



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**SILS SEINAS NIISKUSKAHJUSTUSTE TEKKIMINE
EPSI JA VILLA PIIRPINNAL JA SELLE
KATSETAMINE KLIIMAKAMBRIS**

**THE OCCURRENCE OF MOISTURE DAMAGE IN ETICS
FACADE BETWEEN EPS AND MINERAL WOOL SURFACES
AND ITS TESTING IN A CLIMATIC CHAMBER**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Henri Olak

Üliõpilaskood: 182319EAEI

Juhendaja: Martin Talvik, Spetsialist

Kaasjuhendaja: Simo Ilomets, Vanemlektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Henri Olak,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Sils seinas niiskuskahjustuste tekkimine EPSi ja villa piirpinnal ja selle katsetamine kliimakambris, mille juhendaja on Martin Talvik

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Instituudi nimetus

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Henri Olak, 182319 EAEI

Õppekava, peeriala: EAEI Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendaja(d): Spetsialist, Martin Talvik, 59034912

Vanemlektor, Simo Ilomets

Konsultant: Targo Kalamees, Täisprofessor tenuuris

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *SILS seinas niiskuskahjustuste tekkimine EPSi ja villa piirpinnal ja selle katsetamine kliimakambris*

(inglise keeles) *The occurrence of moisture damage in ETICS facade between EPS and mineral wool surfaces and its testing in a climatic chamber*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida kriitiline müüritise niiskussisaldus vältimaks pragusid villa ja EPSi piirpinnal
2. Villariba taguse hüdroisolatsiooni võõba efektiivsuse tõendamise katseliselt
3. Tagame seina mudeldamiseks lähteandmete kogumise

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katseseina ehitus	31.12.20 23
2.	Pikaajalise külma katse	04.03.20 24
3.	Külmatsüklite katse	01.04.20 24

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 22.05.2024

Üliõpilane: Henri Olak
/allkiri/

Juhendaja: Martin Talvik
/allkiri/

Konsultant: Targo Kalamees
/allkiri/

Programmijuht: Irene Lill
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	8
1. TEOREETILINE ALUS	10
1.1 Mis on SILS?	10
1.2 Villavöö vajalikkus SILSis.....	11
1.3 Villariba ja EPS piirpinnal tekkivad niiskuskahjustused	13
1.4 Süsteemitootjate nõuded aluskonstruktsiooni niiskusele ja paigaldustingimustele	16
1.5 Eesmärgid ja hüpoteesid.....	18
2. MEETOD	19
2.1 Müürikivide algniiskuse määramine	19
2.2 Katseseina ehitamine	20
2.3 Müüritise algniiskuse suurendamine ja kontrollmõõtmised	27
2.4 Kliimakambri katse – ekstreemne külm	29
2.5 Kliimakambri katse – külmatsükliid	30
2.6 Niiskustehniline mudeldamine ja materjali omadused	31
3. TULEMUSED	35
3.1 Visuaalsed tulemused	35
3.2 Müüritise niiskuse mõõtmine	37
3.3 Villariba niiskussisalduse mõõtmine pärast ekstreemset külmakatset	40
3.4 Villariba niiskussisalduse mõõtmine pärast külmatsükleid	43
3.5 Temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmine seinas	46
3.6 Katse tulemuste võrdlemine arvutusmudeli tulemustega	48
4. JÄRELDUSED	51
KOKKUVÕTE	54
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	58

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

SILS- soojusisolatsioon liitsüsteem (ingl k. ETICS)

EPS- vahtpolüstüreen

SISSEJUHATUS

SILS (Soojusisolatsiooni liitsüsteem) fassaadid on Eesti uusarendusturul laialt levinud fassaadilahendus. Lisaks uusehitistele on Suureks kasutusala on ka vanade kortermajade renoveerimine, kui on soov hoone lisasoojustada energiatõhususe parandamiseks, ruumide soojusliku mugavuse parandamiseks, külmasildade likvideerimiseks ning fassaadi lagunemisprotsesside peatamiseks. Populaarsuse on SILS süsteem saavutanud tänu kiirele paigaldustehnoloogiale, kergele kaalule (EPSi puhul) ning ka tänu hinnale, mis on madalam kui teistel soojustussüsteemidel. Laialdase kasutuse tõttu on seda aastate jooksul arendatud ja uuritud, kuid see ei tähenda, et SILS fassaadidel ei oleks probleeme.

2017. aastast alates on Päästeamet lubanud kasutada SILS süsteemides tuletokeks horisontaalset tuletokevööd, mis paikneb iga korruse vahel ehk tuletokekeseksioonide katkestuse tasapinnas. Mineraalvillast tuletokevööd peab kasutama SILS fassaadides, mille soojustusmaterjaliks on EPS, kuna EPS on põlevmaterjal. Mineraalvilla ja EPSi oluline erinevus on veeauru läbilaskvus, mistõttu ei saa niiskus ühtlaselt fassaadist välja kuivada. Ebaühtlasest veeauru läbilaskvusest tekivad fassaadi sisse niiskuse kontsentratsioonid kohad, mis omakorda tekitavad niiskuskahjustusi.

Käesolevas töös uuritakse niiskuskahjustusi, mis tekivad villavöö ja EPS soojustuse piirpinnale. Kahjustused avalduvad horisontaalsete pragudena esimese kahe aasta jooksul pärast fassaadi valmimist. Praod tekivad iga korruse vahel, kuhu on paigaldatud villavöö. Samuti uuritakse, kas kahjustusi on võimalik vähendada paigaldades villavöö taha hüdroisolatsiooni. Peamiseks kahjustuste tekke peetakse liigset algniiskust konstruktsioonis, mille peale SILS paigaldatakse, kuid ei ole teada, mis on kriitiline niiskuse kogus kahjustuste tekkimiseks. Konstruktsiooni kõrge algniiskus on tingitud kiirest ehitustempost, mistõttu ei ole niiskusel võimalik ehituse ajal konstruktsioonist välja kuivada.

Probleemi uurimiseks ehitatakse kliimakambrisse katsesein, millel simuleeritakse päris hoonete fassaadidele mõjuvaid tingimusi, kuid erinevalt päriselust on keskkond kontrollitud ja pikaajaliselt stabiilne, mis võimaldab arvutusmudeli kalibreerimist. Kliimakambri katses oli ainus niiskuskoormus müüritise ehitusniiskus – siseruumi niiskuslisa ning kaldvihm seinale ei mõjutanud. Täpsete tulemuste saamiseks on vaja katseseina teostada samade materjalide ja ehitustehnikaga, mida kasutatakse igapäevaselt uute hoonete ehitamiseks. Katseseinaga paralleelselt teostatakse

mudelarvutus, et oleks võimalik uurida, kas arvutuslikult on võimalik saada sarnaseid tulemusi. Arvutusmudeliga on võimalik välistada muude tegurite mõju niiskuskahjustuste tekkele ja samas kinnitada kindel probleemi tekkepõhjus.

VÕTMESÕNAD: SILS, villavöö, niiskuskahjustus, fassaadikrohv, magistritöö

1. TEOREETILINE ALUS

1.1 Mis on SILS?

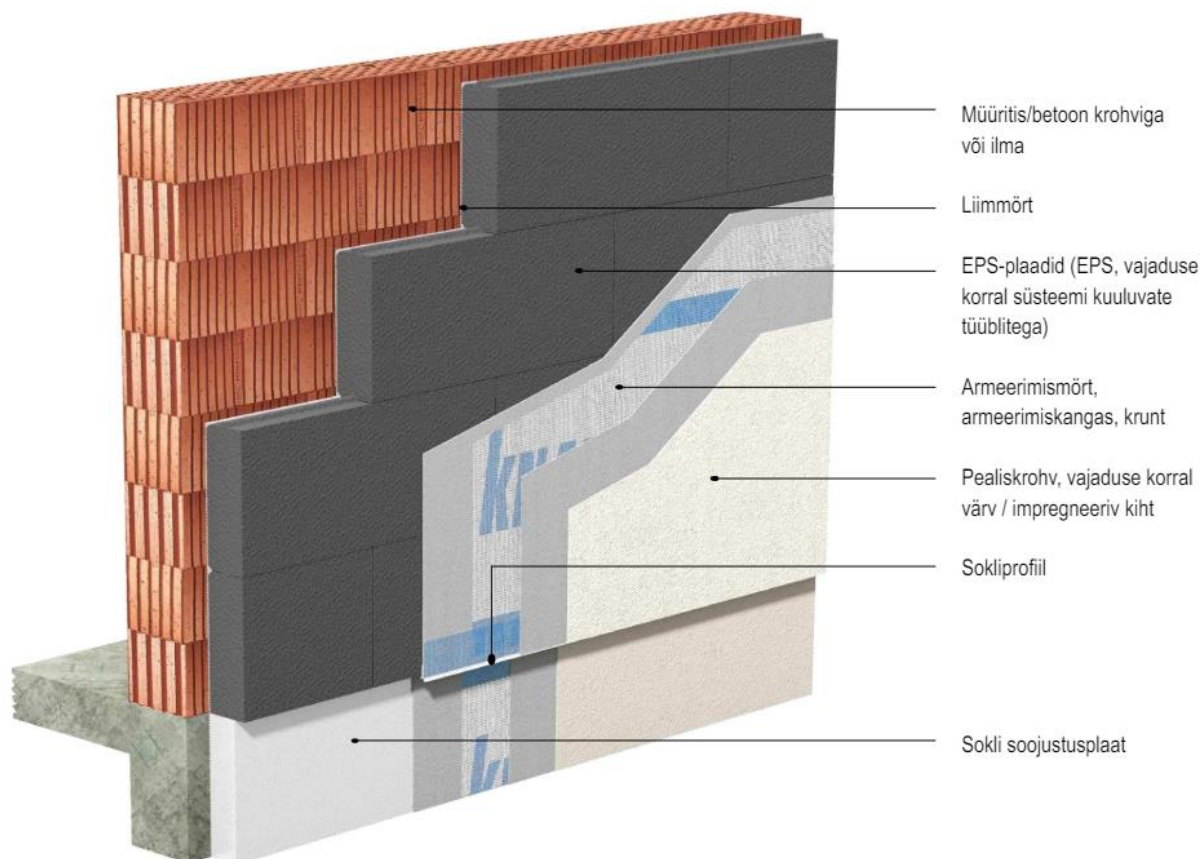
SILS ehk soojusisolatsiooni liitsüsteem (inglise keeles ETICS) on tuulutusega hoone fassaadi soojustussüsteem. SILSi on kasutatud hoonete soojustamiseks 1950. aastatest ning on see kasutusel ülemaailmselt. SILS liigitatakse tuulutusega soojustussüsteemiks, kuna kõik süsteemi kihid paigaldatakse otse eelneva kihi külge tuulutusvaheta. Võrreldes klassikalise tuulutusega soojustatud fassaadiga, on SILS süsteem õhem, materjali kulu väiksem ning kasutatud materjalide hind madalam. SILS süsteemi kasutatakse Eestis kõige rohkem uute raudbetoonist või kiviplakkidest hoonete soojustamiseks ning vanade raudbetoonist ja tellistest korterelamute lisasoojustuseks. Kuna SILS süsteem on nõnda levinud, siis on süsteemi väga palju arendatud ja uuritud, kuid järjest rangemate ehitusnõuetega ja järjest kiireneva ehitustempoga kerkivad esile üha uued probleemid.

SILS süsteem koosneb mitmest erinevast kihist ning selles kasutatavad materjalid võivad varieeruda (1). Esimeseks kihiks on liimisegu, millega soojustusmaterjal paigaldatakse välisseina kandekonstruktsioonile (vt. Joonis 1). Peamiselt kasutatakse mineraalseid liimisegusid, mis on mõeldud vaid soojustusplaatide liimimiseks, kuid on olemas segusid, mis on nii soojustuse liimimiseks kui ka armeerimiskrohvina kasutamiseks.

Soojustuskihis on suurem valik materjale, mida võib kasutada. Kõige populaarsem variant on EPS ehk vahtpolüstüreen ning see on ka kõige kauem kasutusel olnud. Pikaajalist kasutust on leidnud ka mineraalvill, mis on väga hea soojustusmaterjal, kuid on samas kallim ja tihedust arvestades suurema keskkonna jalajäljega kui EPS (2). Võrreldes EPSiga on mineraalvillal suurem veeauru läbilaskvus. Mineraalvilla eeliseks on tuleohutus – kui kogu fassaadi SILS süsteemis on kasutatud mineraalvilla, siis ei ole vaja eraldi rajada tuletõkkevöösid ega tuletõkkekatikud.

Viimastel aastatel on tulnud kasutusse kaks uut materjali, mida saab kasutada SILS süsteemis: fenoolvahtplaadid (PF) ja polüuretaan vahtplaadid (PUR). Mõlemad materjalid on väiksema soojuserijuhtivusega kui EPS või mineraalvill, mistõttu on võimalik teha õhemaid fassaade, saavutades sama soojustakistuse. Kõige suuremaks miinuseks on hind – fenoolvahtplaatide kasutamine on kordades kallim kui EPSi kasutamine, mistõttu ei ole tegu väga levinud lahendusega.

Liimile ja soojustusele järgnev kiht on armeerimiskrohv ning see paigaldatakse otse soojustuse peale. Armeerimiskrohv koosneb armeerimissegust ja klaaskiust võrgust. Võrk paigaldatakse armeeringukihi krohvi keskele või keskmise kolmandiku ülemisse ossa (3). Armeerimiskrohvi eesmärk on kaitsta krohvi alla jäävat soojustuskihti ning luua sile ja ühtlane aluspind, millele oleks võimalik paigaldada viimistluskrohv. Viimane kiht süsteemis on viimistluskrohv, mis kaitseb alumisi kihte sademete ja UV-kiirguse eest. Viimastel aastatel on viimistluskrohvi populaarseks alternatiiviks muutunud lamelltellised, mis kleebitakse õhukeste plaatidena armeerimiskrohvi peale.



Joonis 1 SILS süsteemi ülesehituse näide, Knauf Termo Plus P SILS süsteem(4)

1.2 Villavöö vajalikkus SILSis

Tähtis osa hoonete projekteerimisel on tuleohutus ning eriti oluline on see kortermajade puhul, kuna suurematel hoonetel on ka rangemad tuleohutusnõuded. Kuna SILS fassaade kasutatakse väga palju, on selliste fassaadide jaoks kindlad reeglid ja nõuded määratud nii ET-kaardis ET-2 0404-1010 (3) kui ka Päästeameti tuleohutusnõuetes (5). Mineraalvillast soojustusega ja mittepõleva katematerjaliga SILS süsteemi liigitatakse mittepõlevaks SILSiks, mis ei vaja eristuvaid tulekaitseabinõusid. EPS on põlev materjal,

seega on vaja rakendada eraldi tuletõkke lahendusi, et tule levik mööda välisseina oleks takistatud.

