TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

KOLMEKIHILISE SOOJUSTATUD POORBETOONPANEELI NIISKUSLIKU TOIMIVUSE EELDUSED

PRESUMPTIONS OF HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF THREE LAYER AUTOCLAVED AERATED CONCRETE EXTERNAL WALL

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: **Kristo Koppel**

Üliõpilaskood **165201EAEI**

Juhendaja: **Simo Ilomets, lektor**

Tallinn 2021

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" detsember 2021.a

Autor: Kristo Koppel
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"20" detsember 2021.a

Juhendaja: Simo Ilomets
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....201… .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

Liginullenergiahoonete uurimisrühm

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **Kristo Koppel, 165201**

Õppekava, peaeriala: EAEI ehitiste projekteerimine

Juhendaja(d): lektor, Simo Ilomets, 55694494

Konsultandid: Paul Klõšeiko, ekspert

Kristo Paalandi, ehitusinsener

Lõputöö teema:

Kolmekihilise soojustatud poorbetoonpaneeli niiskusliku toimivuse eeldused

Presumptions of hygrothermal performance of three layer autoclaved aerated concrete external wall

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida kolmekihilise poorbetoonist välisseina soojus- ja niiskustehnilist toimivust

2. Pakkuda välja tüüpsõlmelahendused poorbetoonpaneelidega kuni neljakorruselise korterelamu ehitamiseks.

3. Anda hinnang, millega ja millisel ajahetkel poorbetoonpaneel viimistleda.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	**Ülesande kirjeldus**	**Tähtaeg**
1.	Kirjanduse ülevaate ja esmaste arvutuste koostamine	01.03.2021
2.	Arvutusmudeleid toetava katse käivitamine	07.04.2021
3.	Katsekehade lahti ühendamine täpse veesisalduse arvutamiseks	15.07.2021
4.	Sõlmelahenduste väljatöötamine ja külmasildade analüüs	18.07.2021
5.	Katse ja simulatsiooni võrdlemine	07.10.2021
6.	Paneeli simulatsioonide koostamine ja analüüs	09.12.2021
7.	Lõputöö vormistamine	20.12.2021

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "20" detsember 2021a

Üliõpilane: Kristo Koppel

"20" detsember 2021.a / allkiri /

Juhendaja: lektor Simo Ilomets

"20" detsember 2021.a / allkiri /

SISUKORD

KOKKUVÕTE 5
SUMMARY 7
EESSÕNA 9
MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU 10
1 SISSEJUHATUS 11
1.1 Poorbetoonpaneel ehitusmaterjalina 11
1.2 Poorbetooni soojuslikud ja niiskuslikud omadused 13
1.3 Poorbetoonist paneelmaja ehitustehnoloogia 19
1.4 Polüuretaanvaht soojusisolatsioonina 21
1.5 Tarindi kui terviku soojus- ja niiskustehniline toimivus 22
1.6 Uurimistöö eesmärk 24
2 MEETODID 25
2.1 Arvutusmeetod 25
2.1.1 Arvutustarkvara 25
2.1.2 Arvutusmudelid 29
2.1.3 Külmasildade 2D analüüs tarkvaras Therm 31
2.1.1 Katsekeha 1D niiskustehniline analüüs tarkvaras Delphin 33
2.1.2 Poorbetoonpaneeli 1D niiskustehniline analüüs tarkvaras Delphin 34
2.1.3 Kontrollarvutused kondenseerumisriskile 38
2.2 Katsemeetod 39
2.2.1 Katsekehad 39
2.2.2 Mõõtevahendid 44
3 TULEMUSED JA TULEMUSTE HINDAMINE 45
3.1 Külmasildade arvutusanalüüs tarkvaras Therm 45
3.1.1 Välisseina nurk 46
3.1.2 Põranda ja välisseina liitekoht 48
3.1.3 Akna ja välisseina liitekoht 51
3.1.4 Vahelae ja välisseina liitekoht 52
3.1.5 Lamekatuse ja välisseina liitekoht 53
3.1.6 Kaldkatuse ja välisseina liitekoht 54
3.1.7 Sise- ja välisseina liitekoht 55
3.1.8 Deformatsioonivuugid välisseinas 56
3.2 Kontrollarvutus kondensaadi tekkeriskile 57
3.3 Katsetulemused 59
3.4 Katse ja katsekeha simulatsiooni võrdlus 65
3.5 Arvutustulemused 72
3.5.1 Väliskooriku külmakindlus 72
3.5.2 Väliskooriku külmakindlus hallituse testaastaga 80
3.5.3 Väliskooriku pinnaniiskus 82
3.5.4 Sisekooriku väljakuivamine, soojusläbivus ja niiskusvoog 83
3.5.5 Sisekooriku katmine viimistlusega 87
4 JÄRELDUSED 92
5 KASUTATUD KIRJANDUS 93
LISA

KOKKUVÕTE

Uurimistöös hinnati kolmekihilise soojustatud poorbetoonpaneeli niiskustehnilist toimivust Eesti kliimatingimustel ning kaardistati selle kasutuselevõtul tekkida võivaid probleeme. Poorbetooni ehitusmaterjalina iseloomustavad head soojusisolatsiooni omadused, kerge töödeldavus, kerge kaal, mittepõlevus ja homogeensus. Materjali tootmisel tekkiv tehnoloogiline niiskus, suur veeimavus ja suur hügroskoopsus võivad aga põhjustada probleeme nagu külmakahjustused, suurenenud soojusläbivusest tingitud suurem küttevajadus ja viimistlemiseks liigniiske pinna tõttu ehitusaja pikenemine.

