mallinnuksessa. Ilmiö voi ainakin osittain johtua siitä, että betonirakenteen kuivuminen hidastuu, kun se kuivuu [1, s. 118]. Pintaan asennettu savi-kiviseos pitää betonirakenteen pintaa sopivan kosteana, jotta sieltä pääsee siirtymään kosteutta ulos. Savi-kiviseos siirtää poistuvan kosteuden tehokkaasti sisäilmaan ja kokonaiskuivuminen ei hidastu.

Kuvassa 18 on esitetty rakenteen 1 kosteussisältö (vasen puoli), sekä suhteellinen kosteus (oikea puoli) rakenteen läpileikkauksesta. Läpileikkauksesta voidaan myös havaita kuvien vasemmassa reunassa näkyvä 50 mm paksu savi-kiviseos, jonka kosteussisältö ja suhteellinen kosteus ovat selkeästi betonia alhaisempia.



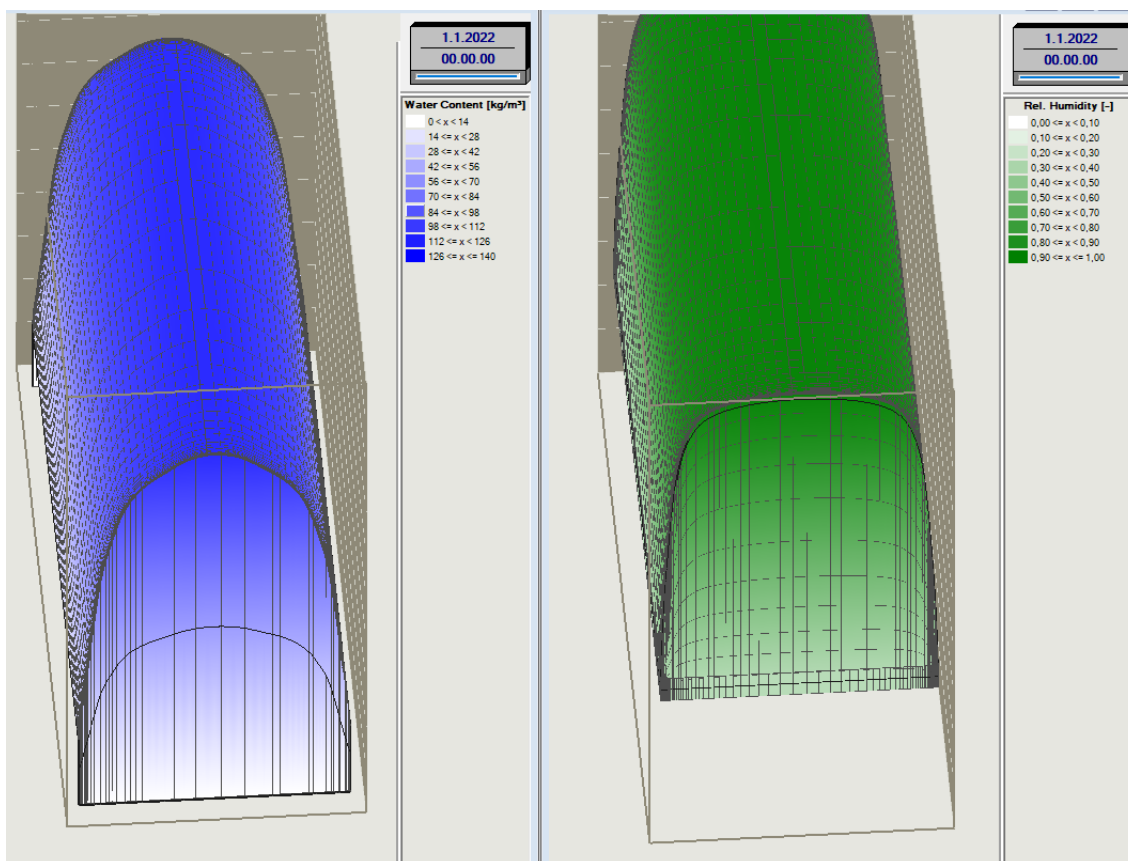
Kuva 18. Rakenteen 1 kosteussisältö (vasen puoli), sekä suhteellinen kosteus (oikea puoli) rakenteen läpileikkauksesta.

Kuvassa 19 on esitetty rakenteen 2 kosteussisältö (vasen puoli), sekä suhteellinen kosteus (oikea puoli) rakenteen läpileikkauksesta. Läpileikkaus on tyypillinen esimerkki kahteen suuntaan kuivuvan homogeenisen rakenteen kosteusprofiilista. Kosteusprofiili muodostaa paraabelin muotoisen kuvion, mikä tarkoittaa pinnan nopeampaa kuivumista verrattuna rakenteen keskiosaan. Kuvista on myös havaittavissa suhteellisen kosteuden epälineaarisuus suhteessa betonin kosteussisältöön.



Kuva 19. Rakenteen 2 kosteussisältö (vasen puoli), sekä suhteellinen kosteus (oikea puoli) rakenteen läpileikkauksesta.

Kuvassa 20 on esitetty rakenteen 3 kosteussisältö (vasen puoli), sekä suhteellinen kosteus (oikea puoli) rakenteen läpileikkauksesta. Havainnot ovat hyvin vastaavat kuin rakenteen 2 kohdalla.



Kuva 20. Rakenteen 3 kosteussisältö (vasen puoli), sekä suhteellinen kosteus (oikea puoli) rakenteen läpileikkauksesta.

6 Tulosten analysointi

Mittauksista saadut tulokset ovat hyvin lupaavia. Savi-kiviseoksella pinnoitettu rakenne kuivuu mittauksien valossa poikkeuksetta paremmin. Mittausten ja mallinnuksien aikana esiintyi kuitenkin paljon epävarmuustekijöitä, jotka heikentävät tulosten luotettavuutta. Niiden läpikäyminen on suotavaa ensin.

6.1 Tutkimuksen luotettavuus

Tutkimustilan olosuhteet olivat hyvin vaihtelevat ja talviaikaan viileät. Tutkimustilana toimi Vihdin Betonin käytössä oleva teollisuushalli. Hallissa oli tutkimusajanjaksolla myös muuta toimintaa, esimerkiksi autokorjaamo. Hallin ovia avattiin usein ja siellä ei ollut

tasaista lämpöä tuottavaa lämmitysjärjestelmää. Koerakenteiden välittömässä läheisyydessä oli puhallinkonvektori, joka puhalsi tutkimusalueelle ilmaa. Puhallettava ilma ei ollut kovin lämmintä, mutta se aiheutti epätasaista ilman vaihtuvuutta tutkimusrakenteiden kesken. Varsinkin alkukuivumisen aikana puhallettu ilma saattaa nopeuttaa rakenteiden kuivumista. Kuivumisen loppupäässä rakenteen pinta on jo tasaantunut hyvin vallitseviin olosuhteisiin, eikä pelkkä puhallus enää tee merkittävää eroa kuivumiseen. Tutkimustilan lämpötila vaihteli kahteen suuntaan kuivuvien rakenteiden tutkimusjakson aikana merkittävästi. Olosuhdelämpötila vaihteli 29.1.2021 – 4.6.2021 välisenä aikana 6,4 °C – 20,0 °C välillä. Yhteen suuntaan kuivuvien rakenteiden lämpötiloja mitattiin rakenteen sisään asennetun kosteusmittarin lämpötila-anturin avulla. Rakenteen sisällä, 70 mm:n syvyydessä pinnasta, lämpötila vaihteli 29.1.2021 – 6.10.2021 välisenä aikana 6,9 °C – 26,9 °C välillä. Hyvin kylmät tai todella kuumat olosuhteet saattavat vääristää porareistä mitattuja kosteusarvoja [8, s. 5]. Lämpötilan suuret vaihtelut voivat myös nopeuttaa rakenteen kuivumista verrattuna tasaiseen olosuhteeseen.

Tarja Merikallio tutki betonilattian riittävää kuivumista väitöskirjassaan – Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa – vuonna 2009. Väitöskirjassa viitataan Nilsson, L-O. & Hegenblad, G. vuonna 1987 tekemään tutkimukseen, jonka tuloksen syntyi betonin kosteusmittauksien muunnoskäyrät eri lämpötilassa tehdyille mittauksille. Tutkimuksen perusteella +20 °C vastaaviin arvoihin muunnetut mitatut arvot voivat erota jopa viisi prosenttiyksikköä, kun lämpötila on +5 °C. Väitöskirjassa Merikallion kuitenkin toteaa myöhempiin tutkimuksiin viitaten, että tämäkin muuntokäyrä on osoittautunut liian epätarkaksi käytettäväksi sellaisenaan. Muuttujia on liian monta, jotta toimivaa yleispätevää muuntokäyrää voitaisiin rakentaa. Betonin suhteellisen kosteuden muuttumiseen lämpötilan myötä vaikuttaa pääasiassa sen ikä, kosteus, vesi-sementti-suhde, hydratoitumisaste, huokosrakenne ja käytetty mittalaite. Väitöskirjaan tutustuttiin tässä tutkimuksessa vain kirjoitustyön loppuvaiheessa luotettavuuden arvioimiseksi. [15, s. 94–95.]

Käytetyn rakennebetonin tietoja ei saatu betonitoimittajalta, vaikka niitä pyydettiin. Betonin vesi-sementtipitoisuus, eli lujuus, vaikuttaa merkittävästi sen kykyyn läpäistä kosteutta [1, s. 426]. Mitä pienempi betonin vesisementtisuhde on, eli mitä lujempaa se on, sitä tiiviimpää se on [1, s. 426]. Nyt mallinuksissa on päädytty käyttämään epätavallisen pehmeää C12/15-betonia. Näin pehmeää betonia ei käytetä tavallisesti, eikä se täytä

raudoitetun rakennebetonin vaatimuksia. C12/15-betonia on sallittua käyttää rasitusluokassa X0, kun rakenne on raudoittamaton, eikä se sisällä teräsosia ja rakenne on kuivassa sisätilassa [16, s. 26–27]. Tässä vaiheessa on vaikea selvittää, onko betoni tosiaan ollut niin pehmeää, vai aiheuttaako jokin muu epävarmuustekijä vääristymän. Kuitenkin mallinnukset saatiin toimimaan vasta C12/15-betonilaadulla.