Päästeameti nõuete kohaselt võib kasutada põlevat soojustusmaterjali, kui tule levik on takistatud soojustusmaterjaliga ja ning maksimaalne paigalduskõrgus 22m (5). Nende nõuete kohaselt on EPS soojustusega SILS fassaadides on vaja kasutada tuletõkkevöösid või tuletõkke katikuid, mis on täpsemalt välja toodud ET-kaardis ET-2 0404-1010. Tule levikut liigitatakse kolmeks: väljast leviv tuli, soklist leviv tuli ja ruumist leviv tuli. Iga olukorra kohta kehtivad erinevad kaitsemeetmed, mis tagavad tuleohutuse hoones. Soklist leviva tule takistamiseks kuni 300mm paksuse EPSi puhul peab olema paigutatud neli tuletõkkevööd, millest esimene maksimaalselt 900mm kõrgusele maapinnast ning järgnevad vööd korrustevahelises piirkonnas, maksimaalselt 3m vahekaugusega (vt. Joonis 2). Ruumist leviva tule takistamise nõudeid peab järgima alates neljandast korrusest, sest alumised korrused on kaitstud soklist leviva tule jaoks sätestatud meetmetega. Kuni 300mm paksuse EPSi korral paigutatakse tuletõkkevöö 4.-8. korruse iga vahelae tasapinda ning selle lahendusega muid tuletõkkelahendusi kasutada vaja ei ole. Tuletõkkevöö alumine serv võib olla avast maksimaalselt 500mm kaugusel. (3)



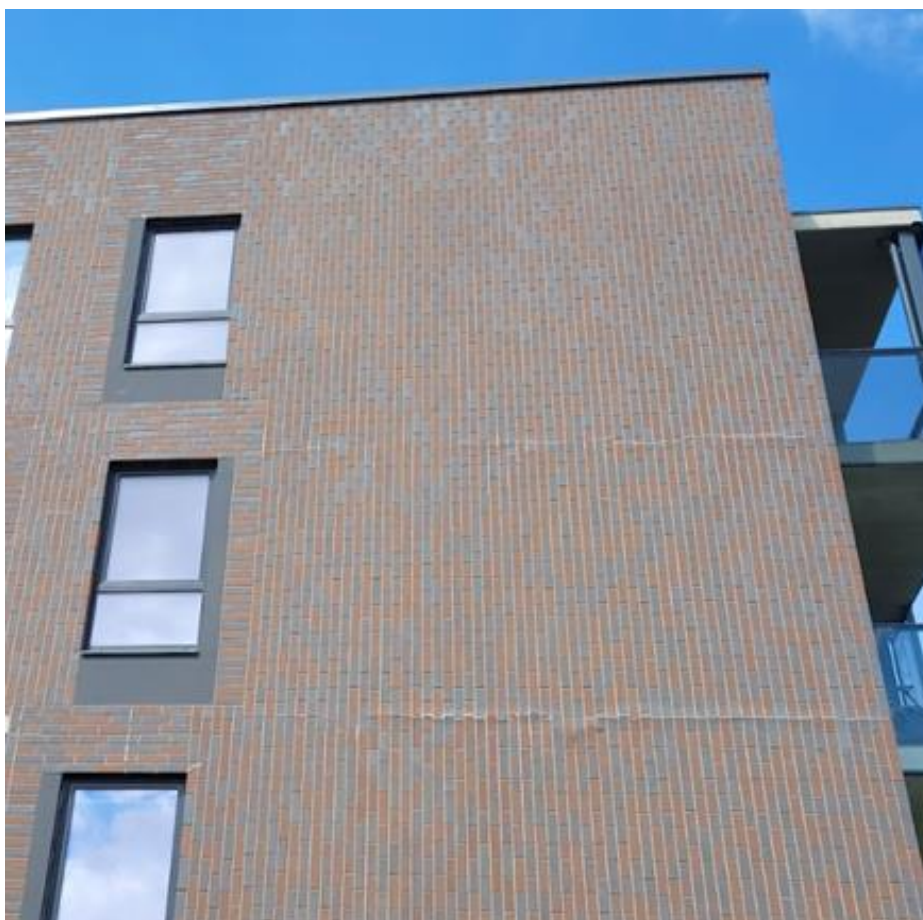
Joonis 2 Soojustuse paksus ≤ 300 mm, krohvitud kattekihtidega EPS tuletõkkevööd (3)

Tuletõkkevööna kasutatav materjal peab olema kujukindel mittepõlev (A1 või A2-s1,d0) lamellvill, mille tihedus on minimaalselt 60 kg/m^3 ja sulamistemperatuur üle 1000°C . Vöö kleepimiseks peab kasutama 100% mineraalset liimsegu ning peab jälgima, et sein ja tuletõkkevöö vahel ei oleks vahesid ega lõhesid. Koos liimseguga tuleb kasutada ka

tüübleid, et tagada villavöö püsivus fassaadis. Võib kasutada alternatiivseid materjale, kuid neil peab olema sertifikaat kasutamiseks EPS soojustusega SILS süsteemis.(3)

1.3 Villariba ja EPS piirpinnal tekkivad niiskuskahjustused

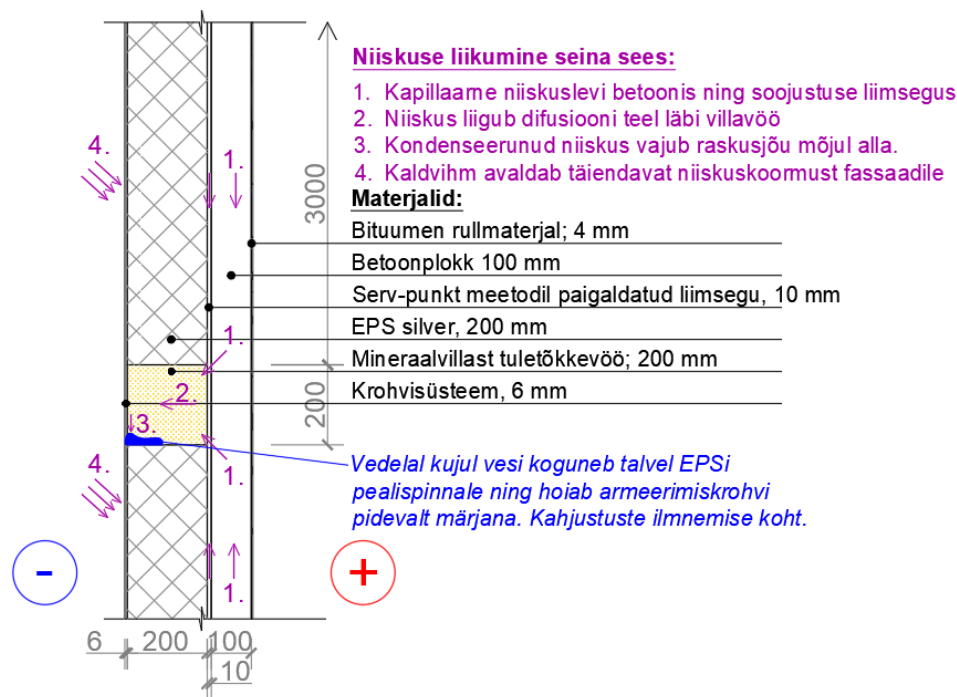
Fassaadides, milles kasutatakse mitmeid erinevaid materjale sama eesmärgi täitmiseks, tekib tihti probleeme materjalide omaduste erinevusega. Selline olukord tekib ka EPS soojustusega SILS fassaadides, kuna iga korruse tasapinnas peab olema mineraalvillast tuletõkkevöö. Praod tekivad mineraalvilla ja EPSi piirpinnal ning need paistavad hoone fassaadil horisontaalsuunalised(vt. Joonis 3). Niiskuskahjustuse tekkimisel mängib kõige suuremat rolli kahe soojustusmaterjali veeaurutakistuse erinevus- mineraalvilla veeauru takistus on umbes 20...40 korda väiksem kui EPSil. Ebaühtlane niiskuse liikumine läbi fassaadi tekitab niiskuse kontsentratsiooni kohti, mis tekitab väiksema veeaurutakistusega materjali (minerallvill) piirpinnal veeaurutihedamata materjalidega (krohv, EPS). Niiskuse kogunemine soojustusmaterjali ei pruugi alati põhjustada materjali enda lagunemist, vaid hakkab hoopis mõjutama soojustuse peal olevaid kihte.



Joonis 3 Horisontaalpraod fassaadil villariba alumise serva piirkonnas(6)

Niiskuskahjustuse tekkimiseks peab olema fassaadis niiskus, mis pärineb peamiselt kandekonstruktsioonist, millele fassaad on paigaldatud. Varem teostatud uuringud on näidanud, et betoonkonstruktsioonide algniiskus kuivab ikka veel välja isegi 3 aastat peale ehitamist (6). Samas uuringus teostati mudelarvutus seina algniiskuse leidmiseks, mille tulemusel eeldati, et seina niiskussisaldus oli 4,5% massiprotsenti (6). Mudeldatud andmed ei ole alati täpsed, kuid puuduvad ka päris katsed niiskussisalduse mõõtmiseks. Samuti mõjutab algniiskuse kogust seina materjal, betoon õõnesplokk ja täitebetoon on erinevate omadustega materjalid, seetõttu ei saa ilma mõõtmiseta seina niiskussisaldust kergesti määrata.

Niiskuskahjustuste tekkemehhanism on küll välja uuritud, kuid ei ole teada, millised algingimusi on kahjustuste tekkimiseks vaja (vt. Joonis 4). Seinas olev niiskus liigub läbi betooni ja soojustuse liimsegu peamiselt kapillaarse niiskuslevi teel. Kuna EPS on suurema veeaurutakistusega, siis EPSi taha tekkiv niiskus liigub villariba suunas. Niiskus difundeerub läbi mineraalvilla ja koguneb krohvikihhi taha, kus see hakkab kondenseeruma. Gravitatsiooni mõjul koguneb villaribas olev vesi villariba alumisse ossa EPS soojustuse peale. Vesi jääb krohvikihhi taga talvel ja paisub ning peale mitut külmumistsüklit tekitab mikropragusid armeerimiskihhis. Algselt mikropraod nähtavad ei ole, kuid nende kaudu saab kaldvihm pääseda fassaadi sisse ning seeläbi suureneb vee kogus fassaadis. Suurema vee kogusega tekivad suuremad jää paisumisest tingitud deformatsioonid, mis omakorda tekitavad suuremaid pragusid fassaadis. Lõpptulemusena hakkab kogu villariba ja EPS piirpinnal fassaad lagunema.(6)



Joonis 4. Niiskuskahjustuste tekkimise mehhanism kliimakambri ehitatud katseseinas, kus kandekonstruktsiooni paksus on vähendatud ning siseruumi poole toimuv niiskuslevi on katkestatud bituumen rullmaterjaliga.

Varasemad uuringud on näidanud, et temperatuuri- ja niiskusdeformatsioonidest tingitud praod peaksid teoreetiliselt tekkima sõltuvalt krohvisüsteemist 7-12m pikkustel lõikudel (7). Samuti on leitud, et deformatsioonid on erinevad sõltuvalt kas krohvisüsteem on paigaldatud EPSi või mineraalvilla peale(8). Kuna uuritud niiskuskahjustuse juhtum asub EPSi ja mineraalvilla piirpinnal, siis tekivad krohvi kihti pinged ka alusmaterjali erinevast deformeerumisest. On uuritud, et homogeensete soojustusplaatide vahel tekivad pingekontsentratsioonid, mis põhjustavad pragunemist (9). Erinevate soojustusmaterjalide vaheliste vuukide deformatsioone ei ole varasemalt uuritud.

Lisaks müüritise kõrgele algniiskusele võivad neid kahjustusi võimendada veel ka ehitustehnoloogia rikkumised. Varasemalt on uuritud, et SILS fassaadidel esineb mitmeid erinevaid kahjustusi ning üks enamlevinud põhjuseid on töö teostamise kehv kvaliteet (10).

1.4 Süsteemitootjate nõuded aluskonstruktsiooni niiskusele ja paigaldustingimustele

SILS süsteemi ehitades on ülimalt oluline jälgida kasutatava SILS süsteemi tootja juhendit. Tähelepanu vajab, et kihid oleks korrektselt paigaldatud ja kõiki tooteid õigesti kasutatud. Iga tootja on määranud tingimused ja loonud juhendid, kuidas nende tooteid kasutada võib ning erinevate tootjate juhendid võivad suuresti erineda.

SILS süsteemis tekivad reeglina probleemid vales seina algniiskusest tööde teostamise ajal. Liigne ehitusniiskus võib tekitada seina krohvikihis pragusid. Et taoliste probleemide esinemisest hoiduda, tuleb SILS süsteemi paigaldamisel juhinduda hoolikalt tootja juhistest ning järgida kehtivaid ET-kaarte.

Sakreti SILS süsteemi juhend sarnaneb Ceresiti juhendiga – kõik vajalikud tingimused nii aluspinnale kui ka keskkonnale on välja toodud, kuid piirmäärad on erinevad. Sakreti SILS süsteemi paigaldamisel on lubatud maksimaalseks seina niiskussisalduseks 5% massi järgi ning seejuures on rõhutatud, et seina pind peab olema kuiv ning tumedad laigud, mis märjal pinnal esinevad, peavad olema ära kuivatatud. Ära on ka märgitud, et aluspind peab olema puhas ja sile, kõik lahtised tükid eemaldatud ning aluspinna temperatuur peab olema vähemalt +5°C. Juhendis on määratud välistingimused, mille ajal võib süsteemi paigaldamist teostada: suhteline õhuniiskus peab olema vahemikus 60%-85%, õhutemperatuur +5°C kuni +30°C, tööpind peab olema varjatud otsese päikese eest, paigaldamise ajal sadada ei tohi ning tuule kiirus ei tohi ületada 10m/s. Lisaks on märgitud, et enne SILS süsteemi kasutust tuleb teha niiskuskooormuse arvutus ET-2 0404-1010 järgi.(11)

Caparoli juhendid SILS süsteemile ning SILS süsteemis kasutatavatele eraldiseisvatele toodetele üksikasjalikke tingimusi välja ei too. Juhendites on kirjas, et aluspind peab olema tugev, kuiv ja puhas, kuid kindlaid väärtusi niiskussisalduse kohta ei ole. Välja on toodud, et hoone niiskustase ei tohi süsteemi paigaldamise järel suureneda. Süsteemi paigaldamise ajal peab õhutemperatuur olema +5°C kuni +30°C vahel, paigaldustöid ei tohi teha otsese päikese kiirguse käes ning tugeva tuule, udu või kõrge õhuniiskuse korral. Kindlad väärtused on juhendites välja toodud vaid temperatuuride osas.(12,13)

Weberi SILS süsteemi juhendis ei ole määratud välistingimusi ega seina niiskussisaldust, kuna juhend keskendub paigaldamise tehnoloogiale. Seetõttu tuleb järgida süsteemi kuuluvate toodete juhendeid eraldi. Süsteemi kuuluvate toodete juhendite põhjal peab

olema seinapind puhas ja tugev ning õhutemperatuur $+5^{\circ}\text{C}$ kuni $+30^{\circ}\text{C}$. Muid tingimusi juhendites välja toodud ei ole (14,15).

Knaufi SILS paigaldusjuhendis on kirjas, et seinapind peab olema kuiv, kindel ja puhas ning töödeldud pinda tuleb kaitsta vihma ja otsese päikesevalguse eest. Juurde on lisatud, et niiskussisalduse suurenemine aluspinnas ei ole lubatud, seega kõik sisemised krohvitööd ja monoliitpõrandate valamine peavad olema SILS süsteemi ehitamise alguseks lõpetatud. Lisaks nendele tingimustele on määratud, et konstruktsioonelemendid peavad olema nii kuivad, et küllastunud niiskussisalduse tekkimine ei ole enam võimalik. Juhendis on esitatud ka kontrolltabel, mille järgi on võimalik kontrollida aluspinna seisukorda enne SILS süsteemi paigaldamist. Nagu teiste tootjate puhul, tohib töid teostada kui õhutemperatuur on vahemikus $+5^{\circ}\text{C}$ kuni $+30^{\circ}\text{C}$ (4).

Ceresiti juhendis on kirjutatud, et märjad tööd peavad olema hoone sees lõpetatud enne kui hakatakse paigaldama soojustust. Samuti on märgitud, et seinaniiskussisaldus peab olema alla 6% massi järgi. Kõigist uuritud juhenditest on Ceresitil kõige kõrgem lubatud seinaniiskussisaldus. Juhendis olid täpselt kirjeldatud välistingimused, mis peavad tööde teostamise ajal olema: SILS süsteemi paigaldamise ajal ei tohi sadada vihma, suhteline õhuniiskus peab olema alla 80%, õhutemperatuur $+5^{\circ}\text{C}$ kuni $+25^{\circ}\text{C}$ ning tööpinnad varjatud otsese päikesevalguse eest (16).