Külmasildade analüüsimiseks koostati esmalt sõlmelahendused korterelamu ehitust silmas pidades lamekatuse, kaldkatuse, vahelae, vundamendi, siseseina ja akna liitekohtadele välisseinaga. Temperatuurivälja tarkvaraga Therm mudeldatud sõlmelahendustes jäid temperatuuriindeksid vahemikku 0,84…0,86 ning akna sõlme puhul 0,78…0,79. Külmasilla joonsoojusläbivused olid enamjaolt vahemikus 0,01…0,08 W/(m·K). Ühe näitena mittetoimivast lahendusest toodi vundamendi sõlm, mille korral betoonist lintvundamenti kasutades toimivus ei olnud tagatud ning lahenduseks pakuti vundamendis kergkruusploki kasutamist. Sõlmelahenduste toimivuse eelduseks on aga paneelide täpne monteerimine ja vuugikohtades veelekete vältimine. Lisaks teostati EVS-EN 13788 kohane välispiirde kondenseerumisriski hindamine, mille järgi kõrgeim suhteline niiskus tarindis oli 91,5%. Ligikaudse arvutusega hinnati ka korterelamu välisseinale tehtavate deformatsioonivuukide suuruseks 10-15 mm. Samas sõltub see vuugi elastsusest ja nõuab täpsustamist. Oluline oleks tulevikus määrata poorbetooni temperatuuri- ja niiskuspaisumise koefitsendid mõõtmise teel.

Et simulatsioonide koostamiseks oleks võrdlusbaas ehtsa poorbetooniga, määrati katseliselt ühe Eestis laialt kasutatava ja eeldatavalt sarnase tihedusega poorbetooni kuivtihedus ja maksimaalne niiskussisaldus ning vaadeldi kolme katsekeha väljakuivamist kaalumise ja suhtelise niiskuse mõõtmise teel. Katsekeha tuli laoplatsilt 36% kaalulise algniiskusega, kuivas tasakaaluniiskuseni 6% ning erineva katsemetoodika põhjal määrates oli maksimaalne niiskussisaldus 61…89% . Määrati ka sorptsioonkõver. Katsetingimustele võimalikult sarnase simulatsiooni koostamisega leiti väljakuivamist ja sorptsioongraafikut võrreldes, et kõige sarnasem poorbetoon on Delphini tarkvara kataloogis nimega Cellular Concrete.

Niiskustehniliste analüüside tegemiseks koostati arvutusmudelid nelja erineva kaalulise algniiskuse (70%, 35%, 20% ja 5%) ning nelja erineva algusajaga. Kolmekihilisele paneelile määrati korrigeeritud parameetritega väliskrohv ja sisepahtel.

Kasutati kondensaadi ja hallituse testaastaid. Väliskooriku külmakahjustuste analüüsil selgus, et kõige rohkem külmumis-sulamistsükleid saab arvutuskiht väliskrohvi ja poorbetooni liitekohast 5…15 mm sügavusel. Jää küllastustasemed on kõrged üle kogu väliskooriku, kuid rohkem on koormatud väliskrohvi poolne osa. Maksimaalne jääküllastus oli 30% juures ja toimus kondensaadi testaasta korral 70% algniiskusega jaanuarist alustades. 35% algniiskuse korral oli maksimaalne jääküllastus 20%. Enim purustavat jääd tekib selgelt jaanuari algusega simulatsioonides. Maksimaalse algniiskuse korral läheb vähemalt 1,5 kuud aega, et vee sisaldus poorides alla kriitilise piiri jõuaks. Kriitilise arvutuskihi simulatsioonid näitavad, et hoolimata madalast algniiskusest tõusevad vee küllastussisaldused hiljem ikkagi üle kriitilise piiri ja samal ajal esineb ka külmumist ning jää teket. Krohvikihi vajaliku veeimavuse täpsustamine ja mõju hindamine võiks olla üks edasine uurimisteema.