Tutkimusmenetelmän soveltuvuus tutkimusasetelmaan saattaa olla väärä. Koepaloja on kosteusmitattu betonirakenteiden tutkimusmenetelmillä, eli käytetyt mittaussyvytydet on alun perin kehitetty betonirakenteille. Menetelmän syvytydet on laskettu niin, että rakenteen tiiviin pinnoituksen alle ei pitäisi tasaantua mittauservoa suurempaa kosteutta ajan kuluessa [17, s. 49]. Rakenteesta poistuva rakennuskosteus poistuu rakenteesta hitaasti. Sen poistumisnopeus riippuu poistuvan kosteuden ja sisäilman väliin jäävien rakennekerroksien vesihöyrynläpäisevyydestä. Loput kuivumiseen vaikuttavat tekijät ovat ulkoisia, kuten ympäröivän tilan lämpötila, ilmavirtaukset ja suhteellinen kosteus. Mitä tiiviimpi rakenteen pinta on, sitä tasaisemmin kosteus pyrkii tasaantumaan rakenteen eri syvyyksille. Vastaavasti hengittävällä pinnalla oleva rakenne muodostaa epätasaisen kosteusprofiilin, jossa kosteus on syvällä rakenteessa tasaisempaa ja pintaa lähestyttäessä laskee eksponentiaalisesti. Pinnoittamaton betonilaatta on tässä tapauksessa hengittävä rakenne, koska sen pinnassa ei ole betonia tiiviimpää pintakerrosta. Betonirakenteiden pinnoitettavuusmittaukset perustuvat tähän ajatukseen ja mittaussyvytydet on määritelty sopivalle syvyydelle eri rakennetyyppeihin. Kokeellisesti ja laskennallisesti on määritetty sopivat laskukaavat mittauksen syvyyden määritykselle. Tälle syvyydelle tehdyille mittauksille on annettu raja-arvoja eri päällysteille, jotta rakenteen kosteuden tasaantuessa pinnoitemateriaalin alle ei tapahdu materiaalin vaurioitumista. Materiaalille annettu raja-arvo voi perustua materiaalin vesihöyrynläpäisevyyteen tai sen vaurioherkkyyteen. Tehdyssä tutkimuksessa tätä logiikkaa on hyödynnetty niin, että savi-kiviseos ajatellaan betonina mittaussyvyyksiä määriteltäessä. Betonirakenne, jonka pintakerroksena on savi-kiviseos, ei ole enää homogeeninen ja sen kosteusprofiili ei käyttäydy samalla tavalla, kuin pelkän homogeenisen betonirakenteen. Mahdollisesti savi-kiviseoksella pinnoitetuissa rakenteissa mittaussyvyyksiä tulisi kasvattaa, jotta pinnoittamisen jälkeen pinnoitteen alle tasaantuva kosteus vastaisi saman paksuisen massiivibetonisen rakenteen kosteuksia. Aihetta ei tutkittu tämän tutkimuksen yhteydessä. [13, s. 1–29.]

Mallintamalla iteroidut materiaaliparametrit nojautuvat vahvasti tehtyihin mittauksiin koe-rakenteissa. Lisäksi materiaaliparametreja on jouduttu iteroimaan monessa vaiheessa. Aluksi etsittiin toimivat ominaisuudet käytetylle betonille, jonka jälkeen tehtiin ensimmäinen mallinnus rakenteelle VR7. Tämän mallinnuksen pohjalta etsittiin sopivat parametrit savi-kiviseokselle. Kyseessä on toimenpiteiden sarja, joista jokainen osa-alue vaikuttaa seuraaviin vaiheisiin. Virhe kosteusmittaustuloksissa aiheuttaa alkuolosuhteiden vääristymän, joka on omiaan vaikuttamaan sopivan betonilaadun valintaan Wufissa. Väärä betonilaatu Wufissa aiheuttaa sen, että savi-kiviseoksen materiaaliparametrit valitaan vääräksi oikean tuloksen saavuttamiseksi. Mitä pidempi toisiin linkittyvien toimenpiteiden sarja on, sitä suuremmalla todennäköisyydellä jossain kohdassa tapahtuu virhe, tai mitaustuloksien ja lähtötietojen epätarkkuuksien aiheuttama tulosten virhe kasvaa merkittäväksi.

Tämän tutkimuksen luotettavuus riippuu vahvasti sen tavoitteista. Tavoitteet olivat tarkemmassa lopputuloksessa kuin mihin päästiin. Jos tavoitteena olisi ollut tutkia vain, vaikuttaako savi-kiviseoksen vaihtaminen pintabetonin tilalle positiivisesti rakenteen kuivumiseen, vastaus olisi kyllä, ja tutkimus olisi luotettava. Jos tutkimuksen tavoite asetetaan tarkemmaksi, ja kysymyksenä on, kuinka paljon nopeammin savi-kiviseoksella pinnoitettu rakenne kuivuu verrattuna betonirakenteella pinnoitettuun, tarkka vastaus voidaan laskea tuloksista, mutta tutkimus ei ole luotettava tällä tarkkuudella.

6.2 Tutkimuskysymys 1

Ensimmäinen tutkimuskysymys oli, aiheuttaako rakenteen pinnoitus savi-kiviseoksella merkittävän eron rakenteen kuivumiseen verrattuna betonilla pinnoittamiseen? Tutkimustuloksista löydetään vahvoja viitteitä siitä, että ero on merkittävä. Vältän tuloksissa tarkkojen lukujen käyttöä, koska tutkimuksen luotettavuus ei riitä siihen. Lukija voi itse tutkia viivadiagrammeista tarkempia lukuja, mutta niiden käytössä tulee toteuttaa tarkkaa harkintaa.

Savi-kivipinnoitteen parempi kosteudenläpäisy on havaittavissa kaikista tutkimuskappaleista. Tutkittavissa rakenteissa TR9 ja VR9 tämä näkyy hyvin, koska 50 mm:n savi-kiviseos- ja betonipinnoite olivat ainoita rakennuskosteutta sisältäviä rakennekerroksia. Näiden kahden rakenteen kuivumista tutkittaessa havaitaan selkeä ero, ja se ei voi johtua

mistään muusta, kuin savi-kiviseoksen nopeammasta kuivumisesta. Muuten kosteus-käyrät eivät voi erkaantua toisistaan. Tutkimuskappaleiden alkuperäinen tarkoitus oli tutkia pintarakenteiden mahdollisesti aiheuttamaa kosteusriskiä rakenteen puu- ja eristerakkeille. Mittaustulokset osoittavat, että savi-kiviseoksen aiheuttama riski on pienempi.

Savi-kiviseoksen nopeampi kuivuminen yksinään ei vielä kerro pinnoitteen alapuolisen rakenteen nopeammasta kuivumisesta. Savi-kiviseos voi kuivua betonia nopeammin, koska se sisältää vähemmän sitoutumatonta vettä rakennusvaiheessa. Jotta sen läpäisykyvystä voidaan tehdä päätelmiä, tulee tarkastella rakennetta syvemmältä. Arvostelusyvyydeltä A tehdyt mittaukset osoittavat kaikki samaa: savi-kiviseoksella pinnoitetut rakenteet ovat kuivempia, kuin betonirakenteet samalla syvyydellä. Tulos johtuu monen asian summasta. Savi-kiviseos läpäisee kosteutta betonia paremmin. Savi-kiviseoksella pinnoitetussa rakenteessa on myös vähemmän rakennuskosteutta, jonka tulee poistua. Lopputuloksena rakenteen tavoitekosteus saavutetaan aiemmin. Hyöty tulee esille rakenteissa, joissa betonia voidaan korvata savi-kiviseoksella. Jos rakenteessa on kantava betonirakenne ja vaihtoehdot ovat savi-kiviseoksen lisääminen päälle tai kantava rakenne jää paljaaksi, ei kuivumisvaiheessa juuri synny eroa. Savi-kiviseosta voidaan käyttää valmiina pintamateriaalina, jolloin saavutetaan hyvin hengittävä pinta, tai sillä voidaan korvata tasoite- tai korotuskerrokseksi tarkoitettu betonikerros, jonka päälle tulee erillinen pintamateriaali. Näissä tilanteissa saavutetaan savi-kiviseoksen parhaat edut.

6.3 Tutkimuskysymys 2

Toinen tutkimuskysymys oli, voidaanko savi-kiviseoksella rakenteen pinnassa ratkaista kosteusongelmaisen alapohjan ongelmia? Hengittävyden puolesta voidaan ratkaista. Savi-kiviseos toimii valmiina pintana vahattuna, ja kuten testirakenne TR8 näyttää, kuivumista tapahtuu vahatun pinnan läpi vielä hyvin. TR8-rakenne kuivui paremmin, kuin vastaava betonipintainen rakenne ja betonirakenteen hengittävyys yleensä riittää ylimääräisestä kosteudesta kärsiviin alapohjarakenteisiin. TR8-rakenteen 62 mm:n syvyydeltä tehty mittaustulos 4.6.2021 oli RH 74,2 %. Vastaava tulos VR4-rakenteesta oli RH 84,7 %.

Kosteusongelmaiset alapohjat kärsivät yleensä liian tiivistä pintamateriaalista, lämmöneristeen puuttumisesta ja/tai salaoituksen puutteellisesta toiminnasta. Näistä ongelmista savi-kiviseos ratkaisee liian tiiviin pintamateriaalin ongelman, koska sillä saadaan miellyttävä ja toimiva pinta ilman tiiviitä pintamateriaaleja. Savi-kiviseoksen soveltuvuus tilan käyttöön tulee aina selvittää erikseen. Jos alapohja kärsii lämmöneristeen puutteesta, voidaan savi-kiviseospintaa ajatella asennettavaksi, kunhan tilan lämmitys ja ilmanvaihto ovat riittävät. Savi-kiviseoksella ei voida kapseloida haitta-aineita alapohjan sisään.