ET-2 0404-1010 on peamine Eestis kasutatav SILSi projekteerimise ja paigaldamise juhend. Osade tootjate paigaldusjuhendid põhinevad selle ET-kaardi põhjal, seega on sama informatsioon kirjas mitmes kohas. ET-kaardis on välja toodud täpsed viisid, kuidas kontrollida aluspinna sobivust SILS süsteemi paigaldamiseks, kuid kõiki väärtusi välja toodud ei ole. Väärtused on määratud aluspinna tasapinnalisusele ja nakketugevusele, kuid aluspinna niiskusele kindlat väärtust ei ole. Aluspinna niiskuse määramiseks tuleb kontrollida, et konstruktsioon ei oleks tugevalt niiskunud ning soovitatav on enne SILSi paigaldamist lasta sel ära kuivada. Välja on toodud, et eriti oluline on nende nõuete järgimine sügisel ja talvel. Tööpind peab olema kuiv ja selle määramiseks on välja toodud juhised, kuidas niiskust vähendada. Õhutemperatuuri piire ei ole ET-kaardis ette määratud, kuna neid määravad tootjad oma toodetele ise. Välistingimuse osas on ka välja toodud, et vihm ei tohi pinnale peale sadada ja tööpind peab olema varjatud otsese päikesevalguse eest.(3)

1.5 Eesmärgid ja hüpoteesid

Magistritöö eesmärgid on järgmised:

- Villavöödega SILS süsteemis niiskuskahjustuste tekkimise mehhanismi täpsem uurimine ja mudeldamine
- Tagada katseandmed mudeli kalibreerimiseks pikaajaliselt stabiilsete kliimatingimuste korral
- Hinnata hüdroisolatsiooni mõju villariba niiskussisaldusele

Enne töö teostamist püstitati järgmised hüpoteesid:

- Külma väliskliima korral tekib villavöösse ehitusniiskusest põhjustatud kondensaat
- Pikaajaliselt stabiilsed kliimatingimused võimaldavad saada kvaliteetsed lähteandmed mudeli kalibreerimiseks
- Villaribatagune hüdroisolatsioon vähendab villavöö niiskussisaldust vähemalt 50%
- Armeerimiskrohvis tekivad külmakahjustused külmatsüklite mõjul kõrge algniiskusega seinas

2. MEETOD

Uuringu jaoks ehitati katsesein kliimakambrisse. Seinä niiskustehnilise toimivuse uurimiseks viidi läbi katsed ekstreemsetel tingimustel. Seinä sees mõõdeti ehitusmaterjalide temperatuure ja pooriõhu suhtelisi niiskuseid mõõteanduritega mittepurustaval meetodil ning lisaks mõõdeti villariba ja müüritise niiskussisaldust purustataval meetodil.

2.1 Müürikivide algniiskuse määramine

Niiskuskahjustuste tekkimiseks on vajalik algniiskus kandekonstruktsioonis. Selleks oli vaja määrata müürikivide niiskussisaldus, millega katsesein ehitada. Esmase plaani kohaselt plaaniti teha sein kolme erineva niiskussisaldusega müürikividest, kuid katsekambri mõõtude tõttu ei oleks olnud võimalik seda teostada. Seega otsustati ehitada sein kahe erineva niiskussisaldusega müürikividest.

Üks pool seinast oli planeeritud ehitada müürikividest, mis olid seisnud välistingimustes tehase pakendis. Selle eesmärk oli simuleerida olukorda, kus kivid seisavad ehitusplatsil enne seinä ehitust ning pannakse otse kasutusse kui neid vaja on. Temperatuuri erinevuste vältimiseks toodi kivid enne seinä ehitust katsehalli sisse, et need saaksid üles soojeneda. Niiskussisalduse säilitamiseks pakiti kõik müürikivid kile sisse ning suleti aurukindla teibiga (vt. Joonis 5). Pakendist võeti müürikivid välja täpselt enne katseseina ladumist, et vähendada välja kuivamist.



Joonis 5. Killesse pakitud välistingimustes seisnud müürikivid

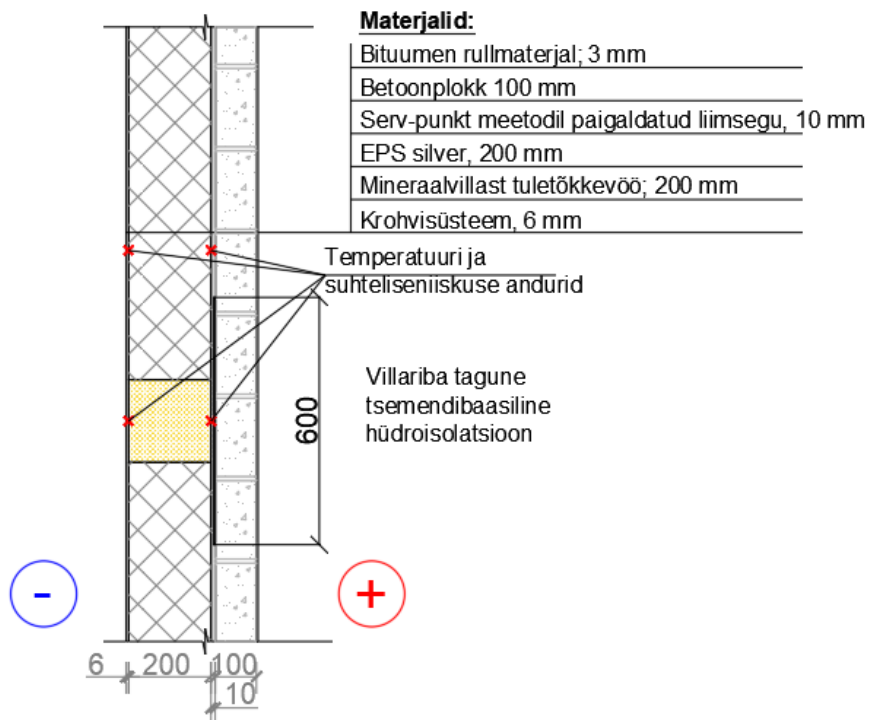
Teise seina osa jaoks oli planeeritud kasutada müürikive, mis olid varasemalt seisnud vees. Sellisel juhul oleks tegu olnud ekstreemse olukorraga, milles kasutatud müürikivid on kõige suurema võimaliku niiskussisaldusega (arvestamata hüdraulilist rõhku, kui kivid immutataks sügaval vee all) (vt. Joonis 6). Ekstreemse olukorra katsetamisega oli soov näha veel suuremaid kahjustuste tekkeid võrreldes päris hoonetel tekkinud kahjustusega. Müürikivid seisisid vee sees nädal aega, et kõik kivid täielikult veest läbi imbuks.



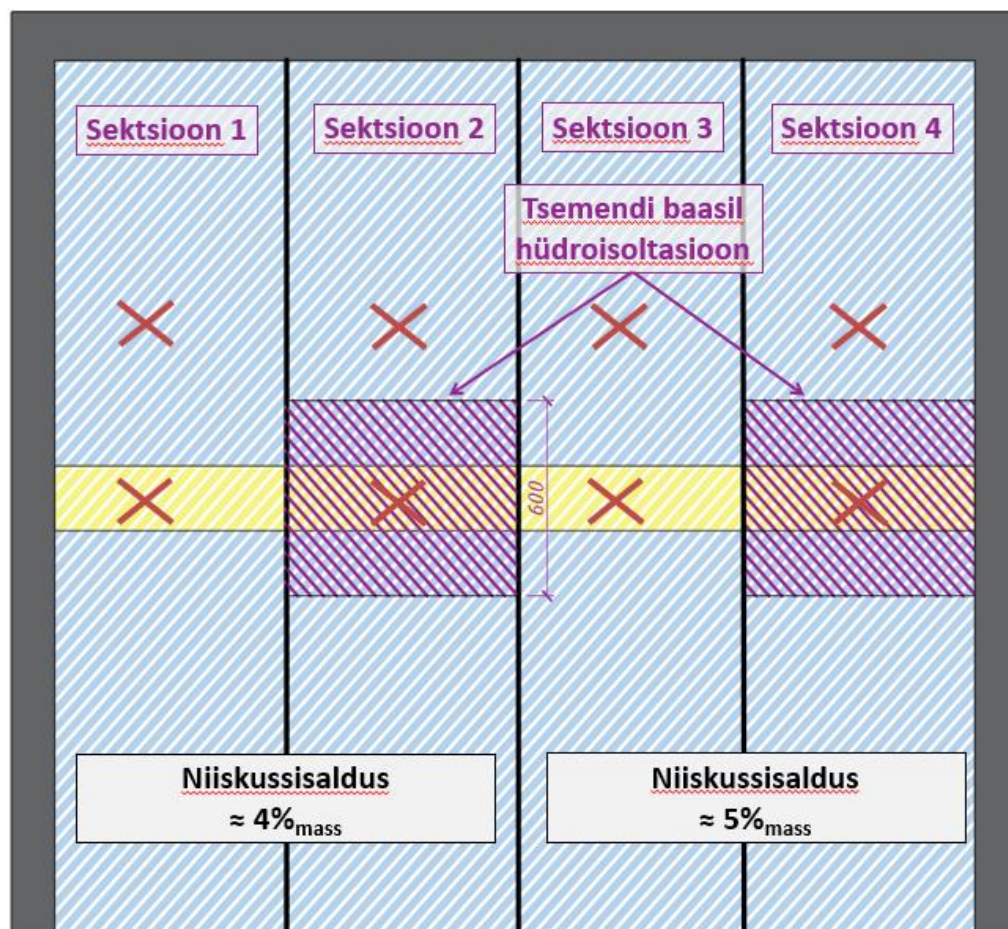
Joonis 6 Müürikivid veevannis

2.2 Katseseina ehitamine

Katsesein ehitati kliimakambrisse 2023. aasta sügisel. Katsesein on laotud 100mm paksustest betoonplokkidest ning on laotud täisvuukidega. Seina kliimakambrisine pool on kaetud SILS süsteemiga ja sisetingimuste pool SBS rullmaterjaliga (vt. Joonis 7). Katsesein on jagatud neljaks sektsioonist, mis on omavahel eraldatud SBS rullmaterjaliga ja deformatsiooniprofiilidega (vt. Joonis 8). Otsus kasutada 100mm paksust betoonplokki tugines algsetel simulatsioonidel, mis näitasid, et 200mm betoonplokkist välisseina puhul kuivab niiskus välja peaaegu võrdselt sise- ja väliskeskonna poole. Samuti aitab õhema ploki kasutamine varieeruvust vähendada – niiskus saab välja kuivada vaid välistingimustesse, kuna sisetingimustes olev külg on kaetud SBS rullmaterjaliga, et takistada niiskuse välja kuivamist.



Joonis 7 Katseseina ristlõige



Joonis 8 Katseseina plaan

Ehitust alustati vana katseseina välja lõhkumisega ning seejärel juba uue katseseina müüri ladumisega. Esimese müürirea alla paigaldati kareteip, et tagada nake kliimakambri ja katseseina vahel. Kuna katseseina eesmärk oli simuleerida nelja erinevat olukorda, oli katsesein vaja neljaks erinevaks sektsiooniks jaotada. Müüritise sisse paigaldati SBS rullmaterjal, mis eraldas sektsioonide vahel betoonplokkid täielikult. SBS materjal ulatus ka soojustuse- ja krohvikihi sisse, et niiskusel ei oleks võimalik liikuda ühest sektsioonist teise. Müüri laoti kolm rida päevas, et tagada müüri püsivus enne mördi kivinemist. Kivinemise ajaks kaeti laotud müüri osa kilega, et vähendada betoonplokkide välja kuivamist (vt. Joonis 9).



Joonis 9. Kilega kaetud müüritis välja kuivamise vähendamiseks

Peale katseseina müüritise ladumist tihendati müüritise ja kliimakambri vahelised vuugid EPS Silver tükkide ja polüuretaanvahuga, mis kaeti omakorda SBS materjaliga, et tagada katseseina õhu- ja niiskuskindel ühendus kliimakambriga. Järgmisena kaeti katseseina katsehalli jääv külj bituumenkrundiga, et tagada SBS rullmaterjali nakkuvus betoonplokkiga. Krunt paigaldati vastavalt tootja juhendile ning lasti sel nõuetekohaselt sisse imenduda enne SBS rullmaterjali paigaldamist. SBS paigaldati ühes kihis 10cm ülekattega (vt. Joonis 10). Peale SBS materjali paigaldamist ei olnud niiskusel enam

võimalik sisetingimuste poole välja kuivada, seega saab niiskus liikuda ainult kliimakambri suunas. SBS kattematerjali ja kliimakambri vaheline liitekoht tihendati õhu- ja aurutõkketeibiga.



Joonis 10. SBS rullmaterjal katsehalli (ehk sisekeskkonna) poolsel pinnal

Järgmisena alustati katseseina kliimakambri (ehk väliseskkonna) poolse külje viimistlemisega. Esmalt puhastati katsesein tolmust ja liigest mördist, et seejärel oleks võimalik paigaldada hüdroisolatsioon ja soojustuskiht. Hüdroisolatsioonina kasutati võõbatavat tsemendiga segatavat orgaanilist pahtlimassi, mis paigaldati katseseina kahele sektsioonile 600mm laiuselt villariba taha (vt. Joonis 11). Paigaldus teostati vastavalt tootja juhendile, mis määras kulunormiks 1kg/m^2 , seega tekkis villariba tagusele alale 1mm paksune hüdroisolatsiooni kiht (17).



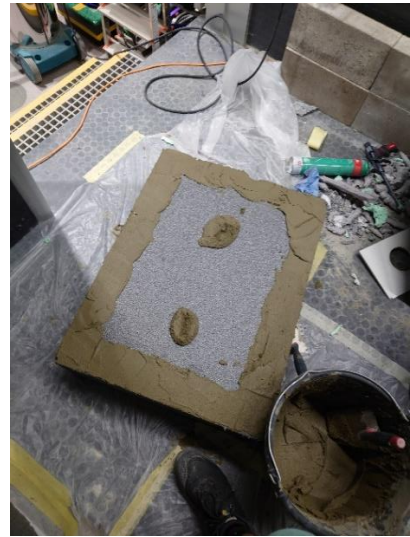
Joonis 11. Hüdroisolatsiooni ribad villavööde taga peale paigaldust

Peale hüdroisolatsioonvööba kuivamist sai paigutada temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurid soojustuse taha kivimüritisele. Anduritena kasutati Sensirion SHT35 andureid ning andmete logimiseks Arduino Mega baasil ehitatud loggerit. Andurid paigaldati nii villariba kui ka EPS soojustuse taha, et oleks võimalik võrrelda temperatuuri ja suhtelise niiskuse muutust mineraalvilla ja EPSi vahel (vt. Joonis 12). Andurid kinnitati müritise külge liimiga.



Joonis 12. Andurite paigutus soojustuse taga

Järgmisena paigaldati katseseinale 200mm paksune soojustuse kiht, milleks kasutati EPS Silver 60 ja mineraalvilla. Mineraalvillast villavöö paigaldati kõrguslikult katseseina keskele, et villavööst üles ja alla jääks võrdne kogus EPS soojustust. EPS soojustuse paanid paigaldati serv-punkt meetodiga (3), kasutades tsemendibaasil liimsegu (vt. Joonis 13). Samuti paigaldati iga sektsiooni vahele SBS rullmaterjal, et niiskusel ei oleks võimalik liikuda ühest sektsioonist teise läbi soojustuse. Enne paigaldamist krunditi villariba sama seguga, kuid segu vedeldati veega, et see paremini suudaks villa sisse imbuda. Müüritise külge liimimiseks kasutati tavapärase konsistentsiga liimsegu. Soojustuse kinnitamiseks kasutati vastavaid plastiktüübleid nii EPSi kui ka villariba jaoks.



Joonis 13. Soojustuse paigaldamine (vasakul) ning serv-punkt meetodiga soojustuse paigaldus (paremal)

Peale soojustuskihi paigaldamist seati üles täiendavad temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurid soojustuskihi pinnale, mis hiljem jäid krohvikihi taha. Andurid süvistati soojustuskihi sisse, et hiljem oleks võimalik korrektselt seina krohvida (vt. Joonis 14).

Eesmärgiga saavutada võimalikult päriselule sarnanev krohvitööde kvaliteet, krohvisid fassaadi professionaalsed töölised. Esmalt paigaldati soojustuse peale tsemendibaasil armeerimiskrohv ning armeerimisvõrk, sektsioonide eraldamiseks kasutati deformatsioonivuugi profile. Selle peale paigaldati kolm päeva hiljem viimistlusrohv.



Joonis 14. Vaade katseseinale

2.3 Müüritise algniiskuse suurendamine ja kontrollmõõtmised

Esialgne plaan oli katsetada müüritisi algniiskustega, mis vastaksid ehituspoest ostetud niiskussisaldusele ning vees seisnud, kapillaarselt küllastunud betooni niiskussisaldusele, milleks kujunesid algniiskused 4% ja 8% (vt. Tabel 2, Tabel 3). Kuid ehitusprotsess toimus kuivas siseruumis talvisel perioodil, siis ei õnnestunud kivide väljakuivamist müüritises piisavalt efektiivselt takistada. Enne soojustuse paigaldamist mõõdeti kontrollkivide massiprotsendilist niiskussisaldust. Kontrollkivides lõigati 9cmx9cmx9cm kuubikud ning asetati kuivatusahju kuivama. Kaalumise tulemusel selgus, et mõlemad müüritise osad olid välja kuivanud 4% massiprotsendilise niiskussisalduseni (vt. Tabel 4, Tabel 5). Seina välja kuivamise tõttu oli vaja muuta algniiskusi, milleks valiti 4% ja 5%. Algniiskused 4% ja 5% vastavad ka varasemalt tehtud uuringule (6), kus kolm aastat hiljem mõõdetud betooni niiskuste põhjal tehtud arvutusmodelid ennustasid müüritise algniiskuseks ca 4,5%.