Esimesel aastal võib suuremast soojusläbivusest tingitud küttevajadus olla umbes 2,7 korda ning teisel aastal 1,6 korda suurem kui viiendal aastal. Sisekooriku pind on hüdroisolatsiooni paigaldamiseks sobilik 70% algniiskusega juba 2 kuu möödudes ja 35% algniiskuse korral nädala möödudes juhul, kui hoone on köetud. Hüdroisolatsiooni paigaldamise kriteerium on pinnaniiskus alla 90%. Peale hüdroisolatsiooni paigaldamist tõuseb aga juba järgmisel päeval hüdroisolatsiooni taga suhtelise niiskuse tase sõltumata algniiskusest ca 97% juurde. Kas ja millist kahju see põhjustab, vajaks täiendavat analüüsi. Märja ruumi seina mudelite koostamisel kasutati sisepinna veeauru difusioonitakistusena hüdroisolatsiooni ja keraamiliste plaatide kihil väärtust S_d=2,8m.

SUMMARY

In the present thesis, the hygrothermal performance of a three-layer insulated autoclaved aerated concrete panel in Estonian climatic conditions was evaluated. Aerated concrete construction material is characterized by good thermal insulation properties, easy workability, light weight, non-combustibility and homogeneity. However, the technological moisture, high water absorption and high hygroscopicity of the material during production can cause problems such as frost damage, increased heating requirements due to increased thermal transmittance and extended construction times due to excessively moist surfaces.

In order to analyze the thermal bridges, technical drawings were first prepared considering the construction of the apartment building. Solutions were modeled with the Therm software of the temperature field, the temperature factors were in the range of 0.84…0.86 and in the case of the window solution 0.78…0.79. Linear thermal transmittance of the thermal bridge were mostly in the range of 0.01…0.08 W/(m·K). One example of a non-functional solution was a foundation assembly in which performance was not guaranteed when using a concrete strip foundation. The solution was to use a lightweight gravel block in the foundation. However, the precondition for the performance of the assembly solutions is the precise assembly of the panels and the prevention of water leaks at the joints. The width of the deformation joints on the outer wall of the apartment building was estimated to be 10-15 mm by an approximate calculation. In addition, an assessment of the risk of condensation of the external boundary was carried out in accordance with EVS-EN 13788, according to which the highest relative humidity was 91%.

In order to have a reference base with real autoclaved aerated concrete for simulations, the dry density and maximum moisture content of one autoclaved aerated concrete widely used in Estonia and presumably similar density were determined experimentally. The drying of three test specimens was observed by weighing and relative humidity monitoring. The test piece came from the storage site with an initial humidity of 36%, dry to equilibrium humidity of 6%, and the maximum moisture content was 61… 89%. A sorption curve was also constructed. Comparing the drying and sorption graphs, it was found that the most similar autoclaved aerated concrete is Cellular Concrete in the Delphin catalog.

Calculation models with four different initial humidities (70%, 35%, 20% and 5%) and four different start times were developed for moisture analyzes. The three-layer panel was fitted with corrected external plaster and inner plaster. Condensate and mold test years were used. The analysis of the frost damage of the external shell revealed that

the most freeze-thaw cycles are obtained at the depth of 5… 15 mm from the joint of the external plaster and aerated concrete. The saturation levels of the ice are high all over the external shell, but the part near the external plaster is more loaded. The maximum ice saturation was at 30% and occurred in the condensate test year with an initial humidity of 70% starting in January. At 35% initial humidity, the maximum ice saturation was 20%. The most crushing ice is clearly formed in simulations started in January. At maximum initial humidity, it takes at least 1.5 months for the water content in the pores to reach below the critical limit. Simulations of the critical calculation layer show that despite the low initial humidity, the water saturation levels later rise above the critical limit and at the same time freezing and ice formation occur. Clarification of the required water absorption of the plaster layer and impact assessment could be one of the further research topics.

In the first year, the heating demand due to higher heat transfer may be about 2.7 times, and in the second year 1.6 times higher than in the fifth year. The surface of the inner shell is suitable for installing waterproofing with 70% initial humidity after 2 months and 35% with initial humidity if the building is heated. The criterion for installing waterproofing is a surface moisture content of less than 90%. However, after the installation of the waterproofing, the level of relative humidity behind the waterproofing rises to about 97% the next day, regardless of the initial humidity. Whether and what damage it causes would need further analysis. In the construction of the wet room wall models, the value S_d = 2.8 m was used as the water vapor diffusion resistance of the inner surface in the layer of waterproofing and ceramic tiles.

EESSÕNA

Käesolev inseneriõppe lõputöö uurib soojustatud kolmekihilise poorbetoonpaneeli võimalikkust ehitusfüüsikalisest aspektist. Lõputöö on koostatud osana liginullenergiahoonete uurimisrühma uurimisprojektist, mille eestvedajateks on Simo Ilomets, Tanel Tuisk ja Kristo Paalandi. Töö keskendub lahenduse kriitiliste kohtade kaardistamisele, et anda juhiseid nii materjalide (poorbetoon ja polüuretaan) kui ka kolmekihilise komposiitelemendi arenduseks. Tehnoloogia valmidusaste (TRL) on 3 ehk uuritakse tehnoloogia põhiprintsiipe, sõnastatakse uurimiskontseptsioon ja tehakse analüütilisi uuringuid.