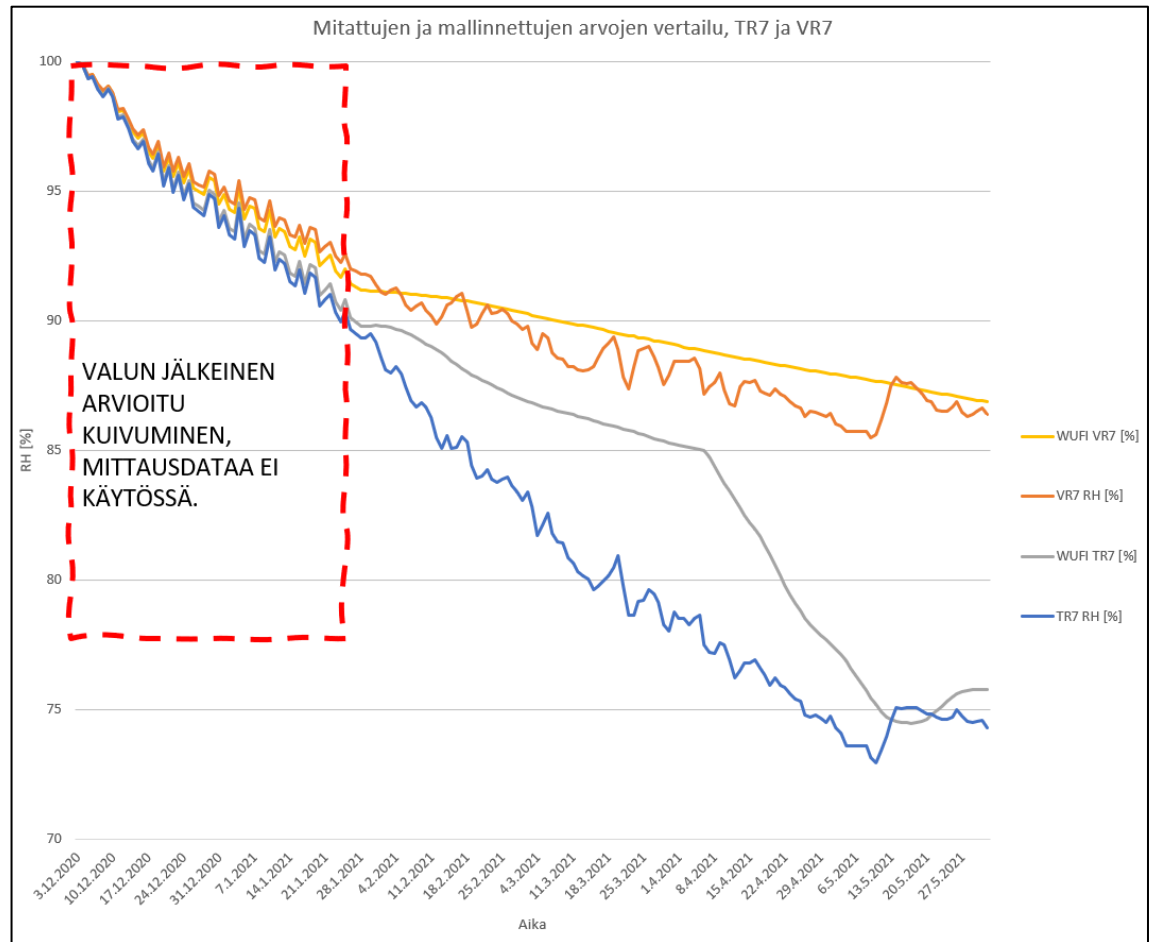
Näiden lisäksi tulee arvioida savi-kiviseoksen mikrobiologinen sietokyky kohdekohtaisesti. Aiheesta on tehty muita tutkimuksia, joita ei käsitellä tämän tutkimuksen yhteydessä.

7 Yhteenveto

Savi-kiviseos on potentiaalinen materiaali moneen käyttötarkoitukseen. Betonin korvaaminen osittain tai kokonaan savi-kiviseoksella nopeuttaa rakenteen kuivumista ja parantaa sen käytön aikaista hengittävyttä. Alhaisempi rakennuskosteus ja suuri hengittävyys nopeuttavat rakentamisen kokonaisaikataulua silloin, kun aikataulu vaiheistuu vahvasti rakenteiden kuivumisen mukaan. Maanvastaisissa alapohjarakenteissa suuresta hengittävydestä on hyötyä. Perusmaassa on aina kosteutta. Kun alapohjan tehdään maanvaraisena ja pohjamaa saadaan riittävän kantavaksi, voidaan savi-kiviseosta asentaa myös ilman betonirakennetta. Näin saavutetaan erittäin hengittävä rakenne, joka tasaa myös sisäilman kosteutta kuivaan talviaikaan. Alapohjan eristävydestä, tilan ilmanvaihdosta ja lämmityksestä on kuitenkin pidettävä huolta.

Tutkimuksissa näytettiin kiistatta toteen, että betonin korvaaminen savi-kiviseoksella aiheuttaa rakenteen nopeamman kuivumisen ja vähentää sen rakennuskosteutta. Tutkimuskappaleita jäljittelevät rakennusfysikaaliset mallinnukset noudattivat yllättävän hyvin mitattuja arvoja. Niiden luottamusta kuitenkin heikensi käytettyjen materiaalitietojen puuttuminen, kuten runkobetonin vesi-sementtisuhde. Betonin lujuutta jouduttiin mallinuksissa heikentämään epäilyttävän paljon, jotta mallinnukset saatiin vastaamaan mitattuja arvoja. Mallinuksien avulla selvitettyjen savi-kiviseoksen materiaaliparametrien

jatkokäytössä tulee käyttää harkintaa. Ne eivät välttämättä ole kovin tarkkoja. Kuvassa 21 on vertailu yhteen suuntaan kuivuvien TR7- ja VR7-testirakenteiden mittaustuloksia vastaaviin mallinnettuihin arvoihin. Arvot ovat 70 mm:n syvyydeltä yläpinnasta.



Kuva 21. TR7- ja VR7-testirakenteiden mittaustuloksia verrattuna vastaaviin mallinnettuihin arvoihin.

Rakentamisen hiilijalanjäljen merkityksen kasvaessa, on tärkeää tutkia uusia vaihtoehtoja rakentaa tai palauttaa käyttöön vanhoja toimivia tapoja. Saven käytölle rakentamisessa on perusteet sen hyvän saatavuuden ja matalan hiilijalanjäljen vuoksi. Savella on myös tunnetusti hyviä vaikutuksia sisäilman kosteustasapainoon ja akustiikkaan. Tarkeitava tutkimusehdotuksia on pohdittu luvussa 8.

8 Pohdinta

Opinnäytetyöprosessi alkoi syksyllä 2020, kun aiheen idea alkoi muotoutua yhdessä Collaboratorio-arkkitehtitoimiston ja Vihdin Betonin kanssa. Luonnonbetonihankkeen ympärillä oli tarvetta tuottaa tutkimusta ja selvitystä laajasti. Rakennusfysikaaliset mittaukset osuivat opinnäytetyöntekijän omaan työhistoriaan hyvin ja pian oli ensimmäiset vedokset koerakenteista piirrettynä. Koepalat haluttiin nopeasti kuivumaan, koska tiedettiin yhteen suuntaan kuivuvien rakenteiden vaativan paljon aikaa, jotta eroja alkaa muodostua. Koepalat päästiin valmistamaan marraskuussa 2020 ja mittauslaitteet asennettiin joulukuussa. Varsinainen työ pääsi alkamaan.

Prosessin aikana ilmeni paljon yllätyksiä ja virheitäkin tehtiin. Ontelolaatat eivät koskaan saapuneet Vihdin Betonin tiloihin ja alkupään mittaustulokset hävisivät käyttäjän virheen takia. Koepalojen kuivuminen kuitenkin alkoi rivakasti ja ensimmäiset mittaustulokset vaikuttivat lupaavilta. Kahteen suuntaan kuivuville rakenteille oli varattu mittarit kuudeksi kuukaudeksi ja yhteen suuntaan kuivuville rakenteille 12 kuukaudeksi. Jatkuvien mittausten lomassa tehtiin myös kertamittauksia, mutta ne jäivät harmittavan vähäisiksi, koska välimatkaa koepaikalle oli melko paljon. Mittausjakso oli kuitenkin suoraviivainen ja viimeisten mittausten päätyttyä oli aika katsoa tuloksia.

Mittausdatan muotoilu sopivaan muotoon oli yllättävän työlästä, puhumattakaan datan sovittamisesta Wufi-laskentaohjelmaan. Opinnäytetyösuunnitelmasta lähtien oli tarkoitus tehdä kenttämittauksien jälkeen vastaavia simulaatioita Wufi2D-mallinnusohjelmalla. Tarkoituksena luoda luotettavuutta mittauksille ja mahdollistaa rakenteiden tutkimisen jatkossa mallintamalla. Koetilanteen toistaminen mallinnusohjelmassa osoittautui yllättävän vaikeaksi. Tästä voidaan tehdä myös päätelmä toisin päin, että osa alalla tehtävistä mallinuksista ei välttämättä korreloi kovin vahvasti todellisuuden kanssa. Laskentaohjelmia on kritisoitu kautta aikojen rakentamisen alalla ja kritiikissä on myös perää. Osamisen ja ymmärryksen tulee olla vahva, jotta työ voidaan antaa ohjelman tehtäväksi.

Mallinnuksien takkuaminen aiheutti pelon siitä, että koetilan olosuhteet olivat ajoittain liian kylmät ja mittaustulokset eivät toimi. Heräsi epäily koko koeasetelman toimivuudesta. Tuntemukset lienevät melko normaaleja kasvukipuja oppimisen tiellä. Tästä alkoi kuitenkin liki kahden vuoden ajanjakso, jolloin työ ei juuri edennyt. Prosessi jatkui taas

vuonna 2023, ja vastauksia alkoi löytyä. Vastauksien löytyessä motivaatio palasi ja työ pääsi päätökseensä.

Jos toistaisin tutkimuksen nyt, tekisin sen toisin. Työn aikana on tullut esiin paljon asioita, jotka olisi pitänyt ottaa huomioon. Vähennän seuraavan aiheen pariin mahdollisesti ryhtyvän tuskaa ja kerron niistä.