Kuna niiskussisaldus oli mõlemas müüritise osas ühtlustunud, tekkis vajadus ühe müüritise niiskussisaldust tõsta vee injekeerimisega. Selleks, et massiprotsendi järgi niiskussisaldust ühe protsendi võrra tõsta, pidi injekeerima igasse kivisse 340g vett.. Enne müüritise injekeerimist teostati katsed üksikute müürikividega, et olla kindel injekeerimise efektiivsuses (vt. Joonis 15).



Joonis 15 Vee injekeerimise katse üksiku müürikiviga

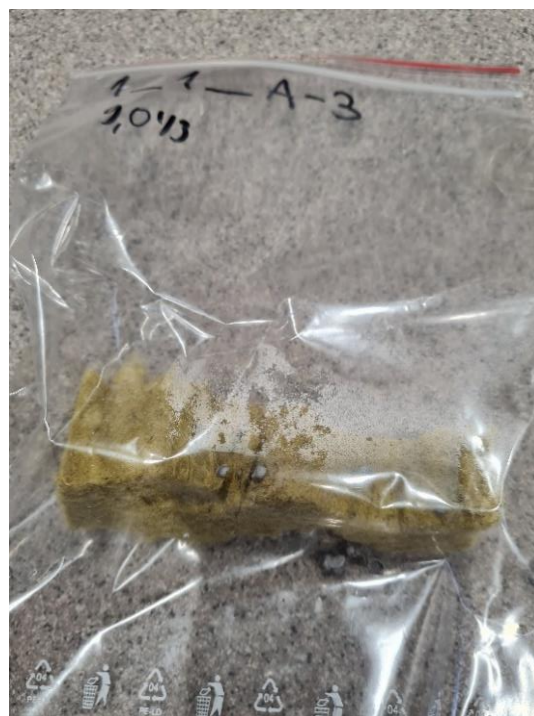
Vee injekeerimiseks puuriti iga müürikivi sisse kaks puurauku 50-kraadise nurga all sügavusega 6cm. Seejärel sisestati puuraukudesse tühjad silikoonipadrunid, veekindluse tagamiseks kaeti puuraugu ümbrused veekindla bituumenhermeetikuga. Peale injekeerimise katsetamist puuriti katseseina augud millesse sisestati tühjad silikoonipadrunid. Kõik augud kaeti veekindla hübriidhermeetikuga ning anti aega sellel ära kivineda enne silikoonipadrunitite täitmist veega. Igasse silikoonipadrunitisse valati 170g vett, mis seejärel imendus müüritise sisse (vt. Joonis 16). Kui kogu vesi oli seina imbunud, täideti silikoonipadrunit uuesti. Kahe seinasektsiooni peale injekeeriti kokku 6120g vett. Kolm päeva peale vee injekeerimist teostati järgmine niiskussisalduse kontrollmõõtmine puuraugu meetodil vastavalt RT 103333 kaardile (18). Kuna tegemist on ühele poole kuivava tarindiga, siis puuriti proovikehad mõõtmissügavuselt $A=0,4*100\text{mm}=40\text{mm}$ (18). Esmalt eemaldati üleliigne silinder ning seejärel võeti piikvasaraga mõõtmissügavuselt proovitükid (vt. Joonis 16). Tükid pandi koheselt aurutihedasse teadaoleva massiga plastiktopsi ning kaaluti märjana. Seejärel kuivatati katsekeha ahjus ning kaaluti kuivama. Peale proovitüki võtmist täideti puuraugud ja suleti uuesti bituumenmaterjaliga aurutihedalt (vt. Tabel 6, Tabel 7).



Joonis 16 Vee injekeerimine katseseina (vasakul). Niiskussisalduse kontrollimine peale vee injekeerimist (paremal).

2.4 Kliimakambri katse – ekstremne külm

Esimeseks katseks oli ekstremse külma katse. Külmakatse viidi läbi kolmes etapis, jäljendades sügis-talvisel perioodil temperatuuri langust. Võrreldes reaalsusega oli temperatuurilangus kliimakambris stabiilsem, et lihtsustada hiljem mudeldamist. Esimeses etapis seati välistingimusteks kliimakambris temperatuur $t=5^{\circ}\text{C}$, selliseid tingimusi hoiti kaks nädalat. Teises etapis oli temperatuur $t=-10^{\circ}\text{C}$, ning katse kestus kaks nädalat. Kolmandas etapis oli temperatuur $t=-25^{\circ}\text{C}$, õhuniiskuse ning katse kestus kaks nädalat (vt. Joonis 21). Niiskussisalduse mõõtmine teostati kolmanda etapi viimasel päeval. Esmalt lõigati ketaslõikuriga villariba pealt ära krohv (vt. Joonis 17). Krohvitüki pealt eemaldati külge jäänud villatükid ning seejärel asetati katsekeha minigrip kotti.



Joonis 17 Krohvitüki eemaldamine katseseinast (vasakul). Katsekeha minigrip kotis (paremal).

Et määrata niiskuse kontsentratsiooni asukohta villariba sees, viilutati vill seitsmeks kihiks sügavuti ning kaheks kihiks vertikaalselt. Kõik katsekehad asetati minigrip kotti ning pandi kõrvale. Kottides katsekehad jäeti kliimakambrisse, et kaalumise ajal ei oleks muutust välistingimustes. Kuna seina avamise ajal oli kliimakambri temperatuur -25°C , oli vill külm ning kui hoida katsekehi mõnda aega katsehalli keskkonnas, tekiks minigrip kotti välispinnale kondensaad (vt. Joonis 17). Seetõttu toimus kaalumine vahetult pärast

katsekeha kliimakambrist välja võtmist. Mõõtmised teostati sel viisil kõigile katseseina sektsioonidele.



Joonis 18 Tühimik peale katsekeha eemaldamist (vasakul). Tühimike täitmine kilega kaetud villatükiga (paremal)

Peale katsekehade eemaldamist katseseinast jäid seinä õõnsused (vt. Joonis 18). Need täideti hüdroisolatsiooniga kaetud villatükkidega (vt. Joonis 18), mis tagas selle, et seinas niiskussisaldus ei muutuks katsete vahel.

2.5 Kliimakambri katse – külmatsüklid

Teiseks katseks oli külmatsüklite katse. Katse eesmärk oli simuleerida talviseid välistingimusi, kuid katse lühikese kestvuse tõttu kasutati ekstreemseid tingimusi. Katse tsüklid toimusid $t=5^{\circ}\text{C}$, $t=-10^{\circ}\text{C}$ ja $t=-25^{\circ}\text{C}$ vahel, ning iga tsükli puhul, hoiti vastavat temperatuuri ja niiskust 24 tundi. Külmatsüklite katset alustati kohe peale ekstreemse külma katset ning selle katsekehade ära lõikamist ja kaalumist. Kuna katsekehade lõikamise ajal kliimakamber soojenes -5°C , siis esimese tsüklifaasina jahtus kliimakamber maha -25°C peale. -25°C püsis temperatuur 24 tundi, peale seda tõusis temperatuur 5°C peale ning sellega algas ametlikult külmatsüklite katse. Katse jooksul toimus kokku 7 tsüklit ehk kogu katse kestus oli 3 nädalat. Peale katse lõppu teostati järgmine villariba katsekehade väljalõikamine katseseinast. Katsekehad lõigati katseseina iga sektsiooni villariba keskelt ning villariba tükk viilutati 2 kihis vertikaalselt ja 7 kihis sügavuti, et kõik katsekehad saada. Peale katsekehade väljalõikamist asetati

katsekehad plastiktopsidesse, mis olid varem ära kaalutud ja asetati kõrvale (vt. Joonis 19). Seejärel kaaluti katsekehad ükshaaval kliimakambri väljas, kuna kasutatud kaal oli kalibreeritud $+20^{\circ}\text{C}$ ja $\text{RH}=30\%$ tingimustes.



Joonis 19 Katsekehade lõikamine peale külmatsükleid (vasakul). Müüritise katsekeha puurimine (paremal).

Peale villariba katsekehade välja lõikamist, lõigati katsekeha ka müüritisest. Müüritise katsekeha niiskuse kontroll oli vajalik, sest need tulemused peaksid ka näitama samuti, et kas hüdroisolatsioonist on kasu või mitte. Katsekeha välja lõikamiseks kasutati 50mm diameetriga puuri ning puuriti 4cm sügavusele (vt. Joonis 19). Seejärel piigati katsekeha ühes tükis seinast välja ja asetati eelnevalt kaalutud alusele, et oleks seda võimalik kaaluda. Peale kaalumist paigutati katsekehad kuivatusahju temperatuuril 65°C kuivama. Müüritise katsekehade jaoks kasutati kuivatusahju, sest betoonploki kuivab niiskus raskemini välja kui mineraalvilla seest.

2.6 Niiskustehniline mudeldamine ja materjali omadused

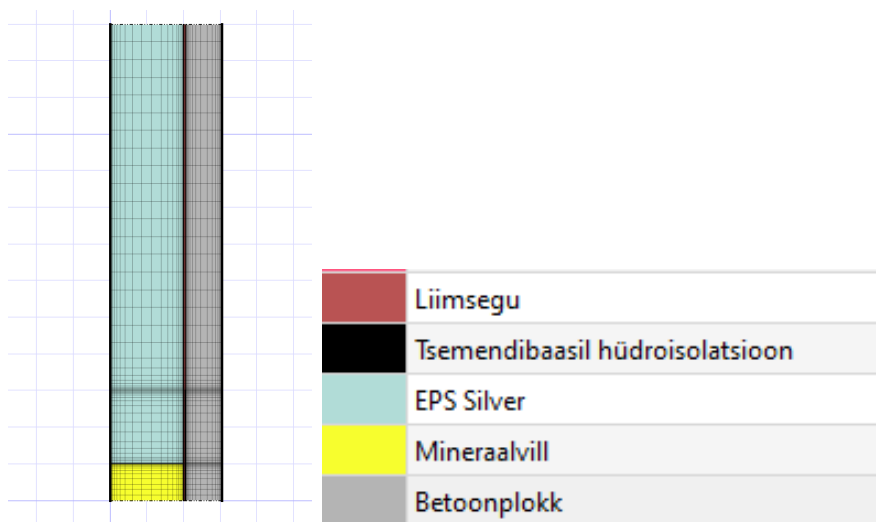
Katseseina niiskustehniliseks modelleerimiseks kasutati programmi Bauklimatik-Dresden Delphin 6.1 (19,20). Delphini tarkvara võimaldab teostada dünaamilisi soojus- ja niiskuslevi arvutusi. Arvutusprogrammi on võimalik kasutada keerukamate niiskustehniliste probleemide lahendamiseks, kus kastepunkti meetodi kohane arvutus usaldusväärseid tulemusi ei anna, nagu seespoolse lisasoojustamisega ning kõrge ehitusniiskusega seotud probleemid.

Delphin 6 võimaldab teostada arvutusi nii testaastatega, kui ka ise sisestavate andmetega, arvestada materjalide algniiskusega jne. Tarkvaraga on võimalik teostada 1D, 2D ning 3D arvutusi, kuid viimasel juhul kasvab märkimisväärselt arvutuste maht ning väheneb kasutusmugavus.

Arvutused põhinevad ruumelementide meetodil (Finite Volume Method), kus iga ühikpinna või ühikruumi jaoks leitakse igal ajahetkel numbrilise iteratsiooni teel kõiki lähtetingimusi rahuldav lahend. Peamised Delphinis kasutatavad võrrandid, mis antud töös kasutatud leidsid on soojusliku ja niiskusliku tasakaalu võrrand.

Mudelis kasutati katseseinaga samasuguse ristlõikega seinu. Mudelid teostati iga sektsiooni kohta, et kõik algtingimuste olukorrad oleksid modelleeritud. Mudeli eesmärgiks oli võrrelda kliimakambri katse tulemusi mudeli tulemusega, et näha kas arvutustulemused tõestavad hüdroisolatsiooni kasulikkust.

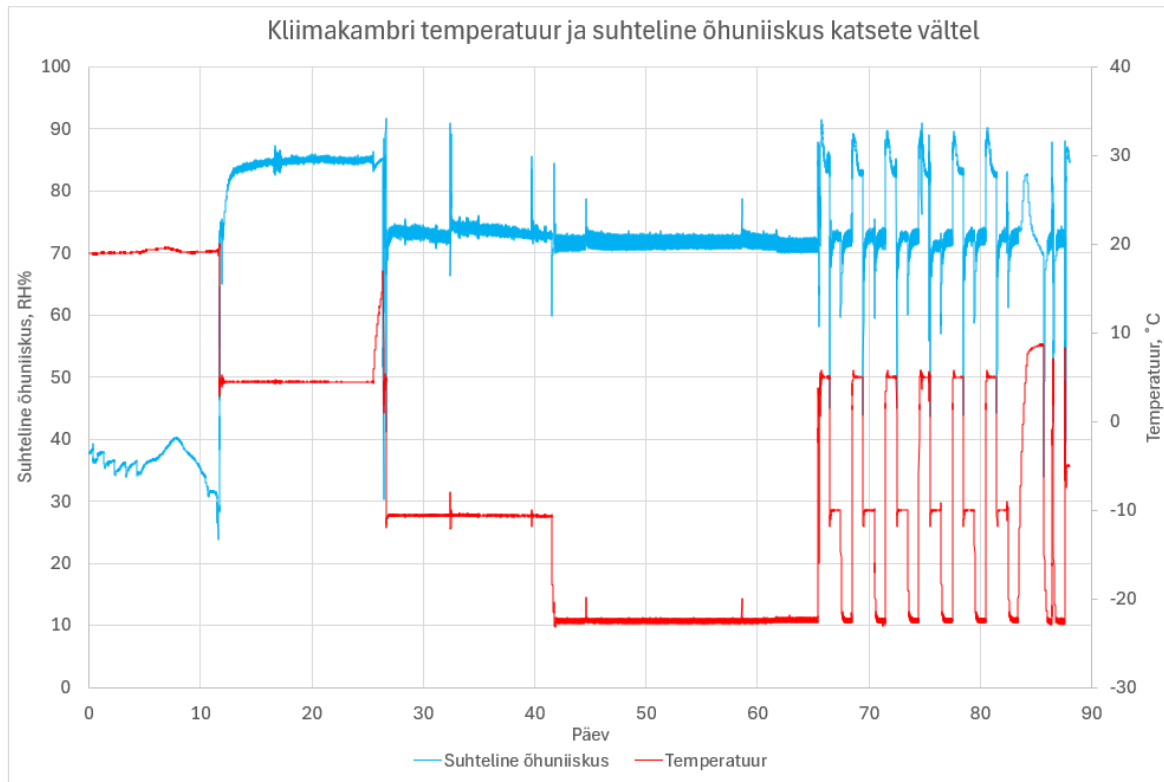
Mudelis kasutatav seinamudel on identne päris katseseinale, kuid arvutuse lihtsustamiseks on kasutatud väiksemat seinu osa. Selleks on võetud sümmeetriatelg villariba keskelt. Seinakihtide paksused on vastavad katseseinale ning kõikide materjalide omadused saadud kasutatud toodete tootelehtedelt. Kuna katseseinas on neli erinevat sektsiooni, siis oli vaja neli läbi arvutada eraldi mudelit, kuna ühes mudelis ei ole võimalik tingimusi muuta. Seega on arvutatud müüritise algniiskusega 4% hüdroisolatsiooniga ja hüdroisolatsioonita, samad arvutused on tehtud ka 5% algniiskusega müüritise kohta.



Joonis 20 Mudeli seinu lõige

Mudeli arvutamise jaoks vajalikud kliimaandmed on saadud kliimakambris salvestatud tingimustest. Selleks et mudel oleks võrreldav päris katsega, peavad kliimatingimused olema samasugused sellega, mida kliimakambris kasutati. Selleks salvestati

kliimaandmed kogu katsetamise vältel, et hiljem oleks neid võimalik mudelis kasutada. Kliimakambri temperatuur ja suhteline õhuniiskus salvestati iga viie minuti tagant, mis tagas piisavalt täpse kliimaandmete hulga, et seda oleks võimalik mudelis kasutada.