Uuritavate poorbetoonelementide eeldatav kasutuskoht on kuni neljakorruseline korterelamu. Esialgsete paksustega 150 mm sisemist ja 80 mm välimist poorbetoonikihti ühendab 150 mm polüuretaanvahust soojusisolatsioon. Võimalik on kiudpoorbetooni kasutamine. Uurimustöö sissejuhatus annab ülevaate poorbetooni omadustest, et selgitada välja uurimisvajadus. Metoodika osa kirjeldab, kuidas koostati katse ja võrreldi seda simulatsiooniga ning millised ääretingimused, algniiskused ja materjalid valiti paneeli väljakuivamise simulatsioonide tegemiseks. Simulatsioonide arvutustulemused on eelinfo poorbetoonpaneelidest hoone kavandamisel niiskuse väljakuivamisega arvestamiseks ja viimistlusvariantide valimiseks. Töötatakse välja ka tüüpsete sõlmelahenduste eskiisid, mille ehituslikku teostatavust arvutusmudelite abil analüüsitakse.

Autor tänab juhendajat Simo Ilometsa igakülgse abi ja kriitilistele kohtadele osutamise eest. Suur tänu ka abi eest konsultantidele Paul Klõšeiko, kes oli abiks katsete ja simulatsioonide väljatöötamisel ning Kristo Paalandi, kes hindas esialgset kandevõimet. Tänud ka Mattias Põldarule ja Marko Ründvale suunavate arutelude eest.

Võtmesõnad: poorbetoon, kolmekihiline seinapaneel, ehitusniiskus, magistritöö

MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU

Absorptsioon – ühe aine niiskumine teise aine mõjul. Näiteks tahke materjali niiskumine ümbritseva veeauru mõjul.
Autoklaav – tööstusseade, mis võimaldab materjali töödelda kõrgel rõhul ja temperatuuril
Desorptsioon – absorptsiooni pöördprotsess ehk ühe aine väljumine teisest. Näiteks veeauru väljumine tahkest ainest.
Difusioon – gaasi liikumine kõrgema osarõhuga alalt madalama osarõhuga alale.
Ehitusniiskus – ehitusmaterjali tasakaaluniiskusest kõrgem niiskussisaldus, mis on materjali sattunud tootmise, ladustamise, transpordi või ehitusprotsessi käigus.
Emissiivsus – materjali kiirgusvõime
Hügroskoopsus – materjali võime siduda ümbritsevast keskkonnast õhuniiskust
Isoterm – joon, mis ühendab ühesuguse temperatuuriga punkte
Isotsüanaat – polüuretaanvahu komponent, aatomite rühm molekulis, mille toimel moodustuvad vahu keemilised ahelad
Kapillaarne veeliikumine – vee liikumine materjali poorides kapillaarjõudude toimel
Konvektsioon – soojuslevi, mis kaasneb vee või õhu liikumisega
Kondenseerumine – aine oleku muutumine gaasilisest vedelaks
Kütteperiood – aeg, mille jooksul välisõhu temperatuur on madalam tasakaalutemperatuurist ning hoonet on vaja kütta
Niiskuslisa – siseõhu ja välisõhu veeaurusisalduse erinevus
Polüool - polüuretaanvahu komponent, madalamolekulaarne alkohol, mille mõjul kujunevad vahu keemilised ja füüsikalised omadused
Polüuretaan – kõrgmolekulaarne ühend, mida kasutatakse laialdaselt soojustusmaterjalina
Poorbetoon – poorse struktuuriga ehitusmaterjal, mille valmistamiseks kasutatakse liiva, tsementi ja vett
Tavabetoon – betoonisegu, mille tihedus on vahemikus 2100...2600 kg/m^3

α – temperatuuripaisumise koefitsent (-)
A_W – kapillaarne veeimavus (kg/(m^2·s^{0,5}))
ε – materjali emissiivsus (-)
RH – suhteline niiskus ehk veeauru osarõhu ja veeauru küllastusrõhu suhe samal temperatuuril (%)
S_d – suhteline veeauru difusioonitakistus (m)
Δv – siseõhu niiskuslisa (kg/m^3)
μ – veeauru difusioonitakistustegur (-)