Työn aikana kysyin monesti itseltäni, oliko koekappaleita liikaa? Koska testirakenteessa ja vertailurakenteessa oli eri määrä betonia, ei yhdeltä ja samalta syvyydeltä jatkuvien mittausten tekeminen välttämättä ollut hyvä tapa tutkia kappaleiden kuivumista. Jatkuvatoinen kosteusantureiden määrä suhteessa koekappaleiden määrään oli vähäinen. Niitä riitti yksi kutakin koekappaletta kohden. Koekappaleiden käyttäytymistä kuivumislanteessa olisi mahdollisesti ollut helpompi seurata, jos kappaleita olisi ollut vähemmän ja jokaiseen kappaleeseen olisi porattu esimerkiksi neljä anturia. Silloin kappaleiden kosteusprofiili olisi pystytty tallentamaan koko kuivumisen ajalta ja lähtöarvot olisi ollut mahdollista viedä tarkempina mallinnusohjelmaan. Kappaleista koejakson aikana poistunut kosteus olisi myös ollut mahdollista määrittellä melko tarkkaan. Mallinnusohjelma pystyy laskemaan poistuvan kosteuden määrän, mutta tulos on hyvin epätarkka, ellei lähtöarvot ole oikein.

Mallinnusvaiheessa heräsin yhteen ongelmaan, joka ei ollut käynyt mielessä työtä suunniteltaessa. Mallinnusohjelma ei ymmärrä uutta betonia. Uutta betonia valettaessa sementti ja vesi reagoivat keskenään ja alkaa hydrataatio. Hydrataatiossa vesi sitoutuu sementtiin ja reaktiossa muodostuu lämpöä. Hydrataation lisäksi vettä sitoutuu sementin geelihuokosiin. Kokonaisuudessa vettä sitoutuu pysyvämpään olomuotoon 40–45 % sementin painosta. Loput betonimassaan sekoitetusta vedestä jää vapaaksi vedeksi, joka kuivatetaan pois. [14, s. 53.]

Edellä mainituiden syiden takia mallinnusta ei voida aloittaa valupäivästä ja asettaa betonin lähtökosteudeksi RH 100 %. Mallinnuksen aloitukselle tuli valita hetki valun jälkeen, jolloin betonin kemiallinen reaktio oli pääasiassa ohi, ja asettaa materiaalikerroksille hetkeen sopivat alkuolosuhteet. Kemiallinen reaktio jatkuu tosia-asiassa vuosia, mutta se hidastuu merkittävästi ja sen vaikutus betonin kosteuteen vähenee nopeasti valun

jälkeen. Betonin lujuuden kehitys, eli kemiallinen reaktio, on jo maltillista 28 vuorokauden iässä. Asian voi todeta tutkittaessa betonin lujuuden kehitystä ajan funktiona. [14, s. 55.]

Työn aikana tuli mieleen useita mahdollisia jatkotutkimuksia, jotka tarkentaisivat savi-kiviseoksen käyttäytymistä ja ominaisuuksia:

1. Koepalojen tutkimien punnitsemalla, jolloin selviäisi rakenteesta poistuva kokonaisvesimäärä
2. Vastaava tutkimus jatkuvatoimisilla kosteusmittausantureilla niin, että antureita on vähintään neljällä eri syvyydellä rakenteen kosteusprofiilin määrittämiseksi
3. Vastaava tutkimus tasaisissa lämpötilaolosuhteissa +20 °C
4. Kuivumisjakson lopuksi kaikkien koepalojen pinnoitus tiiviillä pintamateriaalilla ja tasaantumisen jälkeen kosteuden mittaaminen tiiviin pintamateriaalin alta.

Loppu hyvin, kaikki hyvin. Työ saatiin päätökseen ja matkan varrella kertyi paljon oppia. Isoimpia askelia otettiin kosteusmittauksien kenttäkokeiden huomioitavissa asioissa ja Wufi2D-ohjelman käytössä. Pienempiä asioita jäi talteen niin lukemattomia, ettei niitä edes tiedosta.

Lähteet

- 1 Rakennusfysiikka 1. 2014. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset RIL 255-1-2014. Tampere: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 2 Saviyhdistys. Kevytsavi. <<http://www.saviry.fi/rakentaminen/kevytsavi.html>>. Luettu 1.5.2021.
- 3 Volhard, Franz, suomeksi toimittanut Westermarck, Mikael. 1994. Savirakentaminen. Helsinki: Rakennusalan kustantajat.
- 4 Kurki-Suonio, Inari. 2016. Uudenmaan savien painumaominaisuuksien määrittäminen yhdistämällä tutkimusmenetelmiä. Diplomityö. Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo.
- 5 RakMk C2. 1998. Veden- ja kosteudeneristys – Määräykset ja ohjeet 1998. Ympäristöministeriön kumottu säännös. <<https://www.edilex.fi/data/rakentamis-maaraykset/c2.pdf>>. Luettu 18.12.2023.
- 6 Saviyhdistys. Massiivisavi. <<http://www.saviry.fi/rakentaminen/massiivisavi.html>>. Luettu 1.5.2021
- 7 Röhlen, Ulrich. 2011. Earth Building Practice, Planning -Design - Building. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- 8 Lundsten, Bengt & Achcar, Leticia & Westermarck Mikael. 1994. Selvitys savirakentamisesta. Espoo: Teknillinen Korkeakoulu.
- 9 Ströforsin ruukki. <<https://stromforsinruukki.com/majoitu/krouvinmaki/>>. Luettu 23.4.2021.
- 10 Kaila, Panu. 2000. Talotohtori - rakentajan pikkujättiläinen. Porvoo: WSOY.
- 11 Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje. 2020. 5. painos. <<https://puu-info.fi/wp-content/uploads/2020/07/Eurokoodi-5-Lyhennetty-suunnitteluohje-5.-PAINOS-2020-PÄIVITYS-22.7.-web.pdf>>. Luettu 18.12.2023.
- 12 Luonnonbetoni. <<https://www.luonnonbetoni.fi/>>. Luettu 13.12.2023.
- 13 RT 103333. 2021. Betonin suhteellisen kosteuden mittausta. Rakennustieto.
- 14 By201. 2012. Betonitekniikan oppikirja 2004. 7. painos. Vantaa: BY-Koulutus Oy.

- 15 Merikallio, Tarja. 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Väitöskirja. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- 16 By61. 2011. Betonirakenteiden suunnitteluohje RIL 202–2011. Saarijärvi: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry & Suomen Betoniyhdistys ry
- 17 By45. 2023. Betonilattiat 2023. 6. painos. Vaasa: BY-Koulutus Oy.

Liite 1, Rakennekortit

SISÄLLYSLUETTELO JA YLEISET OHJEET

VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

SISÄLLYSLUETTELO:

TR1+VR1	ONTELOLAATTA 037 + 20 mm PINTASAVI + VERTAILURAKENNE
TR2+VR2	ONTELOLAATTA 037 + 50 mm PINTASAVI + VERTAILURAKENNE
TR3+VR3	MASSIIVILAATTA 260 mm + 20 mm PINTASAVI + VERTAILURAKENNE, KAHTEN SUUNTAAN KUIVUVA
TR4+TR5+VR4	MASSIIVILAATTA 260 mm + 50 mm PINTASAVI + MASSIIVILAATTA 260 mm + 50 mm PINTASAVI + VERTAILURAKENNE, KAHTEN SUUNTAAN KUIVUVA
TR6+VR6	MASSIIVILAATTA 260 mm + 20 mm PINTASAVI + VERTAILURAKENNE, YHTEEN SUUNTAAN KUIVUVA
TR7+VR7	MASSIIVILAATTA 260 mm + 50 mm PINTASAVI + VERTAILURAKENNE, YHTEEN SUUNTAAN KUIVUVA
TR8	MASSIIVILAATTA 260 mm + 50 mm PINTASAVI + PINTAKÄSITTELY, KAHTEN SUUNTAAN KUIVUVA
TR9+VR9	PUURANKALATTIA + 50 mm PINTASAVI + VERTAILURAKENNE, KAHTEN SUUNTAAN KUIVUVA

OLOSUHTEIDEN SEURANTA:

RAKENTEEN VALMISTAMISEN ALOITUS VAATII TILAN SUHTEELLISEN KOSTEUDEN JA LÄMPÖTILAN SEURANNAN. SEURANTAAN RIITTÄÄ 1 MITTAUSTULOS JOKAISelta ARKIPÄIVÄLTÄ.

RAKENNEBETONISTA TARVITTAVAT TIEDOT

- KIVIAINEKSEN SUURIN RAEKOKO
- MASSAN VESISEMENTTISUHDE
- MASSAN SUUNNITTELUJUUS
- KÄYTETYT LISÄAINEET

RAKENTEIDEN VALMISTUS:

RAKENTEET VALMISTETAAN RAKENNEKORTTIEN OHJEIDEN MUKAISILLA AINEILLA. RAKENTEISIIN ASENNETAAN TARVITTAESSA NOSTOKOUKUT. MASSIIVILAATTOJEN PINNAT VOIDAAN SLIIPATA TAI HIERTÄÄ TASAISIKSI. SEMENTTILIIMA HIOTAA ENNNE PINTARAKENTEEN ASENNUSTA. ONTELOLAATTOJEN PINNAT JÄTETÄÄN EPÄTASAISIKSI, KUTEN NORMAALISSA ONTELOLAATTOJEN VALMISTUKSESSA. KANTAVAT RAKENTEET JÄLKIHOIDETAAN KASTELEMALLA JA MUOVILLA PEITTÄMÄLLÄ NOIN KAHDEN VIIKON AJAN, PINTARAKENTEEN ASENTAMISEEN ASTI. PINTARAKENNE ASENNETAAN HETI JÄLKIHOIDON PÄÄTTYTTYÄ.