Joonis 21 Kliimakambri temperatuur ja suhteline õhuniiskus katsete vältel

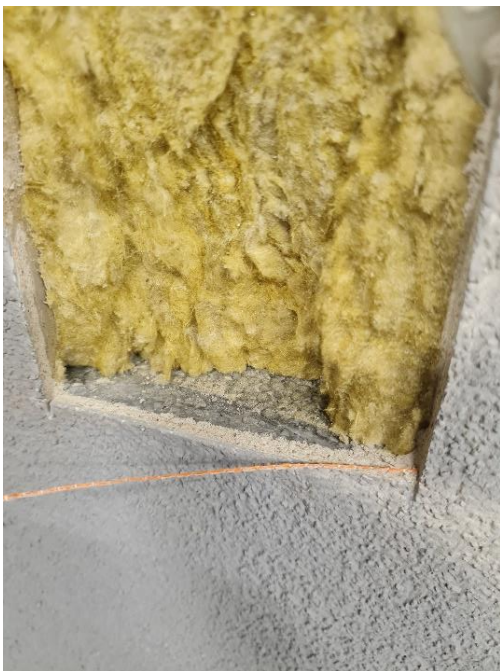
Tabel 1 Mudelarvutuses kasutatud materjalide omadused

	1	2	3	4	5	6
	Betoon- plokk	Liim- segu	EPS Silver	Mineraal- vill	Tsemendi baasiline hüdro- isolatsioon	Krohvi- süsteem
Tihedus (<i>Bulk density</i>) ρ , kg/m ³	2320,2	707	35	67	1200	-
Poorsus (<i>Porosity</i>) θ , m ³ /m ³	0,143	0,733	0,935	0,92	0,0026	-
Erisoojus (<i>Heat capacity</i>) c , J/(kg*K)	850	945	1500	840	2000	-
Soojuseri juhtivus (<i>Thermal conductivity</i>) λ_{dry} , W/(m·K)	2,1	0,21	0,032	0,035	0,145	-
Lühilainekiirguse neelduvustegur (Absorption coefficient) A , -	-	-	-	-	-	-
Veeauru difusioonitakistus (<i>Water vapour diffusion resistance factor</i>) μ , -	110	25	40	1	1800	-
Suhteline difusioonitakistus (<i>Equivalent vapour diffusion thickness</i>) S_d , m	-	-	-	-	-	0,6
Veeläbivus (<i>Water uptake coefficient</i>) A_w , kg/(m ² *s ^{0,5})	0,00833	0,037 6	1*10 ⁻⁵	0	1*10 ⁻¹⁰	-
Kapillaarne veejuhtivus (<i>Liquid water conductivity</i>) k_l , kg/(m·s·Pa)	4,401* 10 ⁻¹¹	3,182 *10 ⁻⁹	0	-	-	.
Algniiskus (<i>Initial moisture content</i>) w_0 , kg/kg	0,05	-	-	-	-	-
Algniiskus (<i>Initial moisture content</i>) w_0 , RH	-	85	85	85	85	-

3. TULEMUSED

3.1 Visuaalsed tulemused

Katsekehade välja lõikamise ajal teostati ka visuaalne kontroll katseseinale. Katsekehi kaalumata oli võimalik selgeks teha, et katse oli üldiselt toimunud nii nagu planeeritud. Esimene katsekehade lõikamine toimus peale ekstreemse külma katset ning omakorda oli tegu esimese korruga kui seinasse oli võimalik peale seinat ehitamist näha. Peale krohvikihiki pealt lõikamist inspekteriti villariba kahjustuste, vedela vee ja jää osas. Igas katseseina seksioonis oli näha villariba alumise kihi värvi muutust. Niiskuskahjustusteta mineraalvill on kollast värvi, aga vee olemasolul hakkab vaik villa sees lagunema ning vill muutub oranžiks (vt Joonis 22). Vedelal kujul vett villariba sees ei olnud, kuna katsekehade lõikamised toimusid temperatuuril $t = -25^{\circ}\text{C}$, aga jääkristalle oli siiski näha.



Joonis 22. Seina avamisel oli näha villavöös värvitooni muutust (vasakul) ning jääkristalle villa poorides.

Jääkristallid olid ainult 5% algniiskusega seksioonidel kuid villariba ulatuses erinevates kohtades. Seksioonis millele oli paigaldatud hüdroisolatsioon villa taha, tekkisid jääkristallid villariba tüüblite alla ja ümber, kuna tüübel tekitas väikse külmasilla (vt. Joonis 23). Seksioonis millel puudus hüdroisolatsioon, tekkisid jääkristallid villariba alumisse ossa EPSi peale. Samuti oli jääkristalle rohkem hüdroisolatsioonita seksioonis. Peale kõikide katsekehade välja lõikamist, oli võimalik kontrollida kogu villariba

ristlõiget. Nii vaadates kui ka katsudes oli võimalik eristada villariba osad, kus oli suurem niiskussisaldus ja kus oli madalam.



Joonis 23. Villavöö alumises, välimises servas oli märgata jääkristalle (vasakul). Iseäranis suur jää kogus oli tüübli piirkonnas (paremal)

Teine katsekehade lõikamine teostati peale külmatsüklite katset ning siis tehti ka järjekordne visuaalne kontroll. Katsekehad lõigati välja temperatuuril $t = -25^{\circ}\text{C}$, et jää ei hakkaks lõikamise ja käsitlemise ajal üles sulama. Peale krohvikihi eemaldamist oli näha, et kõikide sektsioonide villaribad olid suurema niiskussisaldusega kui peale ekstreemse külma katset. Enne katsekehade lõikamist oli eeldatud, et teise katsega kuivab seinast veel suurem kogus niiskust välja, ning see eeldus vastas ka tõele. Kõigis sektsioonides oli näha intensiivsemat värvi muutust ja suuremat jää teket. 5% algniiskusega sektsioonides oli jääkristalle tekkinud kogu villa ja EPSi piirpinna ulatuses. Jääkristallid olid tekkinud ka sügavamale villa sisse, mitte ainult krohvikihi taha. Peale kõigi katsekehade välja lõikamist, oli villariba ristlõikes veel paremini näha niiskuse gradienti. Pragusid villariba ja EPSi piirpinnal silmaga nähtavaid pragusid ei tekkinud. Pragude mittetekkimise põhjuseks võib olla katseseina väiksed mõõtmed võrreldes päris seinaga, sest sektsiooni deformeeruva osa pikkus oli 0,8m. Varasemad uuringud on näidanud, et temperatuuri- ja niiskusdeformatsioonidest tingitud praod peaksid teoreetiliselt tekkima sõltuvalt krohvisüsteemist 7-12m pikkustel lõikudel (7). Seetõttu on krohvikihis võimalik pingete hajumine deformatsiooniprofiilis.

3.2 Müüritise niiskuse mõõtmine

Müüritise niiskussisaldust mõõdeti mitu korda kogu katse vältel. Mõõtmised teostati müürikividele enne müüritise ladumist, peale katseseina valmimist ning peale viimast külmatsükli katset. Niiskussisalduse mõõtmiseks kasutati erinevaid viise, kuna kõigis katse etappides ei olnud võimalik sama mõõtmisviisi kasutada.

Enne müüri ladumist mõõdeti kasutatavate müürikivide niiskussisaldust. Mõõtmiseks kasutati kolme välistingimustes seisnud kivi ja kolme vees seisnud kivi. Igast müürikivist lõigati kaks katsekeha mõõtudega 9cmx9cmx9cm kivi keskelt. Katsekehad lõigati ilma vesijahutusega, et niiskussisaldus katsekehas ei muutuks. Peale lõikamist kaaluti katsekehad ning paigaldati kuivatusahju kuivama temperatuuril $t=103^{\circ}\text{C}$. Katsekehad kuivasid 10 ööpäev enne uuesti kaalumist.

Tabel 2 Vees seisnud kivide niiskussisaldus enne müüritise ladumist

Vees seisnud kivide niiskussisaldus enne müüritise ladumist				
Nr	Märg mass, g	Kuiv mass, g	Vee mass, g	Vee sisaldus, %
M1	1586.1	1438.6	147.5	10.3
M2	1600.6	1457.3	143.3	9.8
M3	1594.1	1483.6	110.5	7.4
M4	1670.7	1557.7	113.0	7.3
M5	1710.0	1602.9	107.1	6.7
M6	1605.6	1499.9	105.7	7.0
Keskmine niiskussisaldus				8.0

Tabel 3 Pakendis seisnud kivide niiskussisaldus enne müüritise ladumist

Pakendis seisnud kivide niiskussisaldus enne müüritise ladumist				
Nr	Märg mass, g	Kuiv mass, g	Vee mass, g	Vee sisaldus, %
K1	1484.4	1405.3	79.1	5.6
K2	1501.9	1422.7	79.1	5.6
K3	1523.4	1451.9	71.6	4.9
K4	1492.3	1420.3	72.0	5.1
K5	1535.9	1449.8	86.2	5.9
K6	1586.9	1502.2	84.7	5.6
Keskmine niiskussisaldus				5.5

Järgmine müüritise niiskuse mõõtmine toimus peale katseseina müüritise valmimist. Selleks kasutati kontrollkive, mis olid seisnud kliimakambris, samades tingimustes katseseinaga. Niiskussisalduse kontrollimise eesmärk oli kindlaks teha kui palju on

müürikivid ehituse ajaga välja kuivanud. Niiskussisalduse mõõtmiseks lõigati 6 9cmx9cmx9cm katsekeha nagu esmasel mõõtmisel. Peale katsekehade kaalumist tõsteti need kuivatusahju kuivama temperatuuril $t=103\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mõõtmistulemused näitasid, et kõik kivid olid kuivanud umbes 4% niiskussisalduseni.

Tabel 4 Vees seisnud kivide niiskussisaldus peale müüritise ladumist

Vees seisnud kivide niiskussisaldus peale müüritise ladumist				
Nr	Märg mass, g	Kuiv mass, g	Vee mass, g	Vee sisaldus, %
Mk1	1585	1521.8	63.2	4.2
Mk2	1576	1515.9	60.1	4.0
Mk3	1486	1422.8	63.2	4.4
Mk4	1434	1374.3	59.7	4.3
Mk5	1461	1403.1	57.9	4.1
Mk6	1468	1413.2	54.8	3.9
Keskmine niiskussisaldus				4.1

Tabel 5 Pakendis seisnud kivide niiskussisaldus peale müüritise ladumist

Pakendis seisnud kivide niiskussisaldus peale müüritise ladumist				
Nr	Märg mass, g	Kuiv mass, g	Vee mass, g	Vee sisaldus, %
Kk1	1512	1452.8	59.2	4.1
Kk2	1511	1451.2	59.8	4.1
Kk3	1522	1464.8	57.3	3.9
Kk4	1526	1470.0	56.0	3.8
Kk5	1434	1380.8	53.2	3.9
Kk6	1435	1380.0	55.0	4.0
Keskmine niiskussisaldus				4.0

Kuna müürikivide mõõtmine peale müüritise ladumist näitas, et kivid oli välja kuivanud 4% peale, siis injekteeeriti kividesse vett (vt. Tabel 4, Tabel 5). Peale seda oli vaja teha järgmine niiskussisalduse mõõtmine, et teha kindlaks kas vee injekteeerimine toimis. Katsekehade lõikamiseks kasutati puuraugu meetodit vastavalt RT 103333 kaardile. Kontrolliti ka veega mitte injekteeeritud seinosa niiskussisaldust veendumaks, et injekteeeritud vesi sinna ei oleks läinud (vt. Tabel 6, Tabel 7)

Tabel 6 Müririkivide niiskussisaldus peale vee injekeerimist

Müririkivide niiskussisaldus peale vee injekeerimist				
Nr	Märg mass, g	Kuiv mass, g	Vee mass, g	Vee sisaldus, %
S3, 0-40mm	162.7	154.6	8.1	5.3
S3, 40mm	24.8	23.6	1.2	5.0
S4, 0-40mm	192.6	183.1	9.6	5.2
S4, 40mm	34.8	33.1	1.7	5.1
Keskmine niiskussisaldus				5.2

Tabel 7 Injekeerimata müririkivide niiskussisaldus

Injekeerimata müririkivide niiskussisaldus				
Nr	Märg mass, g	Kuiv mass, g	Vee mass, g	Vee sisaldus, %
S1, 0-40mm	151.2	145.4	5.9	4.0
S1, 40mm	32.7	31.4	1.3	4.2
S2, 0-40mm	152.5	146.6	5.9	4.0
S2, 40mm	27.0	25.9	1.1	4.2
Keskmine niiskussisaldus				4.1

Viimane müriritise niiskussisalduse mõõtmise toestati peale külmatsükli katset. Mõõtmise eesmärgiks oli teada saada kui palju on müriritis välja kuivanud läbi fassaadi ning hüdroisolatsiooni mõju sellele. Katsekehad puuriti igas sektsioonist villariba tagant puuraugu meetodil vastavalt RT 103333 kaardile (18).

Tabel 8 Müriritise niiskussisaldus villariba taga peale katseid 40mm sügavuselt

Müriritise niiskussisaldus villariba taga peale katseid 40mm sügavuselt				
Nr	Märg mass, g	Kuiv mass, g	Vee mass, g	Vee sisaldus, %
Sektsioon 1	71.747	70.433	1.3	1.9
Sektsioon 2	70.546	68.79	1.8	2.6
Sektsioon 3	83.027	80.202	2.8	3.5
Sektsioon 4	68.609	66.069	2.5	3.8

Viimaste mõõtetulemuste põhjal oli võimalik näha hüdroisolatsiooni mõju villaribataguse müriritise niiskussisaldusele (vt. Tabel 8). Hüdroisolatsiooni kasutamise eesmärk oli vähendada otsest niiskuse liikumist müriritisest villaribasse, mis omakorda tähendab, et niiskus ei pääse müriritisest välja. Võrreldes kolmanda ja neljanda sektsiooni müriritise niiskussisaldust, on kolmanda sektsiooni müriritise vee sisaldus massi järgi 8% väiksem. Enne katseid mõõdetud müriritise niiskussisaldused olid väikse erinevusega (0,2%) ning ainuke erinevus sektsioonidel oli hüdroisolatsiooni kasutus, seega peab olema katsete järgne niiskussisalduse erinevus tulema hüdroisolatsiooni mõjust. Esimest ja teist sektsiooni ei ole võimalik võrrelda, kuna esimesele sektsioonile olid tekkinud

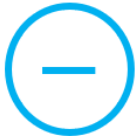

kahjustused, mis võimaldasid niiskusel müüritisest välja kuivada teistest kohtades, mitte ainult läbi fassaadi.

3.3 Villariba niiskussisalduse mõõtmine pärast ekstreemset külmakatset

Kuna antud katse puhul on siseruumi niiskukoormus SBS hüdroisolatsiooni abil isoleeritud ning kaldvihmaga katseseina ei mõjutatud, on ainus niiskukoormus müüritisel olnud algniiskus.

Peale katsekehade välja lõikamist seinast ja kaalumist jäeti katsekehad katsehalli kuivama. Minigrip kotid asetati avatult alusel seisma temperatuuril $t=+21^{\circ}\text{C}$ ja $\text{RH}=30\%$. Katsekehad kuivasid nädal aega, misjärel need kaaluti uuesti, et teada saada kuiv kaal ning arvutada massiline niiskussisalduse suhe. Kõikidel kaalumistel arvutati maha minigrip koti kaal.

Sektsioon 1 (algniiskus 4%, ilma hüdroisolatsioonita) villavöö kihtide massiline niiskussisaldus peale ekstreemse külma katset. Villariba ülemise osa (Ü) ning alumise osa (A) kihtides. Ühik kg/kg

 Välistingimused	Ü1 0.57	Ü2 0.14	Ü3 0.016	Ü4 0.0069	Ü5 0.0061	Ü6 0.0042	Ü7 0.0073	 Sisetingimused
	Ülemise osa kihtide keskmine 0.088 kg/kg							
	A1 0.53	A2 0.049	A3 0.033	A4 0.0051	A5 0.0055	A6 0.0071	A7 0.016	
	Alumise osa kihtide keskmine 0.11 kg/kg							
	Sektsioon 1 kõigi kihtide keskmine 0.091 kg/kg							

Joonis 24 Sektsioon 1 niiskussisaldus peale ekstreemse külma katset

Esimese sektsiooni katsetulemustes ei saa kindel olla, kuna katse ajal tekkisid sektsioonile kahjustused, mistõttu kogu niiskus ei kuivanud välja läbi fassaadi. Esimese sektsiooni suurim niiskussisaldus oli villariba esimeses kihis, kuid ülemises osas oli suurem kui alumises, mis ei olnud eeldatud (vt. Joonis 24). Mõõtetulemused näitavad, et niiskus koguneb krohvikihi taha ning müüritisepoolne osa jääb kuivemaks. Niiskus villariba sees kaugele ei levinud ning püsis esimeses kahes kihis.