1 SISSEJUHATUS

1.1 Poorbetoonpaneel ehitusmaterjalina

1.1.1 Poorbetooni areng

Poorbetoontoodete sortimenti kuuluvad armeerimata kergplokid, armeeritud seina- ja laepaneelid ning lisaelemendid. Materjali arendamine algas 1920. aastatel Rootsis ning kiirelt jõuti ka armeeritud elementide tootmise juurde. Arhitekt Johan Axel Eriksson otsis alternatiivset materjali puidule, mida tuntakse kui heade soojusisolatsiooniomadustega ja kerge töödeldavusega materjali. Uuel tootel ei tohtinud olla aga puidu peamisi puudusi ehk tulekahju korral kergesti süttivust, suurt mädanemiskahjustuste riski, võimalikke putukakahjustusi ja suurt omaduste varieeruvust erinevates suundades, s. t heterogeensust. Lubjakivi, vee ja alumiiniumi segust moodustati autoklaavis kõrge rõhu ja temperatuuri all kaltsiumsilikaathüdraat ehk vulkaanilist päritolu kivimile tobermoriidile sarnanev keemiline struktuur $C_5S_6H_5$. Rootsis alustasid poorbetooni tootmist tehased Ytong ja Siporex, viimane asus 1935. aastal tootma ka armeeritud laepaneele. Silluste armeerimisel prooviti armeering kõigepealt ümbritseda tavabetooniga ning siis paigutada see poorbetooni sisse, kuid see osutus ebaedukaks. (Concrete, 2011). Siporex saavutas edu tänu poorbetoonist terviklike ehituslahenduste pakkumisele. Edu saavutas ka saksa ehitusinsener Josef Hebel, kes 1940. aastate keskel tegeles armeeritud paneelide tootmistehnoloogia sujuvamaks ja täpsemaks muutmisega. Suuremõõtmelised paneelid võimaldasid hiljem Teises maailmasõjas hävinenud Saksamaa linnu kiirelt üles ehitada. (Boggelen, 2014). Eesti poorbetooni kasutuselevõtu ajaks võib pidada 1950. aastaid, kui tehnikateadlane Johannes Hint leiutas desintegraatori ehk purustusseadme, mis võimaldas segada liiva ja lupja. Autoklaavis saadi uudne kivistunud ehitusmaterjal silikaltsiit, mis võimaldas tsemendibaasilise betooniga võrreldes oluliselt odavamalt elamispinda ehitada ja nii hakati nelja- ja viiekorruselisi nn. hruštšovkasid ehk tüüpseeria 1-317 kortermaju üle kogu Nõukogude Liidu ehitama kas silikaltsiidist suurplokkidest, põlevkivituhast suurplokkidest või silikaattellistest. Lisaks käivitati Ahtme Ehitusmaterjalide Kombinaat, mis tootis põlevkivituha baasil vahtbetoonist ja gaasbetoonist plokke, 6x1,2x0,25m suurpaneele ning soojusisolatsiooniplaate. Vahtbetooni tootmisel valmistatakse tuha ja liiva segu ning kergitatud vaht eraldi anumates ja segatakse hiljem omavahel kokku. Gaasbetooni tootmisel kergitatakse tuha ja liiva massi alumiiniumpulbriga ning pannakse segu autoklaavi. Gaasbetoonpaneelidega ehitati 1970. aastatel laialdaselt loomakasvatushooneid ning 1980. aasta Moskva olümpiamängudeks Olümpia hotelli ja Põhja-Eesti Regionaalhaigla

välistarindid. (Lauri, 1967). 2016. aastal valminud Eesti Rahva Muuseumi arhiivi hoidlate seinad laoti poorbetoonplokkidest materjali väga hea õhuniiskuse tasandamise võime tõttu (*Eesti Rahva Muuseum - Bauroc Eesti*, n.d.). Kuigi ajaloost selgub, et poorbetooni on võimalik kasutada kortermajade ja ühiskondlike hoonete konstruktsioonide/tarindite ehitusel, leiab materjal nii Eestis kui mujal maailmas kasutust peamiselt eramuehituses ja suuremates hoonetes kasutatakse poorbetooni vaid šahtide, parapettide ja niiskete ruumide seinte ladumisel. Põhjuseks on puidu ja betooni kui traditsiooniliste ehitusmaterjalide eelistamine, inseneride kartus projekteerida lahendusi, mida standardid ja Eurokoodeks põhjalikult ei käsitle ning kõrge ehitushind. (Fouad & Schoch, 2018).