RAKENTEIDEN KOSTEUSMITTAUKSET:

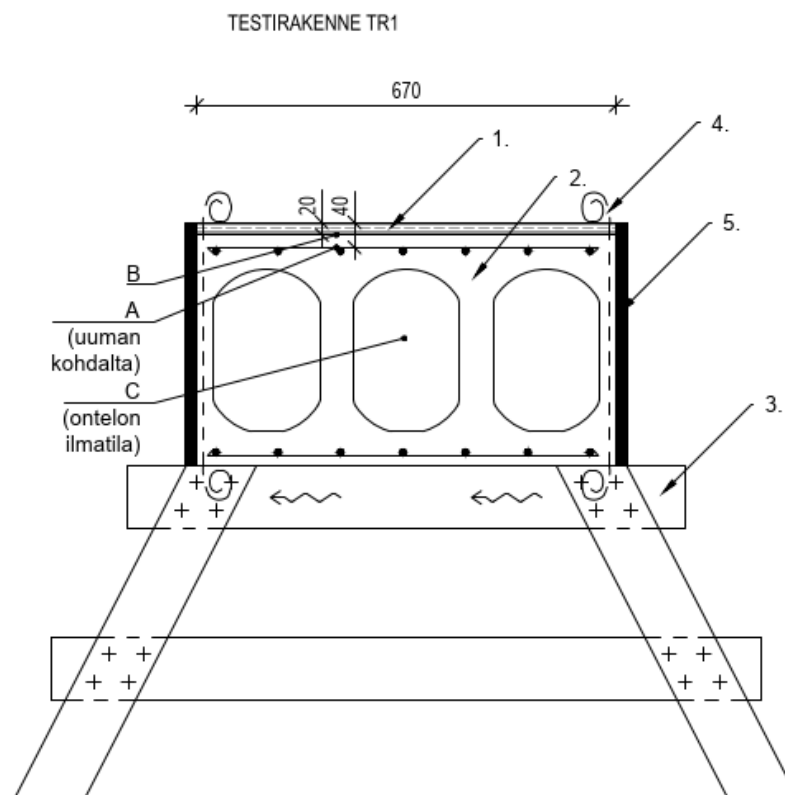
KOSTEUSMITTAUKSET ON MERKITYY RAKENTEISIIN KIRJAIMILLA. JOS RAKENTEISIIN SAADAAN JATKUVAA MITTAUSTA SUORITTAVIA LOGGEREITA, TULEE NE ENSISIJAISESTI ASENTAA MITTAUSPISTEESEEN A. MUITA MITTAUSPISTEITÄ MITATAAN RAKENTEEN VALMISTUKSEN JÄLKEEN PORATTAVIIN REIKIIN ASENNETTAVISTA MUOVIPUTKISTA. MITTAUSPUTKET ASENNETAAN 3 PÄIVÄÄ ENNEN ENSIMMÄISTÄ KOSTEUSMITTAUSTA. ENSIMMÄINEN MITTAUS SUORITETAAN 2-4 VIIKOA RAKENTEEN VALMISTUMISESTA JA SEN JÄLKEEN KAHDEN VIIKON VÄLEIN.

VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

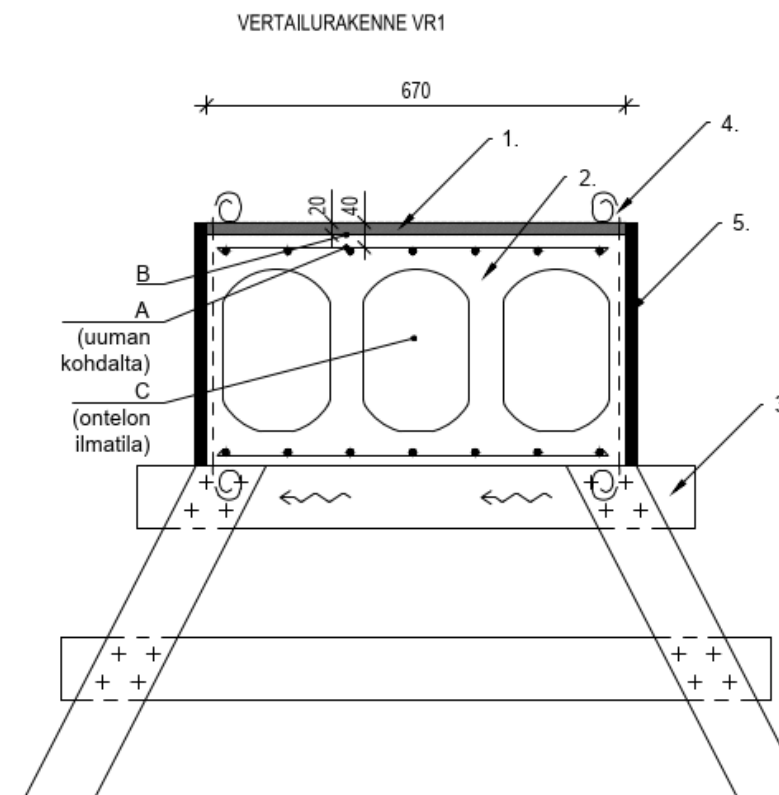
TESTIRAKENNE 1 (TR1)
VERTAILURAKENNE 1 (VR1)

ONTELOLAATTA 037 + 20 mm PINTASAVI

MITTAKAAVA
1:10



- | | | |
|----|--------|---|
| 1. | 20 mm | PINTASAVI |
| 2. | 370 mm | ONTELOLAATTA 037, C50/60, PITUUS NOIN 600 mm, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100 |
| 3. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |



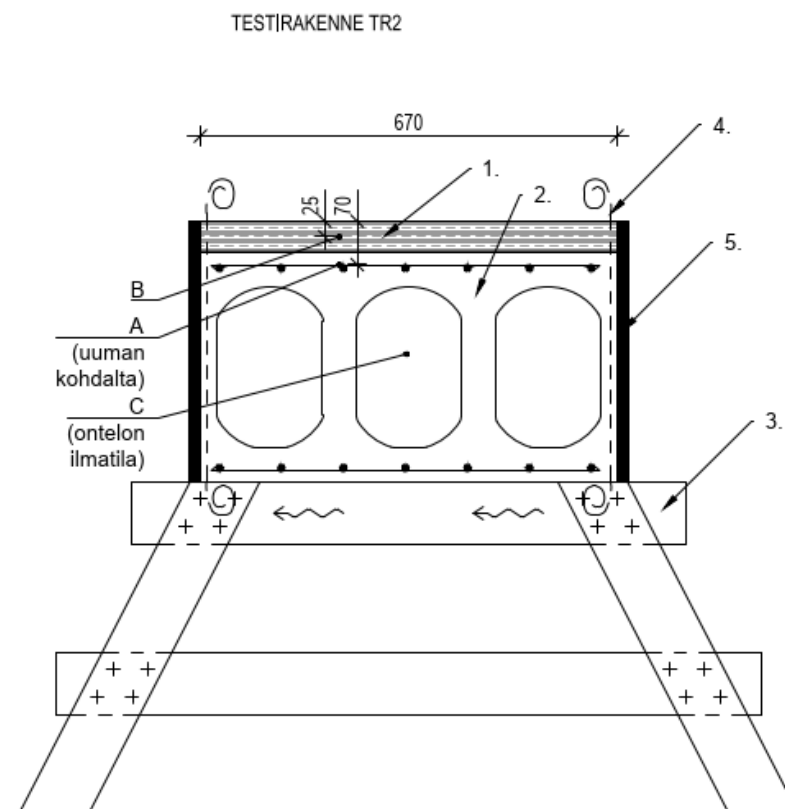
- | | | |
|----|--------|---|
| 1. | 20 mm | KUITUVAHVISTEINEN, SEMENTTIPOHJAINEN TASOITE |
| 2. | 370 mm | ONTELOLAATTA 037, C50/60, PITUUS NOIN 600 mm, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100 |
| 3. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |

VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

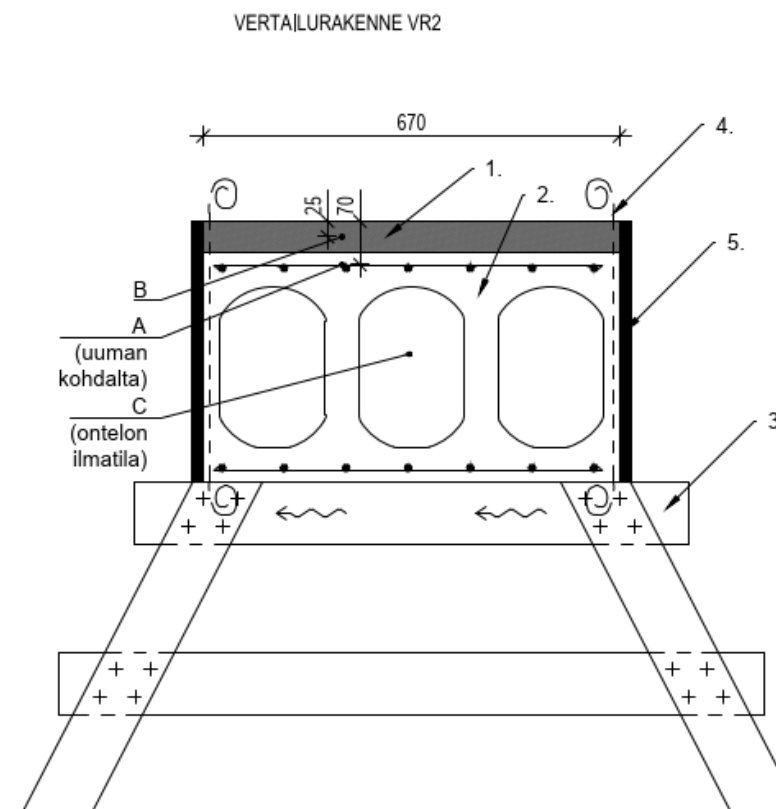
TESTIRAKENNE 2 (TR2)
VERTAILURAKENNE 2 (VR2)

ONTELOLAATTA O37 + 50 mm PINTASAVI

MITTAKAAVA
1:10



1. 50 mm PINTASAVI
2. 370 mm ONTELOLAATTA O37, C50/60, PITUUS NOIN 600 mm, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100
3. ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI
4. KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI
5. MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI



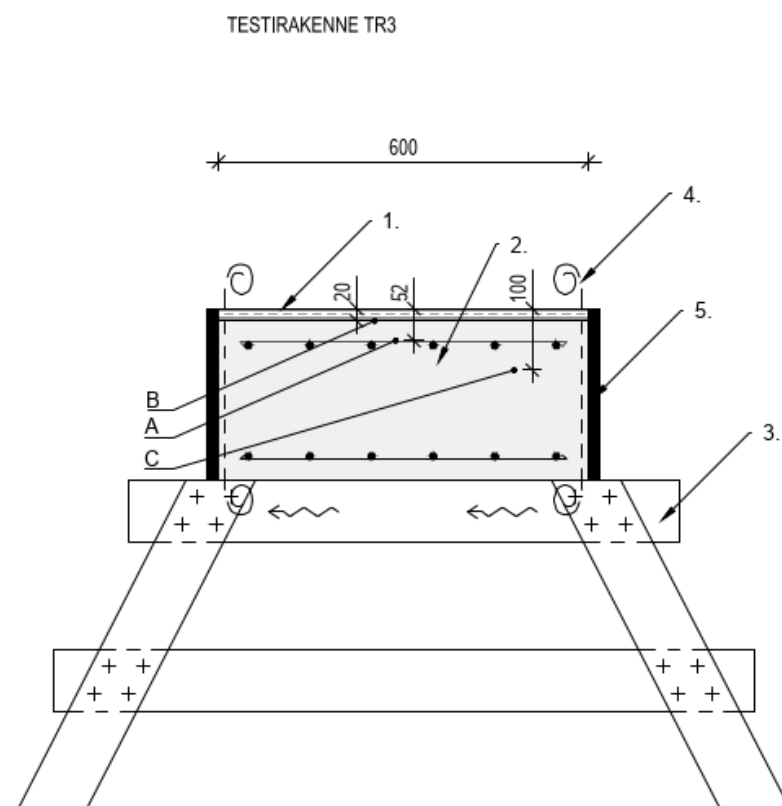
1. 50 mm LATTIABETONI
2. 370 mm ONTELOLAATTA O37, C50/60, PITUUS NOIN 600 mm, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100
3. ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI
4. KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI
5. MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI

VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

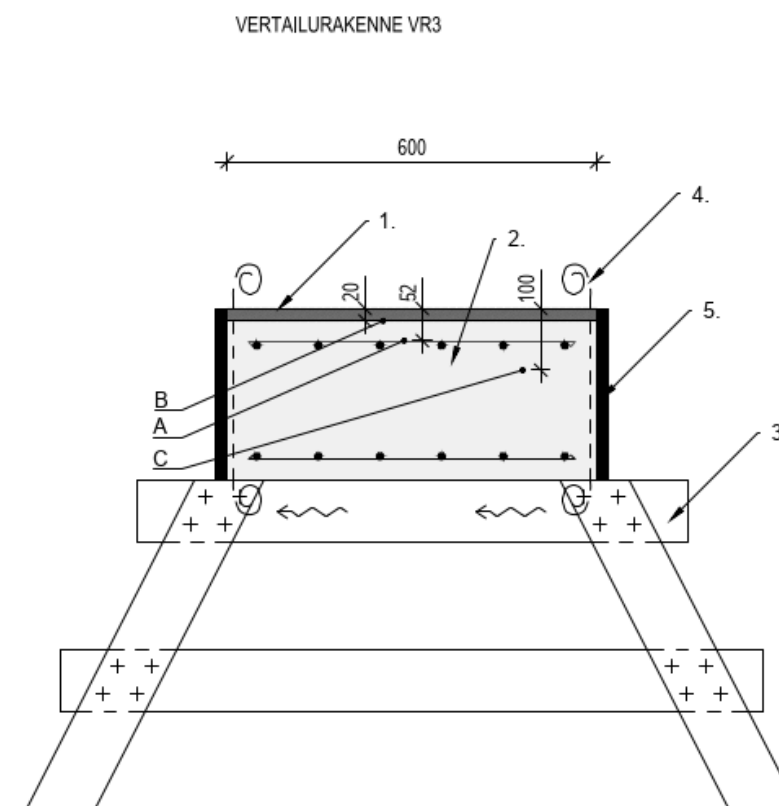
TESTIRAKENNE 3 (TR3)
VERTAILURAKENNE (VR3)

MASSIIVILAATTA 260 mm + 20 mm PINTASAVI
KAHTEN SUUNTAAN KUIVUVA

MITTAKAAVA
1:10



- | | | |
|----|--------|--|
| 1. | 20 mm | PINTASAVI |
| 2. | 260 mm | MASSIIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEN TEKOA |
| 3. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |



- | | | |
|----|--------|--|
| 1. | 20 mm | KUITUVAHVISTEINEN, SEMENTTIPOHJAINEN TASOITE |
| 2. | 260 mm | MASSIIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEN TEKOA |
| 3. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |

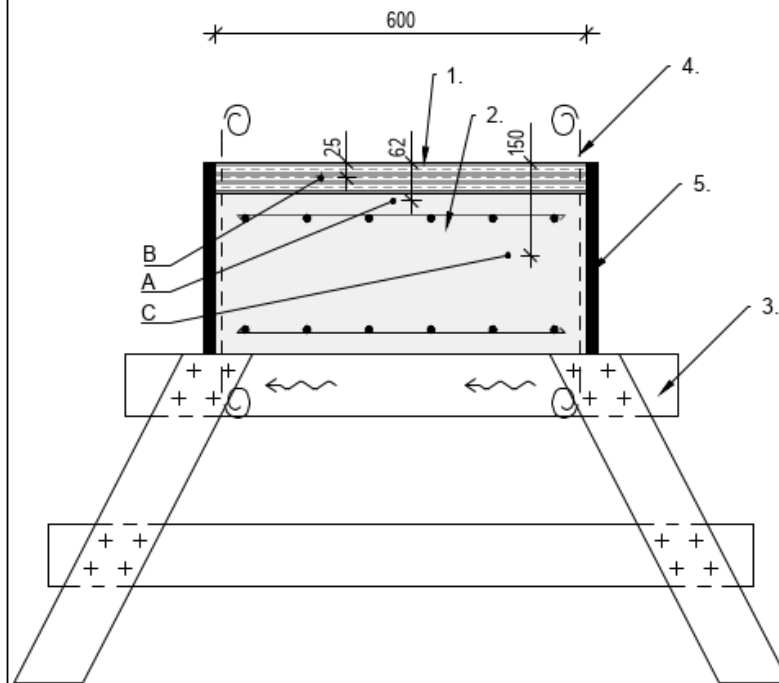
VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

TESTIRAKENNE 4 (TR4)
TESTIRAKENNE 5 (TR5)
VERTAILURAKENNE 4 (VR4)

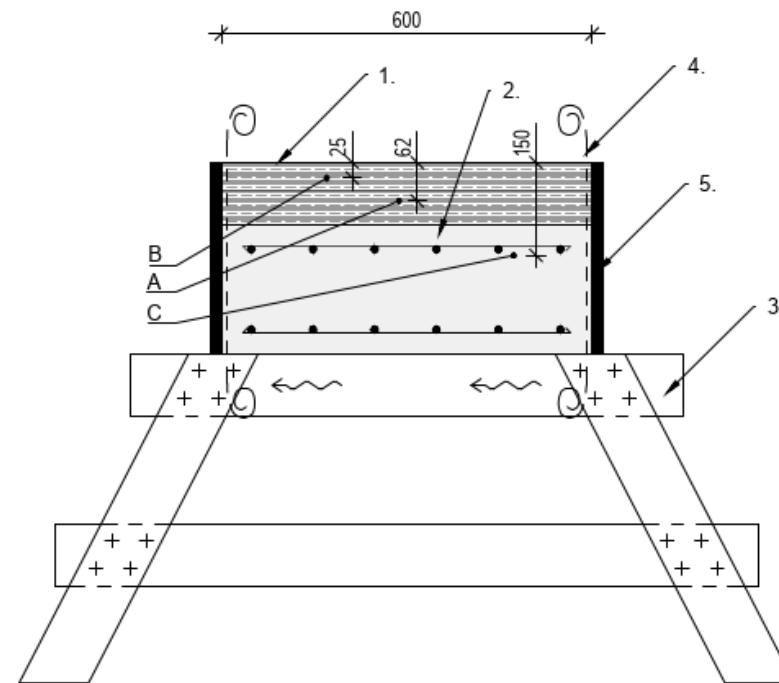
MASSIVILAATTA 260 mm + 50 mm PINTASAVI
KAHTEN SUUNTAAN KUJUVUVA

MITTAKAAVA
1:10

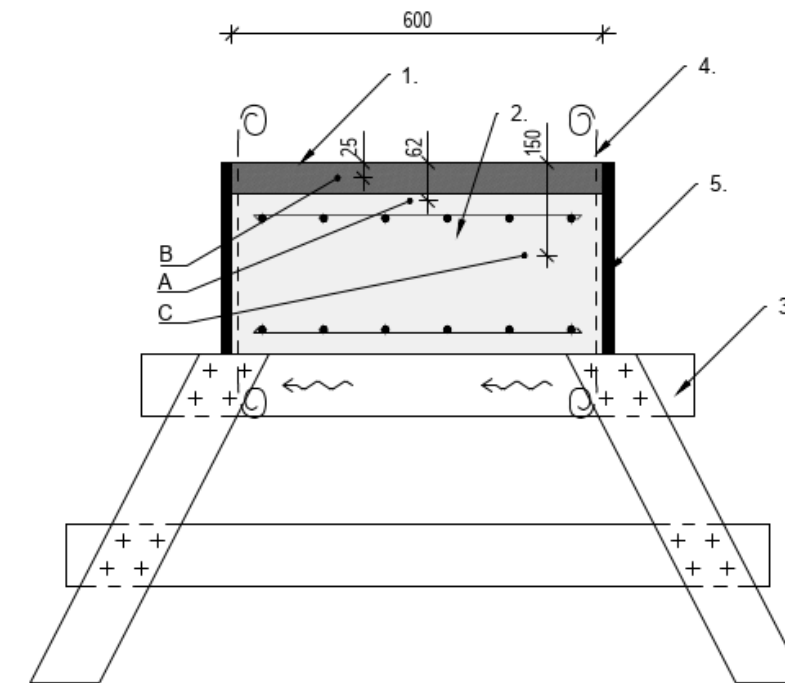
TESTIRAKENNE TR4



TESTIRAKENNE TR5



VERTAILURAKENNE VR4



- | | | |
|----|--------|---|
| 1. | 50 mm | PINTASAVI |
| 2. | 260 mm | MASSIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEN TEKOA |
| 3. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |

- | | | |
|----|--------|---|
| 1. | 100 mm | PINTASAVI |
| 2. | 210 mm | MASSIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEN TEKOA |
| 3. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |

- | | | |
|----|--------|---|
| 1. | 50 mm | LATTIABETONI |
| 2. | 260 mm | MASSIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEN TEKOA |
| 3. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |

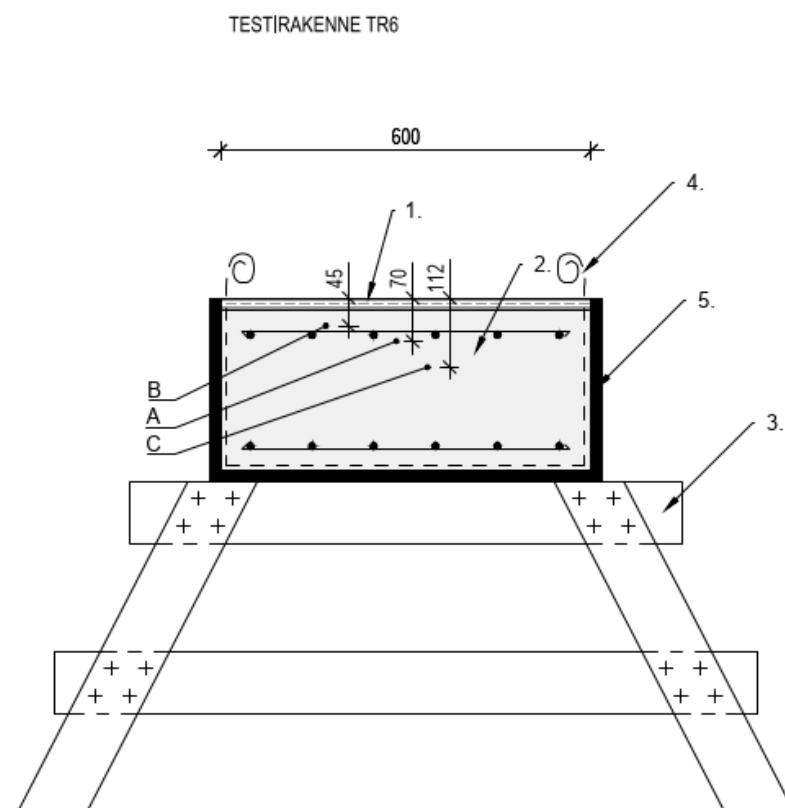
6 (9)

VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

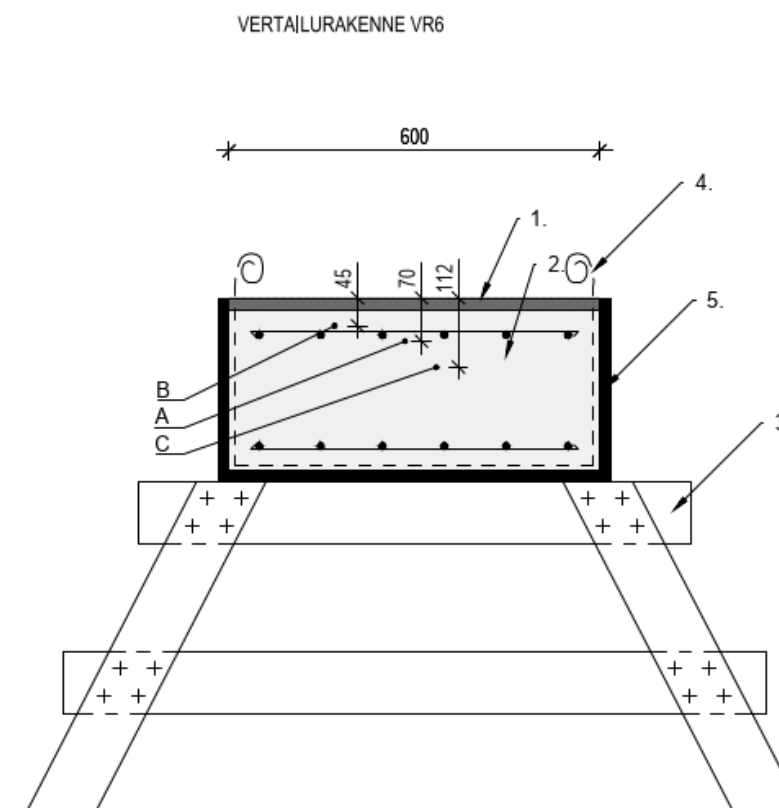
TESTIRAKENNE 6 (TR6)
VERTAILURAKENNE (VR6)

MASSIVILAATTA 260 mm + 20 mm PINTASAVI
YHTEEN SUUNTAAN KUJUVUVA

MITTAKAAVA
1:10



- | | | |
|----|--------|--|
| 1. | 20 mm | PINTASAVI |
| 2. | 260 mm | MASSIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEEN TEKOA |
| 3. | | TUENTAPUKKI TAI TASO |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI JA LAATAN ALLE |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI JA POHJAN ALLE |



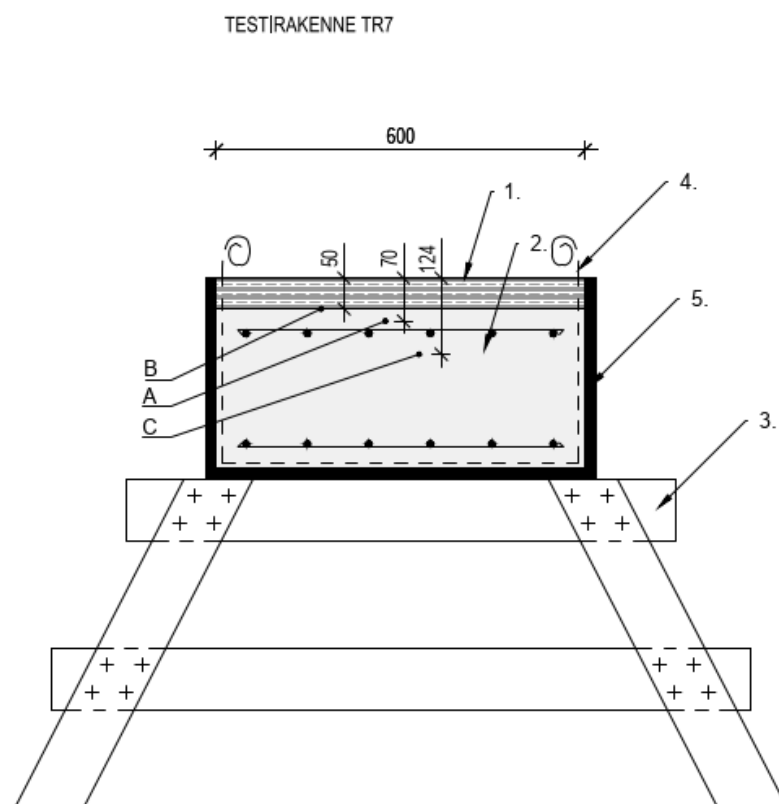
- | | | |
|----|--------|--|
| 1. | 20 mm | KUITUVAHVISTEINEN, SEMENTTIPOHJAINEN TASOITE |
| 2. | 260 mm | MASSIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEEN TEKOA |
| 3. | | TUENTAPUKKI TAI TASO |
| 4. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI JA LAATAN ALLE |
| 5. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI JA POHJAN ALLE |

VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

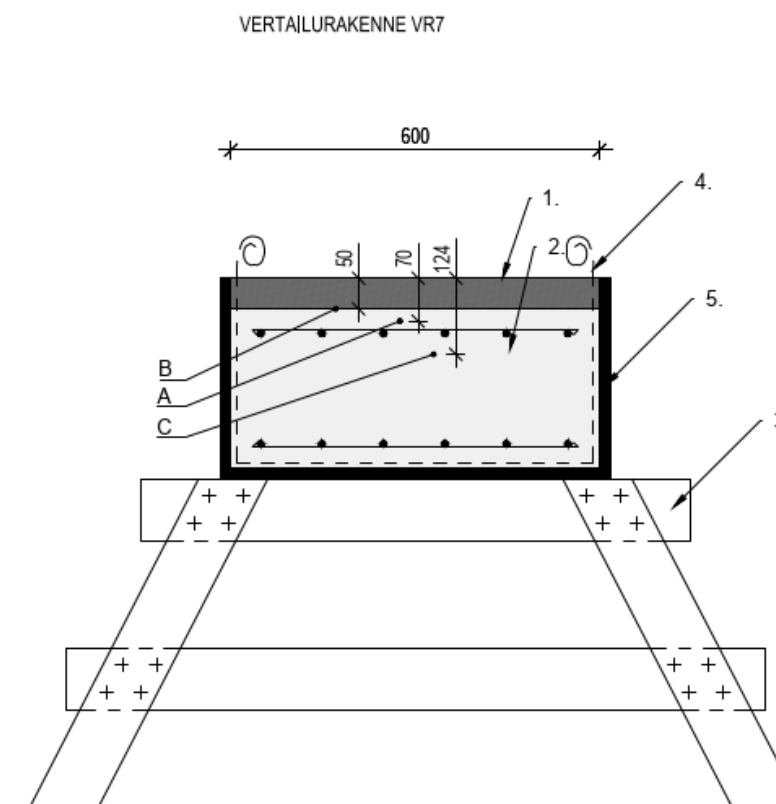
TESTIRAKENNE 7 (TR7)
VERTAILURAKENNE 7 (VR7)

MASSIVILAATTA 260 mm + 50 mm PINTASAVI
YHTEEN SUUNTAAN KUIVUVA

MITTAKAAVA
1:10



1. 50 mm PINTASAVI
2. 260 mm MASSIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEN TEKOA
3. TUENTAPUKKI TAI TASO
4. KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI JA LAATAN ALLE
5. MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI JA POHJAN ALLE