Sektsioon 2 (algniiskus 4%, hüdroisolatsiooniga) villavöö kihtide massiline niiskussisaldus peale ekstreemse külma katset. Villariba ülemise osa (Ü) ning alumise osa (A) kihtides. Ühik kg/kg

Välitingimused	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Sisetingimused
	0.26	0.29	0.14	0.0085	0.0034	0.00013	0.00034	
Ülemise osa kihtide keskmine 0.092 kg/kg								
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7		
0.86	0.31	0.11	0.011	0.0084	0.0083	0.0068		
Alumise osa kihtide keskmine 0.13 kg/kg								
Sektsioon 2 kõigi kihtide keskmine 0.099 kg/kg								

Joonis 25 Sektsioon 2 niiskussisaldus peale ekstreemse külma katset

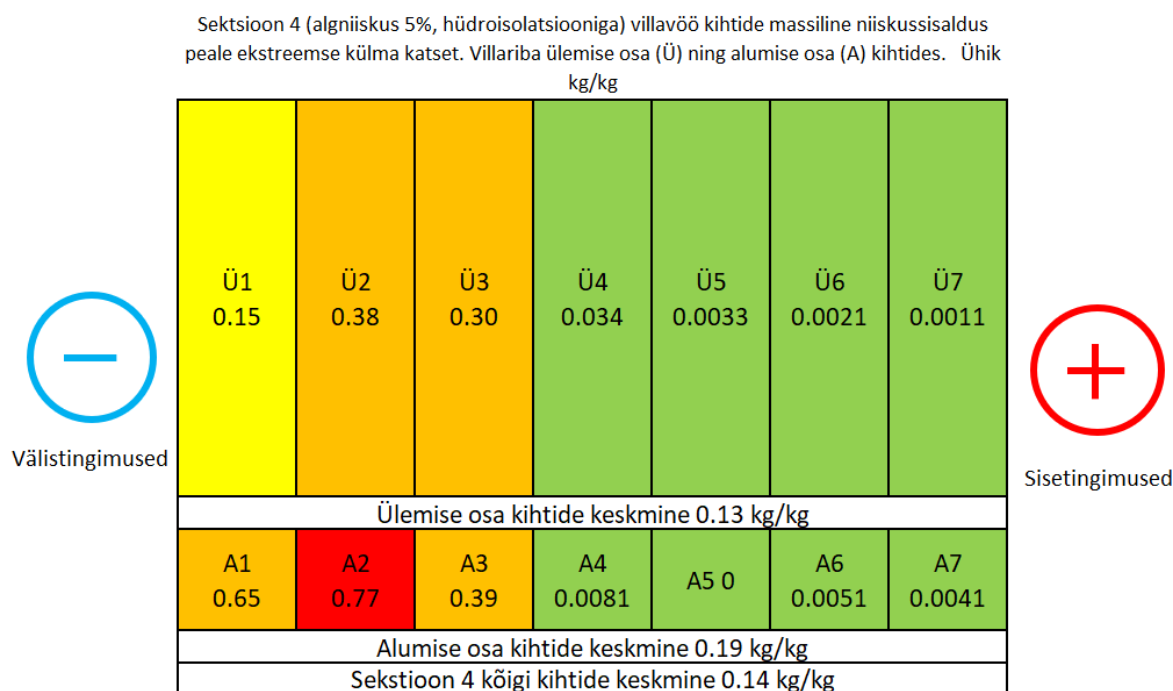
Teises sektsioonis oli niiskussisaldus suurem kui esimeses sektsioonis, aga tulemused ei ole võrreldavad, sest esimese sektsioonis ei kuivanud kogu niiskus välja läbi fassaadi (vt. Joonis 25). Seetõttu ei ole võimalik määrata hüdroisolatsiooni mõju 4% algniiskusega müüritise puhul.

Sektsioon 3 (algniiskus 5%, ilma hüdroisolatsioonita) villavöö kihtide massiline niiskussisaldus peale ekstreemse külma katset. Villariba ülemise osa (Ü) ning alumise osa (A) kihtides. Ühik kg/kg

Välitingimused	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Sisetingimused
	0.29	0.31	0.37	0.42	0.085	0.013	0.0030	
Ülemise osa kihtide keskmine 0.21 kg/kg								
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7		
0.38	0.54	0.51	0.52	0.225	0.0035	0.00020		
Alumise osa kihtide keskmine 0.30 kg/kg								
Sektsioon 3 kõigi kihtide keskmine 0.22 kg/kg								

Joonis 26 Sektsioon 3 niiskussisaldus peale ekstreemse külma katset

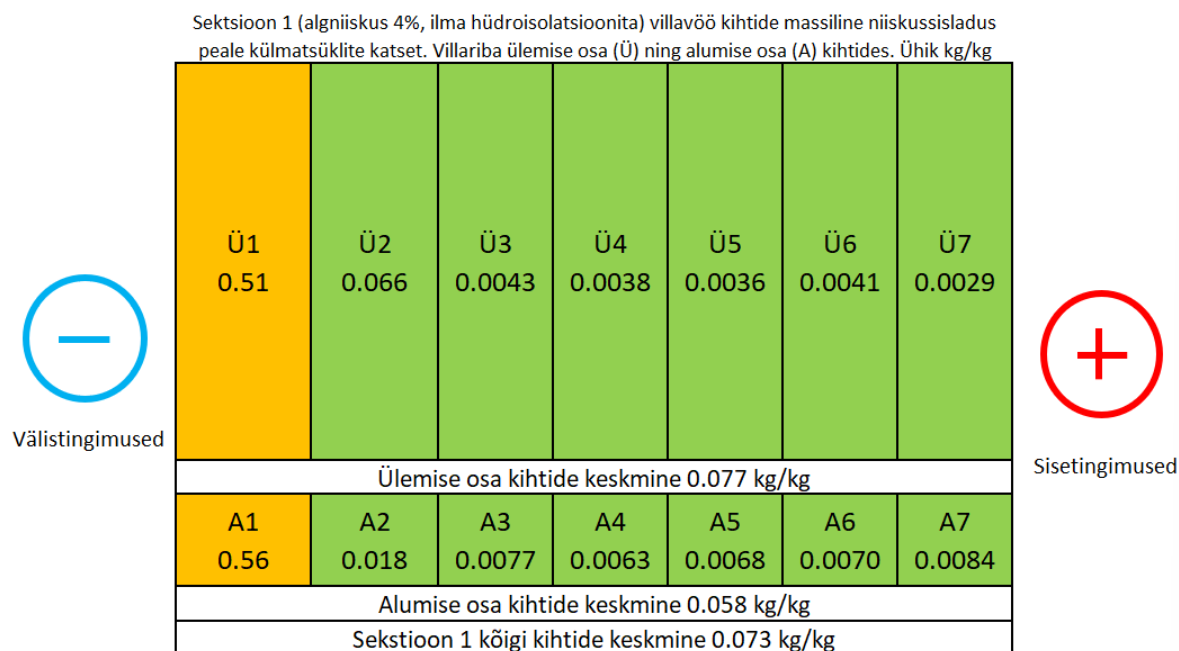
Kolmandas sektsioonis oli tunduvalt suurem niiskussisaldus, mis oli ka eeldatud, kuna tegu oli 5% algniiskusega müüritise sektsiooniga (vt. Joonis 26). Niiskus kogunenud krohvikihhi taha, kuid on üle nelja kihi ühtlustunud. Alumine osa villaribast on märjem, mis näitab et vesi on kogunenud gravitatsiooni mõjul EPSi peale. Keskmiselt on alumine villavöö osa massi kohta 30% suurema niiskussisaldusega kui ülemine osa.



Joonis 27 Sektsioon 4 niiskussisaldus peale ekstreemse külma katset

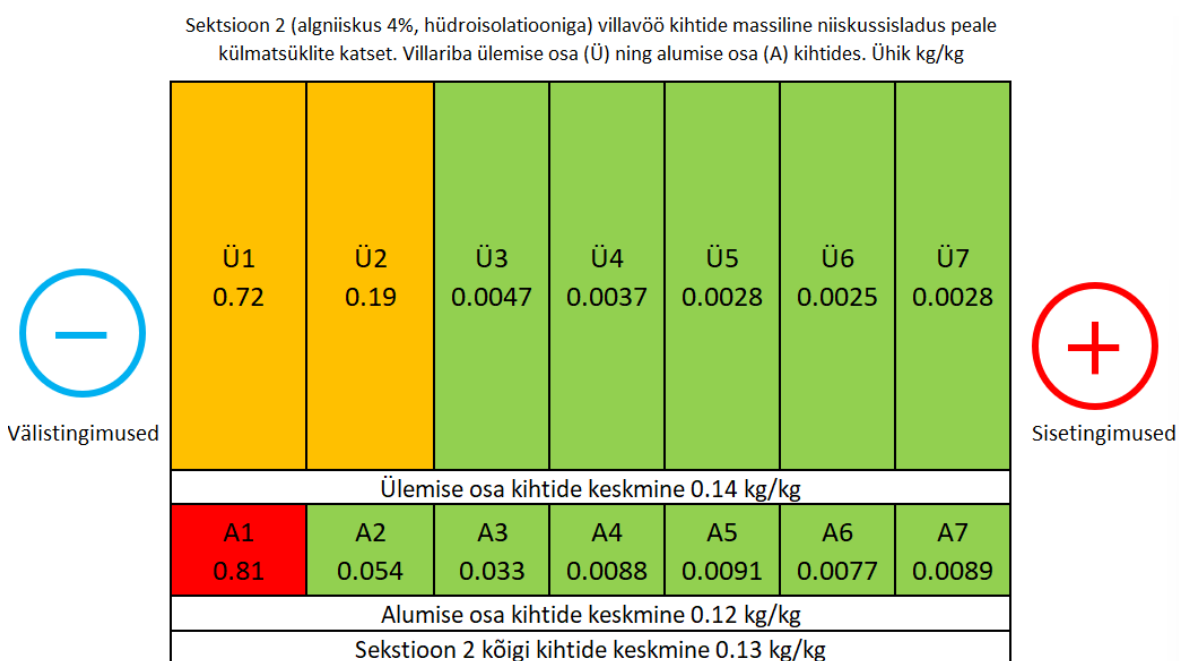
Neljanda sektsiooni tulemused näitavad, et villaribatagusest hüdroisolatsioonist on kasu (vt. Joonis 27). Võrreldes kolmanda sektsiooniga on igas kihis väiksem niiskussisaldus v.a alumise osa teine kiht. Samuti on näha, et niiskussisaldus on kokku ka väiksem ning viimaseks suure niiskussisaldusega kihiks on kolmas kiht. Hüdroisolatsiooni kasutamisega on langenud villariba niiskussisaldus 37%.

3.4 Villariba niiskussisalduse mõõtmine pärast külmatsükleid



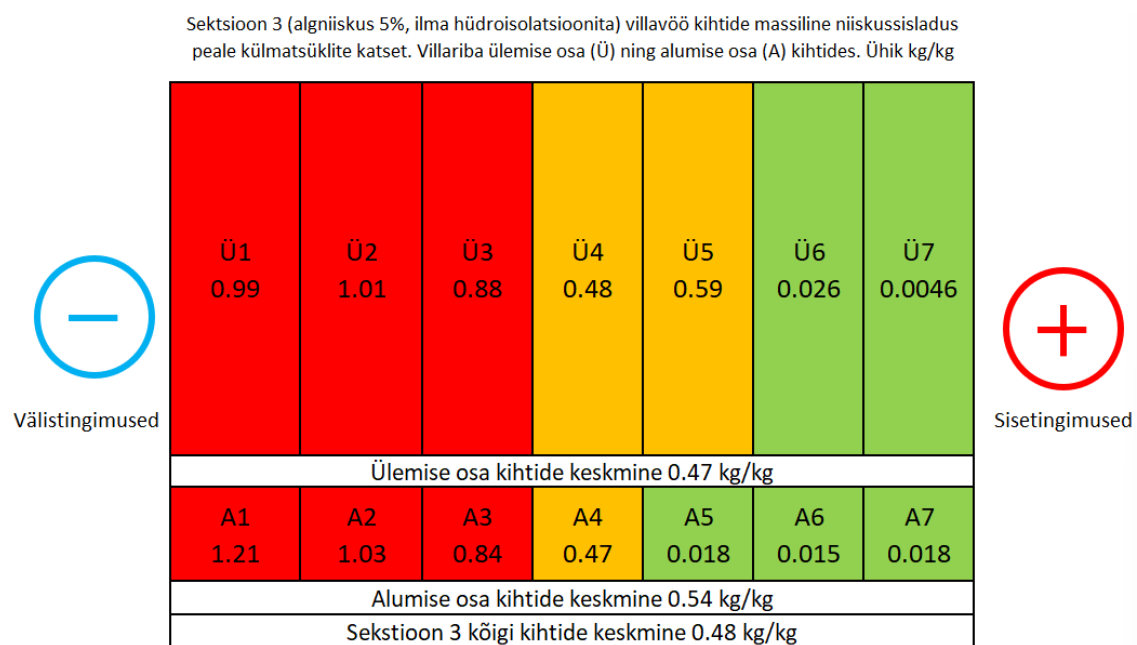
Joonis 28 Sektsioon 1 niiskussisaldus peale külmatsükli katset

Esimese sektsiooni niiskussisaldus on langenud võrreldes ekstreemse külma katsega. Selle põhjus ei ole täpselt teada, kuid võib eeldada, et on tekkinud lekke koht seinas, mis võimaldas niiskusel välja kuivada mitte ainult läbi fassaadi vaid ka kuskilt mujalt.



Joonis 29 Sektsioon 2 niiskussisaldus peale külmatsükli katset



Teises sektsioonis tõusis kogu villariba keskmine niiskussisaldus 0.031 kg/kg võrreldes ekstreemse külma katsega (vt. Joonis 29). Kuna esimeses sektsioonis oli niiskussisaldus langenud, siis ei ole võimalik võrrelda hüdroisolatsiooni mõju 4% algniiskusega müüritise puhul.



Joonis 30 Sektsioon 3 niiskussisaldus peale külmatsüklite katset

Kolmandas sektsioonis oli niiskussisaldus tõusnud rohkem kui kahekordselt võrreldes ekstreemse külma katsega (vt. Joonis 30). Välimistes kihtides oli niiskussisaldus üle 0.75kg/kg ja maksimaalselt 1.21kg/kg, mida võib pidada kriitiliseks. Kogu villariba keskmine niiskussisaldus tõusis 0.26kg/kg võrra ehk lõplik niiskussisaldus oli 0.48kg/kg.