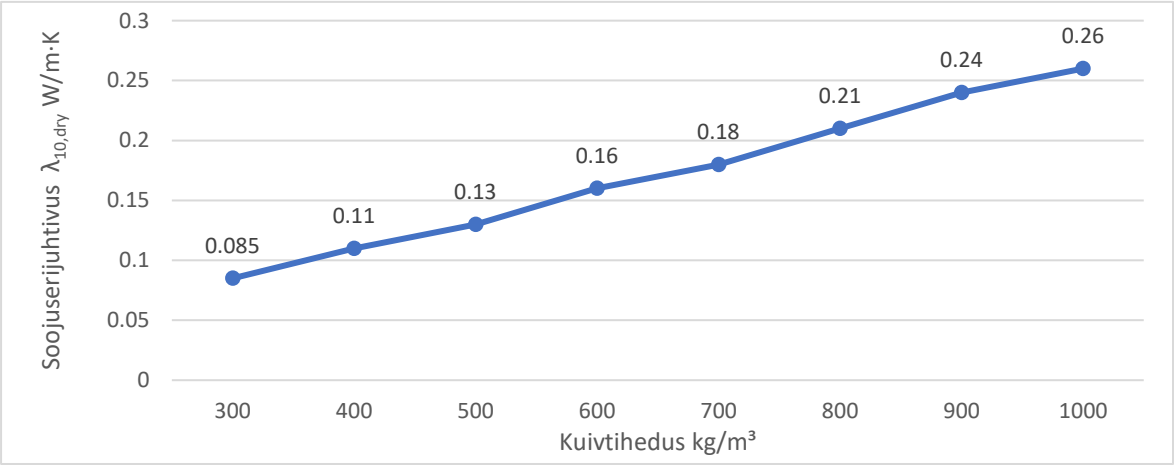
Autoklaavitud poorbetooni tihedus varieerub 250-1000 kg/m^3 vahel ja on kontrollitav toorainete vee, tsemendi, kipsi, lubja ja liiva valiku ning käitlemistehnoloogiaga. Tootmisejääkide, näiteks põlevkivituha kasutamine sideainena muudab pooristruktuuri ja materjali omadusi reeglina ebaühtlasemaks ja seetõttu eelistatakse tsementi. Poorid moodustuvad alumiiniumpulbri abil vesiniku eraldamise ja segu kergitamisega. Armeerimisega saab parandada tugevusomadusi (eelkõige tõmbetugevust), hoides väikest tihedust ja soojuserijuhtivust. Koos seguga peab ka armeering võimaldama läbida nii lõikamisliini kui autoklaavi. Poorbetooni suur veeimavus ja aluseline keskkond nõuavad nii armatuuri korrosioonikaitset kui poorbetooniga kokkupuutuvate teiste ehitusmaterjalide hüdroisoleerimist.

Poorbetoonpaneeli kaal on tavabetoonelemendiga võrreldes kuni 80% väiksem, olles ligilähedane CLT puitpaneelile. Sobivate omaduste leidmisel on võimalik saada oluliselt soojapidavam ja kergemate ehituskonstruktsioonidega hoone kui tavabetooniga. Seejuures vajatakse ka väiksema tugevusega vundamenti ja aluspinnast. Kaasajal aktuaalse keskkonnahoiu ja materjalide taaskasutuse seisukohalt eraldab 1 tonni poorbetooni tootmine 30% vähem CO_2 kui tavabetooni valmimine (*CO2 Emissions - Production*, n.d.). Arhitektuurilt keerukamate vormide lahendamine on poorbetooniga komplitseeritum ja nõuab erilahendusi. Põhjuseks on materjali haprus ja kerge purunemine mehaanilistele vigastustele. Need nõrkused muudavad eriti suuremõõtmeliste paneelide transpordi, montaaži ja konstruktsioonimaterjalina töötamise keerukaks. Sõltuvalt hoonest kasutatakse metall- või betoonkonstruktsioonidest lisatugevdusi.

1.2 Poorbetooni soojuslikud ja niiskuslikud omadused

1.2.1 Soojuserijuhtivus

Poorbetooni soojapidavuse tagab kuni 91,5% pooride sisaldus (vaata tabel 1). Madala tihedusega materjali on aastaringselt sooja väliskliimaga riikides mõistlik välispiirdetarindites kasutada ilma lisasoojustuseta. Eesti oludes peaks aga piisava soojapidavuse saavutamiseks olema materjali kuivtihedus väga madal, ca 300 kg/m^3, mis viib survetugevuse 1,8 N/mm^2 juurde ja see tingib vajaduse ehitada massiivsed 500 mm paksused seinatarindid. Suurema tugevusega materjalil kuivtihedusega 500 kg/m^3 on deklareeritud soojuserijuhtivus λ_D = 0,13 W/(m·K) (vaata joonis 1) ehk sarnane puitmaterjalile. Poorbetooni soojuserijuhtivus sõltub aga suurel määral materjali niiskussisaldusest, tihedusest ning pooride struktuurist (bauroc Eesti, 2017a).