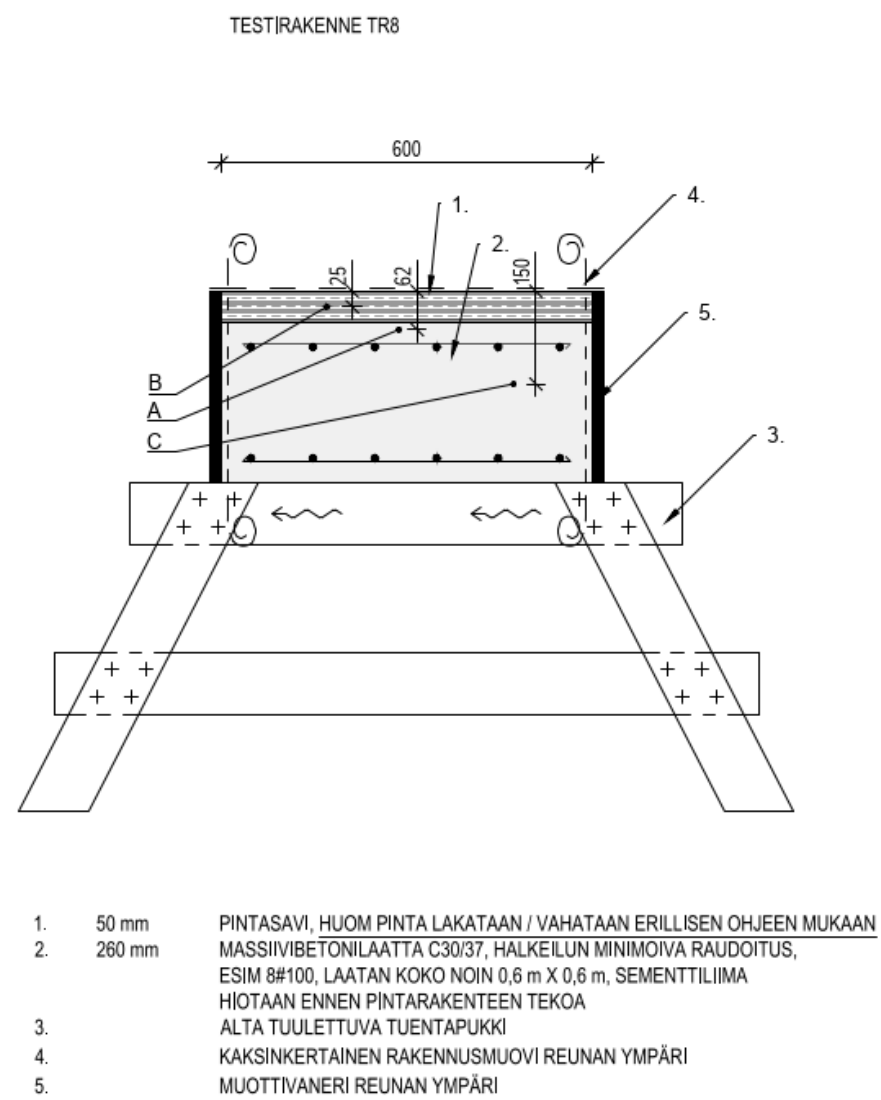


1. 50 mm LATTIABETONI
2. 260 mm MASSIVIBETONILAATTA C30/37, HALKEILUN MINIMOIVA RAUDOITUS, ESIM 8#100, LAATAN KOKO NOIN 0,6 m X 0,6 m, SEMENTTILIIIMA HIOTAAN ENNEN PINTARAKENTEEN TEKOA
3. TUENTAPUKKI TAI TASO
4. KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI JA LAATAN ALLE
5. MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI JA POHJAN ALLE

VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

TESTIRAKENNE 8 (TR8)

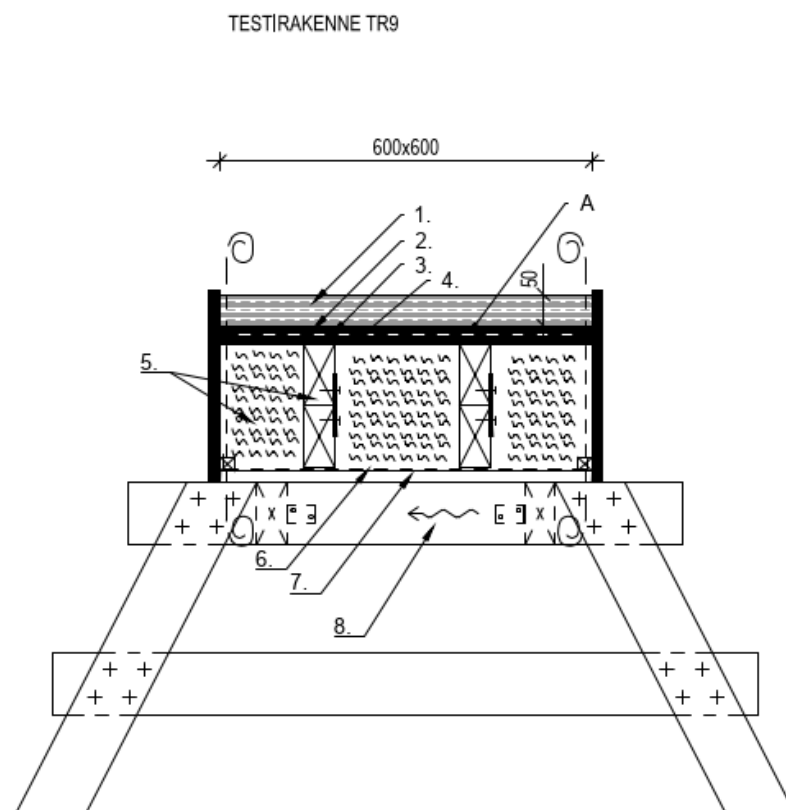
MASSIIVILAATTA 260 mm + 50 mm PINTASAVI + PINTAKÄSITTELY
KAHTEEN SUUNTAAN KUIVUVA



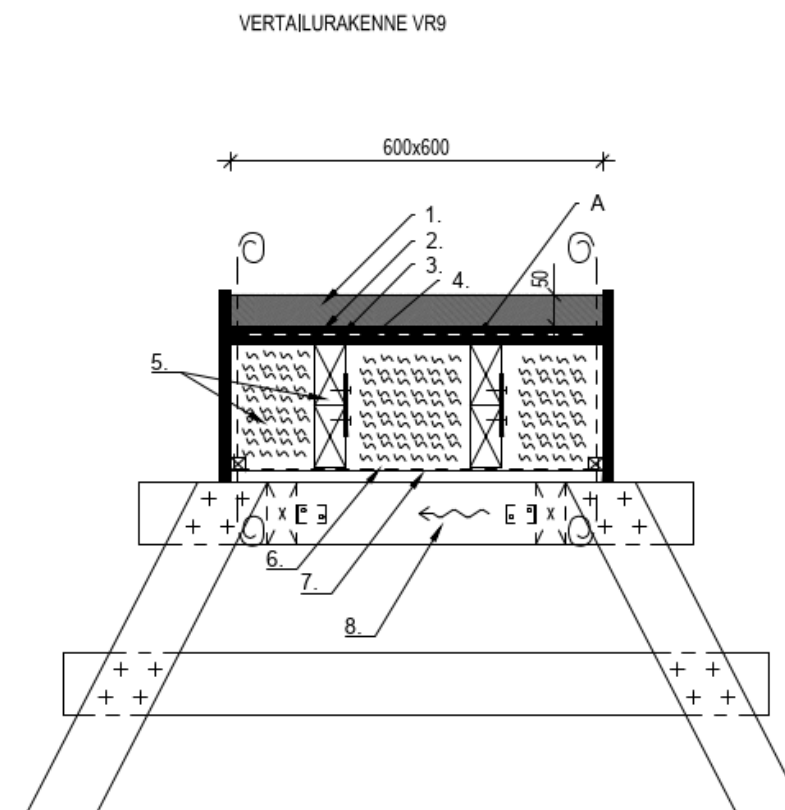
VERSIO B
PÄIVITETTY 3.12.2020

TESTIRAKENNE 9 (TR9)
VERTAILURAKENNE (VR9)

PUURANKALATTIA + 50 mm PINTASAVI
KAHTEEN SUUNTAAN KUIVUVA



- | | | |
|-----|----------|---|
| 1. | 50 mm | PINTASAVI |
| 2. | 12-15 mm | HAVUVANERI, t = 12-15 mm |
| 3. | | YKSINKERTAINEN ILMANSULKUPAPERI |
| 4. | 12-15 mm | HAVUVANERI, t = 12-15 mm |
| 5. | 200 mm | PUUKOOLAUS 2 KPL, ESIM. 2 x 50x100, LIITOS REIKÄLEVYLLÄ
+ SAHANPURUERISE KUIVA TÄYTEEN |
| 6. | | KAKSINKERTAINEN ILMANSULKUPAPERI |
| 7. | 19 mm | HARVALAUDOITUS 19x100 k200 |
| 8. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 9. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |
| 10. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 11. | | ALANURKKIIN RIMAT TAI MUU TIIVISTYS, PAPERIT KÄÄNNETÄÄN RIMAN
TAAKSE (MUOVI JA PAPERI LIMITTY) |



- | | | |
|-----|----------|---|
| 1. | 50 mm | LATTIABETONI |
| 2. | 12-15 mm | HAVUVANERI, t = 12-15 mm |
| 3. | | YKSINKERTAINEN ILMANSULKUPAPERI |
| 4. | 12-15 mm | HAVUVANERI, t = 12-15 mm |
| 5. | 200 mm | PUUKOOLAUS 2 KPL, ESIM. 2 x 50x100, LIITOS REIKÄLEVYLLÄ
+ SAHANPURUERISE KUIVA TÄYTEEN |
| 6. | | KAKSINKERTAINEN ILMANSULKUPAPERI |
| 7. | 19 mm | HARVALAUDOITUS 19x100 k200 |
| 8. | | ALTA TUULETTUVA TUENTAPUKKI |
| 9. | | MUOTTIVANERI REUNAN YMPÄRI |
| 10. | | KAKSINKERTAINEN RAKENNUSMUOVI REUNAN YMPÄRI |
| 11. | | ALANURKKIIN RIMAT TAI MUU TIIVISTYS, PAPERIT KÄÄNNETÄÄN RIMAN
TAAKSE (MUOVI JA PAPERI LIMITTY) |