Sektsioon 4 (algniiskus 5%, hüdroisolatsiooniga) villavöö kihtide massiline niiskussisaldus peale külmatsüklite katset. Villariba ülemise osa (Ü) ning alumise osa (A) kihtides. Ühik kg/kg

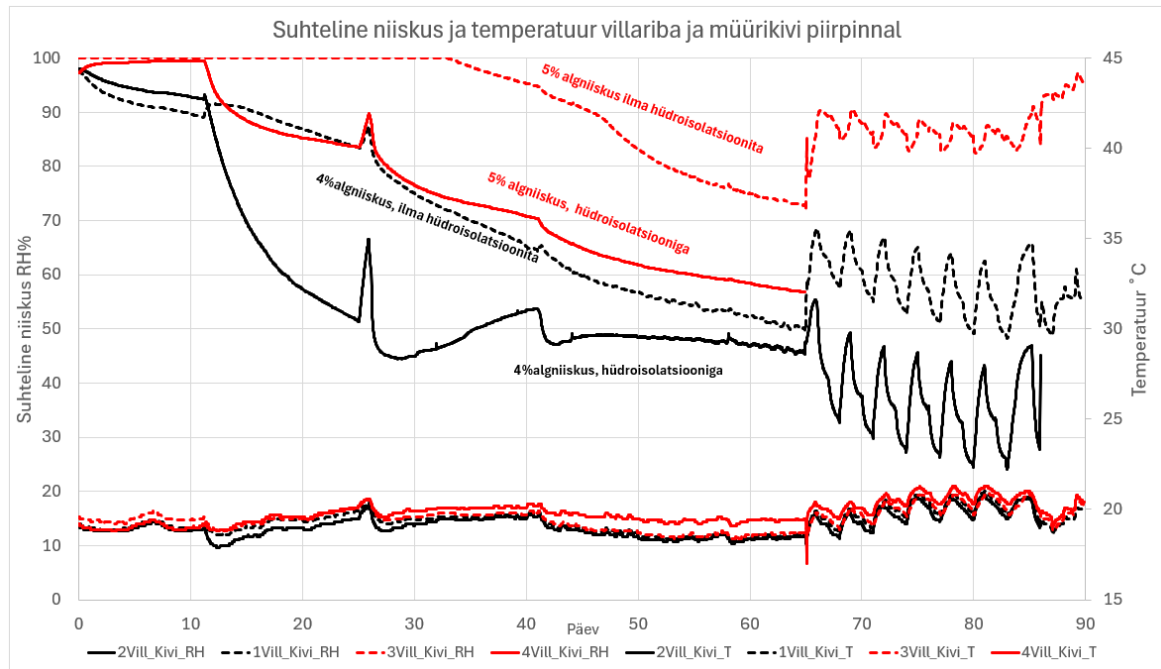
 Välistingimused	Ü1 0.96	Ü2 0.80	Ü3 0.75	Ü4 0.46	Ü5 0.0076	Ü6 0.0044	Ü7 0.0035	 Sisetingimused
	Ülemise osa kihtide keskmine 0.37 kg/kg							
	A1 1.41	A2 0.87	A3 0.68	A4 0.40	A5 0.024	A6 0.0076	A7 0.0055	
	Alumise osa kihtide keskmine 0.39 kg/kg							
Sektsioon 4 kõigi kihtide keskmine 0.38 kg/kg								

Joonis 31 Sektsioon 4 niiskussisaldus peale külmatsüklite katset

Külmatsüklite katsega tõusis neljandas sektsioonis keskmine niiskussisaldus 0.24kg/kg võrra, seega lõplik sisaldus oli 0.38kg/kg (vt. Joonis 31). Kõige kõrgem mõõdetud niiskussisaldus oli villariba alumise osa esimeses kihis 1.4kg/kg. Maksimaalne niiskussisaldus oli suurem kui kolmandas sektsioonis, aga keskmine niiskussisaldus oli väiksem. Neljandas sektsioonis oli paigaldatud villariba taha hüdroisolatsioon, mis vähendas villariba niiskussisaldust külmatsüklite katse järel 20%. Samuti on katsetulemustest näha, et niiskus pole villaribas nii kaugele levinud, kui sektsioonis kolm.

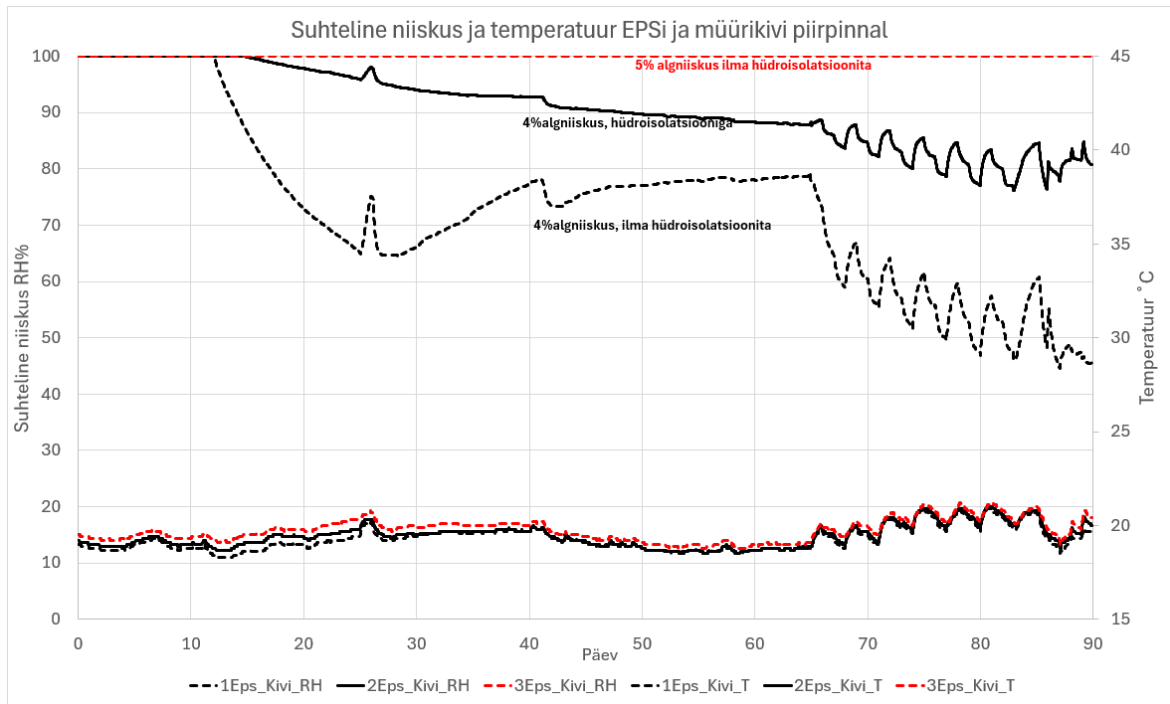
3.5 Temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmine seina sees

Katsete jooksul mõõdeti soojustuse taga temperatuuri ja suhtelist niiskust, et saaks võrrelda hüdroisolatsiooni mõju. Andurid olid paigutatud villariba taha hüdroisolatsiooni peale ja EPSi taha hüdroisolatsiooni kohale.



Joonis 32 Suhteline niiskus ja temperatuur villariba ja müürikivi piirpinnal

Suhtelise niiskuse erinevusest on võimalik näha hüdroisolatsiooni kasulikkust villariba taga niiskuse vähendamiseks (vt. Joonis 32). Mõlema algniiskusega olukorra puhul on hüdroisolatsioon vähendanud niiskuse kogust villariba taga. Mõju on suurem 5% algniiskusega müüritise puhul, kus langes suhteline niiskus 15% tänu hüdroisolatsioonile ekstreemse külma katse ajal. Kül matsüklite katset ei ole võimalik võrrelda, kuna hüdroisolatsiooniga müüritises lakkas andur töötamast peale ekstreemse külma katset. 4% algniiskusega müüritisi ei saa võrrelda, kuna ilma hüdroisolatsioonita sektsioonile (Sektsioon 1, vt. Joonis 8) tekkisid kahjustused peale ekstreemse külma katset, mis võimaldas niiskusel välja kuivada teiselt poolt seina.

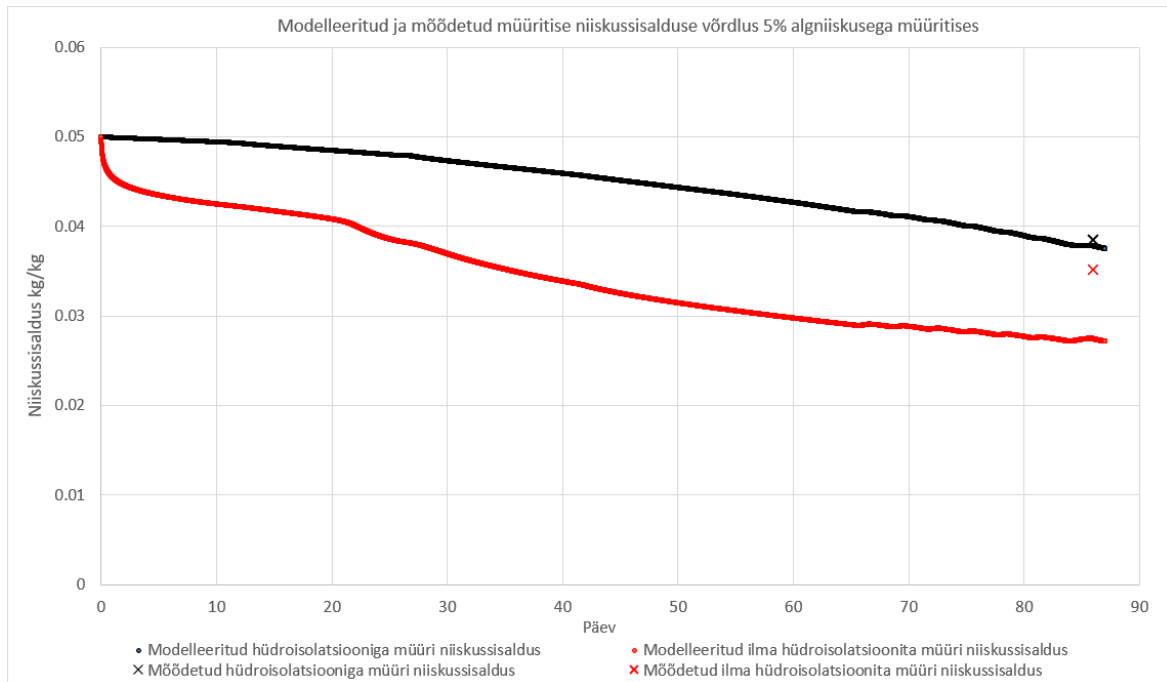


Joonis 33 Suhteline niiskus ja temperatuur EPSi ja müürikivi piirpinnal

EPS soojustuse taga oli suhteline niiskustase kõrgem kui villariba taga, kuna EPSi veeauru takistus on 20...40 korda suurem (vt. Joonis 33). EPSi tagant mõõdeti suhtelist niiskust selleks, et teada saada kas hüdroisolatsioon villariba taga takistab niiskuse liikumist EPSi tagant villariba taha. 5% algniiskusega tulemisi võrrelda ei saa, kuna hüdroisolatsiooniga müüritises olev andur lõpetas töötamise enne katse algust. 4% algniiskusega müüritisi ei saa võrrelda, kuna ilma hüdroisolatsioonita sektsioonile (Sektsioon 1, vt. Joonis 8) tekkisid kahjustused peale ekstreemse külma katset, mis võimaldas niiskusel välja kuivada teiselt poolt seina

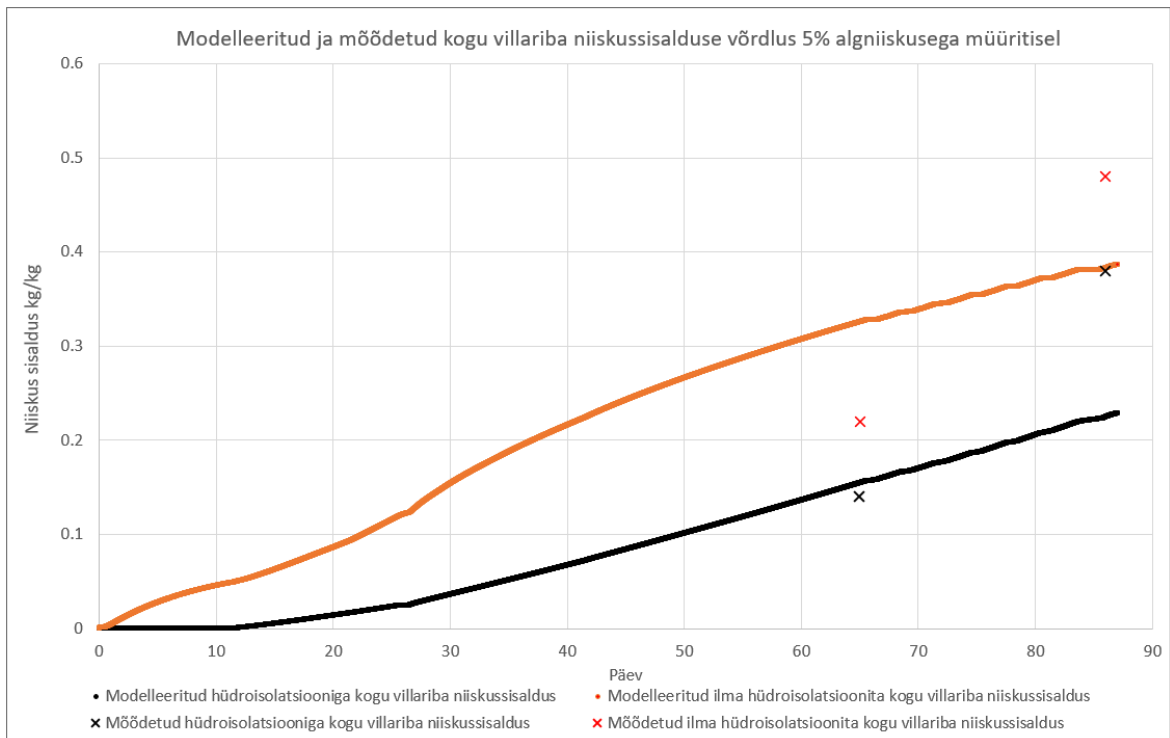
3.6 Katse tulemuste võrdlemine arvutusmodeli tulemustega

Katsete käigus purustaval meetodil välja lõigatud ja puuritud katsekehade niiskussisaldusi võrreldi mudelarvutuse tulemustega. Allolevatel joonistel on paigutatud mõõdetud niiskussisaldused katsekehade väljapuurimise päevale.



Joonis 34 Modelleeritud ja mõõdetud müüritise niiskussisalduse võrdlus 5% algniiskusega müüritisel.

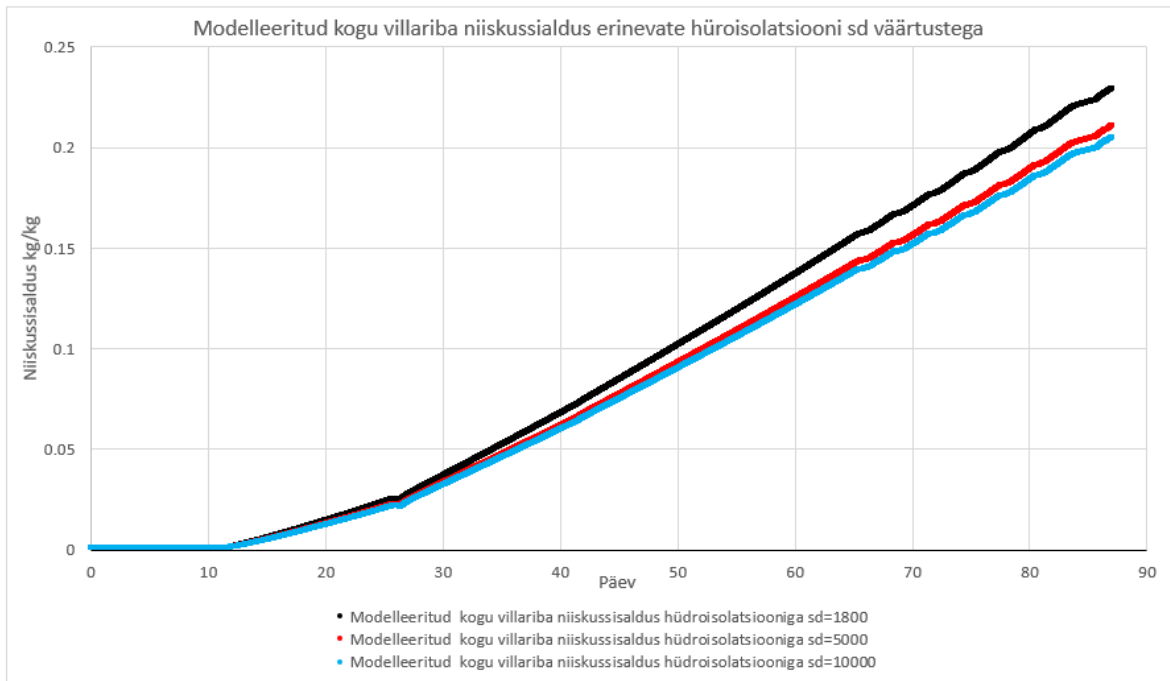
Mudelarvutused teostati ainult 5% algniiskusega müüritise kohta kuna 4% algniiskusega müüritise tulemused ei ole võrreldavad, sest müüritisele tekkisid kahjustused. Võrreldes müüritise niiskussisaldust peale katseid mudeli tulemustega, on tulemused väga sarnased (vt. Joonis 34). Hüdrosolatsiooniga müüritise puhul on mõõdetud ja modelleeritud tulemused väga sarnased, kuid mõõdetud niiskussisaldus oli suurem. Ilma hüdrosolatsioonita müüritise puhul on tulemuste erinevus suurem, kuid samuti on mõõdetud niiskussisaldus suurem kui modelleeritud. Mudeli puhul on hüdrosolatsiooni mõju suurem, kui katses mõõdetud, kuid see võib olla tingitud katsekeha mõõtmetest ja asukohast.