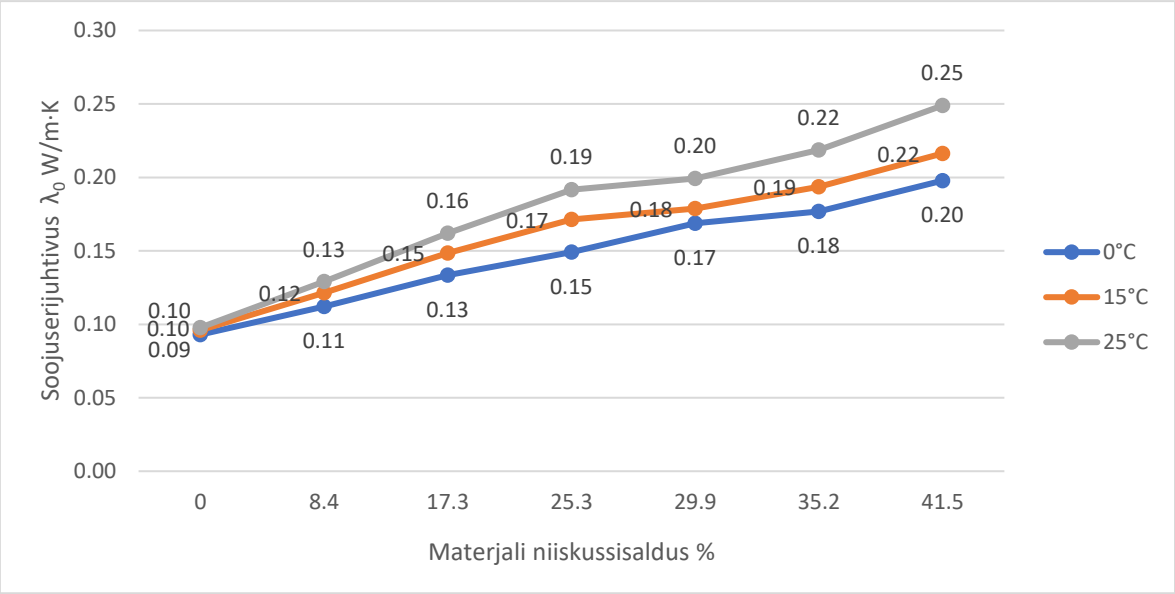
Joonis 1. Poorbetooni kuivtiheduse ja soojuserijuhtivuse vaheline seos 90% toodangust. (*EVS-EN 12602:2016*, n.d.).

Tabel 1. Poorbetooni pooride jaotus erineva tiheduse korral. (Laukaitis & Fiks, 2006)

Tihedus (kg/m^3)	250	300	400	500
Poorsus (%)	91,5	89,4	85,9	82,3
Ühendatud pooride maht kogu pooride mahust (%)	33,1	35,6	39,2	43,7

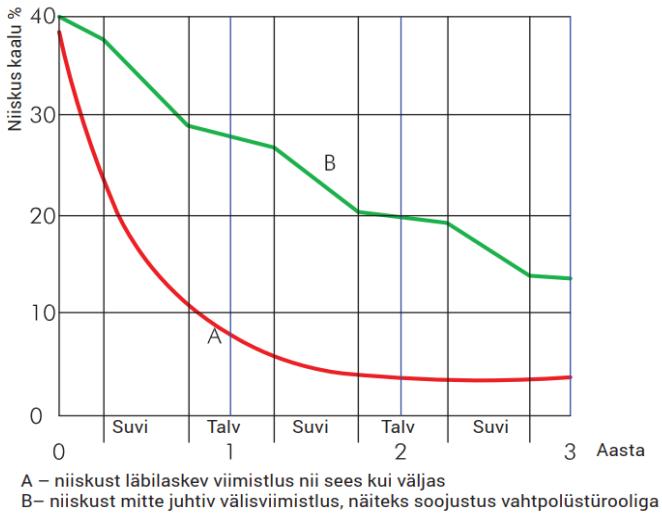
1.2.2 Kõrge niiskussisaldus

Kõrge niiskussisaldus põhjustab olulisel määral soojuserijuhtivuse suurenemist (vaata joonis 2), vähendab külmakindlust ja lükkab edasi ehitise valmimist ajal, mil poorbetooni pole kõrge pinnaniiskuse tõttu lubatud viimistleda.



Joonis 2. Poorbetooni kuivtihedusega 400 kg/m^3 niiskussisalduse ja soojuserijuhtivuse vaheline seos temperatuuril 0°C, 15°C ja 25°C. (Pehlivanli et al., 2010).

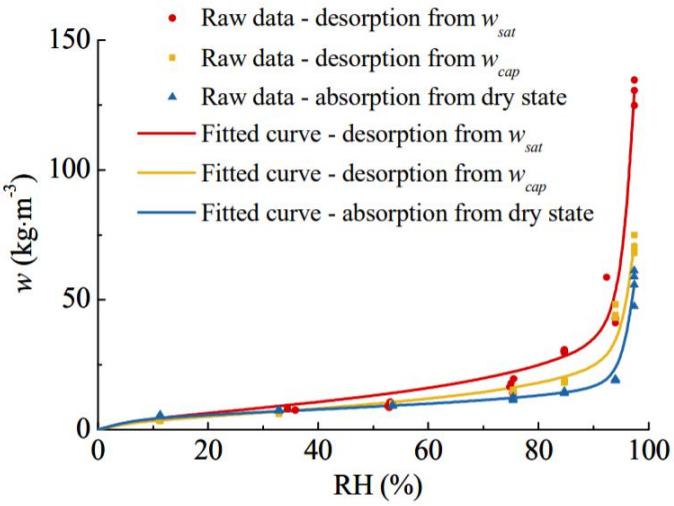
Materjali niiskussisaldus on sõltuv tootmisprotsessist. Poorbetoon sisaldab tehaselisel tootmisel tekkivat tehnoloogilist niiskust umbes 35% ja koos ehitusniiskusega võib materjali niiskussisaldus olla 70%. Võrreldes kuiva materjaliga tähendab 40% niiskussisaldus lisaks soojuserijuhtivuse suurenemisele ka 40% survetugevuse langust (Eskusson, 2001). Seega tuleb erilist tähelepanu pöörata poorbetooni ehitusaegse niiskuse väljakuivamisele ning sobiva pinnakattega katmisele. Aega selleks võib kuluda sõltuvalt välisviimistlusest mitu aastat (vaata joonis 3).