Joonis 35 Modelleeritud ja mõõdetud kogu villariba niiskussisalduse võrdlus 5% algniiskusega müüritisel

Modelleeritud niiskussisalduse tulemused sarnanevad osaliselt mõõdetud katsekehade niiskussisaldustega (vt. Joonis 35). Hüdroisolatsiooniga müüritise puhul, eeldab mudelarvutus väiksemat lõplikku niiskussisaldust kui mõõdetud. Ekstreemse külma katse tulemused olid väga sarnased modelleeritud tulemustega, kuid erinevus tekkis kogu katsekäigu lõpus. Katse lõpus mõõdetud niiskussisaldus oli umbes kaks korda suurem, kui mudelarvutuse tulemus.

Ilma hüdroisolatsioonita müüritise puhul näitas mudel kiiremat niiskussisalduse tõusu, kuid lõpptulemus oli sarnasem katses mõõdetud tulemusele. Ekstreemse külma katse järgne niiskussisaldus oli mudelarvutuses 50% suurem kui mõõdetud tulemus, aga lõpptulemuste erinevus oli 20%.



Joonis 36 Modelleeritud villariba niiskussisaldus erinevate hüdroisolatsioon sd väärtustega

Katseseinas kasutatud hüdroisolatsioon oli veeaurudifusiooni takistusega $\mu=1800$, mis ei ole kõige suurem hüdroisolatsiooni kohta. Katses lähtuti tulepüsivusest ehk kasutatud hüdroisolatsioon ei tohtinud olla põlevast materjalist. Mudeliga võrreldi erinevate veeaurudifusiooni takistustega hüdroisolatsioonide mõju villariba niiskussisaldusele (vt. Joonis 36). Mudelitulemuste põhjal on näha, et suurema veeaurudifusiooni takistusega hüdroisolatsioonid vähendaksid villaribas niiskussisaldus, aga mitte mitmekordselt. Näha on, et alates veeaurudifusiooni takistusest $\mu=5000$ hakkab mõju niiskussisalduse langema, sest ainult villariba tagune müüritise osa on hüdroisoleeritud. Niiskus saab ikkagi koguneda villariba sisse, sest vesi liigub kapillaarselt läbi liimsegu.

4. JÄRELDUSED

Kliimakambri katse sai edukalt läbi viidud ning õnnestus tekitada olukord, kus villariba sees oli vesi ning jää. Eeldused ja hüpoteesid mis olid püstitatud enne katsete alustamist said katse vältel vastatud, aga juurde tekkis uusi küsimusi, mis vajaksid lisa uuringuid.

Niiskuskahjustuste tekkimise tõenäosus suureneb, kui fassaadisüsteemis krohvikihi taga leidub vett, seega oli tähtis tõestada, et tõepoolest tekib villariba sisse külmas väliskliimas kondensaat. Kondensaat tekkis kõikide sektsioonide villaribadesse, madalama algniiskusega müüritise puhul vähem ja suurema algniiskusega müüritise puhul rohkem. Kondensaat tekkis esmalt peale ekstreemse külma katset ning püsis villaribas kogu katseaja vältel. 5% algniiskusega müüritiste puhul oli niiskussisaldus piisavalt suur, et krohvikihi taha villa ja EPSi piirpinnal tekkisid jääkristallid. Katsekäigu lõpus soojenes katsesein toatemperatuurini, seega sulasid jääkristallid ning villariba sisse tekkis vedel vesi.

Hüdroisolatsiooni mõju villariba niiskussisaldusele oli oodatust väiksem, kuid siiski positiivne.. Püstitati hüpotees, et hüdroisolatsioon vähendab villariba niiskussisaldust 50%, kuid katsetulemuste põhjal oli mõju väiksem. Ekstreemse külma katse puhul oli niiskussisaldus 37% väiksem selles sektsioonis, kus kasutati hüdroisolatsiooni. Niiskussisaldus kasvas kogu katsekäigu jooksul ning peale külmatsüklite katset oli kogu vee sisaldus tõusnud, seega hüdroisolatsiooni mõju oli proportsionaalselt väiksem. Pärast külmatsüklitega katse lõppu oli hüdroisolatsiooniga sektsiooni villariba niiskussisaldus 20% väikse. Seega võib öelda, et sõltuvalt väliskliima tingimustest vähendas hüdroisolatsiooni kasutamine 5% algniiskusega seina puhul villariba niiskussisaldust 20%...37%.

Taolisi niiskuskahjustusi, nagu mitmetel päris hoonetel on täheldatud, katse jooksul armeerimiskrohvi siiski ei tekkinud. Kahjustuse puudumisele võib olla mitmeid põhjuseid, kuid eeldatavasti on peamised liiga lühike katse kestus ja väiksed seina mõõdud, samuti võib olla põhjuseks siiski liiga väike müüritise algniiskus.

Samuti ei olnud võrdlemisi lühikese katseperioodi tõttu võimalik uurida villa vananemise mõju, kuna need protsessid katse kestuse ajal ei ilmnenu. Villa vananemine võib aga mõjutada vedela vee alla vajumist villariba sees gravitatsiooni mõjul. Katseseina mõõtmed olid piiratud kliimakambri suurusega ning kuna sooviti teha neli erinevat sektsiooni, oli iga sektsioon mõõtmel üpris väike võrreldes päris seinaga.

Horisontaalsuunas oli deformeeruv pikkus vaid 0,8m, seega deformeerumisest tekkivad pinged hajusid üle seina ära.

Mudeli arvutuse teostamiseks vajalikud kliimaandmed said kogutud katse jooksul. Kliimaandmetega oli võimalik teostada mudelarvutus samade kliimatingimustega, et võrrelda katsetulemusi arvutuslike tulemustega. Saadud arvutustulemused erinesid katsetulemustest, aga erinevused ei olnud igas seina osas võrdsed. Üldiselt vastas arvutusmudel katsele, arvutuste põhjal oli hüdroisolatsiooni mõju villariba niiskussisaldusele samasugune nagu katses. Täpsema arvutusmudeli teostamiseks oleks tulevikus vaja mõõta kõikide kasutatavate materjalide omadused, mis mõjutavad niiskuslevi (sorptsioonikõver, vedelikujuhtivus).

Katsest saadud tulemused on väga kasulikud, kuid vajaks veel edaspidist uurimist, kuna ühe katseseinaga ei ole võimalik kõike katsetada. Vaja oleks katsetada veel suurema algniiskusega müüritist, sest selle abil on võimalik leida kriitiline niiskussisalduse piir, mis põhjustab niiskuskahjustuste teket krohvikihis. Seeläbi on võimalik ette määrata, mis tingimustel tohiks paigaldada SILS süsteemi. Vajalik oleks teostada välimõõtmised ehitusplatsil, kus mõõta ära värskest valatud betoonõõnesplokki müüritise niiskussisaldus.

Edasisi uuringuid vajaks hüdroisolatsiooni kasutamise geomeetria. Selles katses kasutatud lahendus ei pruugi kõige parem olla, mistõttu võib hüdroisolatsiooni kasu veelgi tõusta. Üks sellistest hüdroisolatsiooni geomeetria lahendustest oleks villariba igalt küljelt katmine hüdroisolatsiooniga, et takistada kapillaarne vee liikumine liimsegu sees (vt Joonis 37). Samuti peaks uurima teiste hüdroisolatsioonimaterjalide kasutamist, peamiselt need mille veeaurutakistus on suurem, kui selles katses kasutatud materjali oma. Teisi materjale katsetades peab tagama fassaadi tulepüsivuses, seega tohiks kasutada ainult tsemendi baasil hüdroisolatsioone, mis ei piiritleks ka hilisemat betooni ringlussevõttu, kui sein on vaja lammutada/demonteerida.



Joonis 37 Kolmelt küljelt hüdroisoleeritud villariba näidis

Uuringud tulemused näitavad, et kõrgest ehitusniiskusest tingitud niiskukoormus tekitab villaribas kondensaati, mis tõenäoliselt mängib rolli niiskuskahjustuste tekkes. Hüdroisolatsioonil oli positiivne mõju niiskussisalduse vähendamiseks villaribas.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö raames uuriti põhjust, miks EPS soojustuse ning mineraalvillast tuletõkkevõõdega SILS fassaadides tekivad niiskuskahjustused, mis esinevad peamiselt just uusehitistel horisontaalsete pragudena fassaadikrohvis villavöö ja EPSi piirpinnal. Kahjustuste tekke põhjuse leidmiseks analüüsiti SILS fassaadis kasutatavate materjalide tootjate juhendeid, ehitati kindla niiskussisaldusega müürikividest katsesein, teostati katsed kliimakambris ning koostati ka arvutusmudel.

Niiskuskahjustuste täpsemaks uurimiseks ehitati kliimakambrisse katsesein. Katsesein koosnes neljast sektsioonist, mis olid omavahel niiskuslikult eraldatud. Kaks sektsiooni oli algniiskusega 4% ja kaks 5% algniiskusega. Mõlema algniiskuse puhul paigaldati ühele sektsioonile hüdroisolatsiooni villariba taha, et uurida hüdroisolatsiooni mõju villariba niiskussisaldusele. Katsesein oli ehitatud vastavalt tänapäevastele ehitusnõuetele. Kliimakambris teostati katseseinale kaks katset: ekstreemse külma katse, mille käigus langetati kliimakambris temperatuur järk järgult kuni $t=-25^{\circ}\text{C}$ kolmeks nädalaks ja külmatsükli katse, mille jooksul teostati seitse külmatsükli $t=5^{\circ}\text{C}$ ja $t=-25^{\circ}\text{C}$ vahemikus. Mõlema katse lõppedes lõigati villaribast katsekehad ning mõõdeti nende niiskussisaldust. Katsetulemused näitasid, et villaribasse koguneb suur hulk kondensaati, maksimaalne mõõdetud vee sisaldus oli 1.4kg/kg kohta, mis võib põhjustada niiskuskahjustusi.. Tulemuste põhjal vähendas hüdroisolatsioon villariba niiskussisaldust 20-37%, mis märkimisväärselt vähendab niiskuskahjustuste tekkimise riski.

Katsetulemuste kontrollimiseks täiendavate olukordade analüüsimiseks teostati arvutusmudel, et kinnitada aluskonstruktsiooni algniiskuse mõju villariba niiskussisaldusele. Täpse mudeli teostamiseks vajalikud kliimaandmed saadi kliimakambris läbiviidud katse põhjal, seega arvutusmudelis kehtisid samad välistingimused, mis mõjusid päris katseseinale. Mudeliarvutus kinnitas katseseinas mõõdetuid tulemusi, kuid mitte identsete tulemustega. Täpsema mudeli teostamiseks oleks vaja mõõta kõikide kasutatud materjalide omadused.

Käesoleva magistritöö omab praktilist väärtust, kuna selle raames avastatud katsetulemused tõendavad niiskuse probleeme mittehomoogeense soojustusega SILS fassaadides, mis on tingitud müüritise kõrgest ehitusniiskusest. Samuti tõestati, et villariba tagune hüdroisolatsiooni paigaldamine aitab vähendada villariba niiskussisaldust, mis omakorda langetab niiskuskahjustuste tekke tõenäosust. Edaspidi

oleks vaja edasi uurida erinevad hüdroisolatsiooni paigaldamise geomeetriaid ning teostada uuringuid ehituses olevate hoonete konstruktsiooni niiskussisalduse kohta.

SUMMARY

In this master's thesis, the cause of moisture damage in SILS facades with EPS insulation and mineral wool fire barriers was investigated. This damage mainly appears in new buildings as horizontal cracks in the facade plaster at the boundary between the mineral wool strip and the EPS. To find the cause of this damage, the instructions from the manufacturers of the materials used in SILS facades were analyzed, a test wall made of bricks with a specific moisture content was constructed, tests were carried out in a climate chamber, and a computational model was developed.

To study the moisture damage more precisely, a test wall was built in the climate chamber. The test wall consisted of four sections, which were moisture-isolated from each other. Two sections had an initial moisture content of 4% and two sections had an initial moisture content of 5%. For both initial moisture contents, a hydroisolation was installed behind the mineral wool strip in one section to study the effect of hydroisolation on the moisture content of the mineral wool strip. The test wall was built according to modern construction requirements. Two tests were conducted on the test wall in the climate chamber: an extreme cold test, where the temperature in the climate chamber was gradually lowered to -25°C for three weeks, and a freeze-thaw cycle test, during which seven freeze-thaw cycles between 5°C and -25°C were performed. At the end of both tests, samples were taken from the mineral wool strips and their moisture content was measured. The test results showed that a significant amount of condensate accumulated in the mineral wool strips, with the maximum measured water content being 1.4kg/kg, which can cause moisture damage. The results showed that the hydroisolation reduced the moisture content in the mineral wool strips by 20-37%, significantly reducing the risk of moisture damage.

To verify the test results and analyze additional scenarios, a computational model was developed to confirm the impact of the initial moisture content of the base structure on the moisture content of the mineral wool strip. The necessary climate data for the accurate model were obtained from the tests conducted in the climate chamber, so the same external conditions applied to the computational model as affected the actual test wall. The computational model confirmed the measured results from the test wall, though not with identical outcomes. For a more accurate model, it would be necessary to measure the properties of all the materials used.

This master's thesis has practical value as the test results discovered in the course of the research prove the moisture problems in non-homogeneous insulation SILS facades,

which are due to the high construction moisture content of the masonry. It was also proven that the installation of hydroisolation behind the mineral wool strip helps to reduce the moisture content in the mineral wool strip, which in turn lowers the likelihood of moisture damage. Future research should further investigate different geometries for installing hydroisolation and conduct studies on the moisture content of building structures in existing buildings.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. EOTA. EAD 040083-00-0404 External thermal insulation composite systems (ETICS) with renderings. EOTA; 2019.
2. Michalak J, Czernik S, Marcinek M, Michałowski B. Environmental burdens of External Thermal Insulation Systems. Expanded Polystyrene vs. Mineral Wool: Case Study from Poland. Sustainability. 2020 Jan;12(11):4532.
3. MTÜ Eesti Ehitusviimistlejate Liit. ET-2 0404-1010 SILS. Eesti Ehitusteave; 2017.
4. Knauf. Knauf Termo Plus P EPS-plaatidel fassaadisoojustussüsteem tehniline vihik. 2018 Jul;
5. Päästeamet. Ehituslike tuleohutusnõuete kokkuvõte. 2017.
6. Talvik M, Klõšeiko P, Kalamees T, Liisma E, Ilomets S. On site measurement and hygrothermal modelling of degraded ETICS facade with EPS and mineral wool fire breaks. J Phys: Conf Ser. 2023 Dec 1;2654(1):012124.
7. Volkova K, Põldaru M, Ilomets S, Kalamees T, Talvik M, Heim D. The effect of temperature, humidity and mechanical properties on crack formation on external thin plasters of ETICS. Journal of Physics: Conference Series. 2021 Nov 1;2069:012025.
8. Cecconi FR, Cocchetti G, Cornaggia A, Villa T. Mechanical Behaviour of ETICS in Presence of Water. XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020) [Internet]. 2020 Sep 25 [cited 2024 May 21]; Available from: https://www.scipedia.com/public/Cecconi_et_al_2020a
9. Freitas SSD, De Freitas VP. Cracks on ETICS along thermal insulation joints: case study and a pathology catalogue. Peixoto De Freitas And João M.P.Q. Delgado V, editor. Structural Survey. 2016 Apr 11;34(1):57–72.
10. Sulakatko V. Modelling construction process impact factors on degradation of thin rendered facades. 2019.
11. Sakret. Sakret Etics EPS. 2022.
12. Caparol. Capatect-Klebe- und Armierungsmasse 186M. 2020 Aug;
13. Caparol. Caparol WDVS/SILS soojusisolatsiooni liitsüsteemi paigaldamine Kasutusjuhend. 2005.
14. Weber Saint-Gobain. Webertherm soojusisolatsiooni liitsüsteemi paigaldusjuhend. 2019.
15. Weber Saint-Gobain. Webertherm 305 tooteleht. 2021 Apr.
16. Ceresit. Ceretherm paigaldusjuhend.
17. Caparol. Capatect SockelFlex tehniline informatsioon. 2020.
18. Eesti Ehitusteabe Fond. RT 103333-et Betooni suhtelise niiskuse mõõtmine. 2021.
19. Grunewald J. Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. 1997.

20. Nicolai A. Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials. Mechanical and Aerospace Engineering Theses and Dissertations. 2007.