Joonis 3. Poorbetooni ehitusniiskuse väljakuivamisaeg (bauroc Eesti, 2017a).

Teine niiskussisaldust mõjutav tegur on veega otsene kokkupuude, mille käigus imetakse kapillaarjõudude toimel materjali vaba vesi. Tsemendibaasilise poorbetooni veeimavus on 400 kg/m^3 tihedusega materjalil 21% mahu järgi ja 600 kg/m^3 materjalil 24% (Eskusson, 2001). Massi järgi on vastavad näitajad 53% ja 40%. Lisanditega on võimalik poorbetooni veeimavust ja segu valmistamisel kasutatava vee vajadust vähendada (Qu & Zhao, 2017). Veeimavuse määramiseks on vaja teada kuiva materjali tihedust. Eristatakse ka näitajat veeimenduvuskiirus, mille järgi saab eelkõige hinnata fassaadi märgumist kaldvihma mõjul (tähis A_w, ühik kg/(m^2·s^{0,5})). Poorbetoonil tihedusega 400 kg/m^3 on Delphini materjalikataloogi järgi näitaja 0,043 kg/m^2·s^{0,5}, mis on umbes kolm korda suurem kui tavabetoonil.

Kolmandaks mõjutab niiskussisaldust ümbritseva keskkonna temperatuur, suhteline niiskus ja õhu liikumine. Poorbetoonil on suur hügroskoopsus ehk võime imeda endasse õhuniiskust ümbritsevast keskkonnast, samuti seda keskkonda loovutada. Sorptsioonkõvera järgi toimub seina kuivamine peale ehitust kõige kiiremini kõrge suhtelise niiskuse taseme juures ehk peale ehitust (vaata joonis 4). Punase märgistusega kirjeldatakse materjali desorptsiooni küllastusniiskuse tasemelt, kollasega kapillaarse niiskussisalduse tasemelt ja sinisega kuiva materjali absorptsiooni. Püsiv niiskusesisaldus ehk tasakaaluniiskus on 5% juures ja selleni jõuab poorbetoon levinud info kohaselt peale esimest kütteperioodi, kuid see ei arvesta algniiskust, müüritise paksust, väljakuivamise suundi (ühele või kahele poole), pinnakatet, ääretingimusi jne.



Joonis 4. Poorbetooni absorptsiooni- ja desorptioonikõverad. (Feng & Janssen, 2021).

Poorsete materjalide niiskuslik käitumine on olulisel määral seotud pooride suurusega. Poorbetoonil on kõrge hügroskoopne niiskusimavus. Väikesed poorid suurendavad

hügroskoopset niiskusimavust, suured poorid kapillaarset. Suurte pooridega materjal on ka suurema difusiooniläbilaskvusega. (Feng & Janssen, 2021). Ajaliselt saab eristada kahte perioodi: 1) poorbetooni niiskussisaldus muutub ebakorrapäraselt ja 2) poorbetooni niiskussisaldus muutub korrapäraselt. Ebakorrapärase perioodi kestus sõltub materjali tihedusest ja konstruktsioonikihi paksusest, aga võib kesta 2-3 aastat ja sel ajal kõigub niiskussisaldus iga väiksema ilmamuutuse peale. Mõju avaldab ka ümbritseva suhtelise niiskuse tase ja selle muutumine. Kui poorbetoon on jõudnud stabiilsesse perioodi, suureneb vähesel määral niiskussisaldus talvel ning väheneb suvel. (Zapotoczna-Sytek, 2018).

Töös vaadeldava kolmekihilise paneeli poorbetoon on võrreldav poorbetoonidega, mis leiavad kasutust samades kliimatingimustes, toodetakse sarnastest Eestis saadaolevatest toormaterjalidest ja sarnastes tootmistingimustes. Poorbetoonide ehitusfüüsikalist käitumist on uurinud Kaia Koitmäe magistritöös „Eestis kasutatavate autoklaavitud poorbetoonide soojuslikud ja niiskuslikud omadused", kust selgus, et erinevate tootjate poorbetoonide omadused erinevad suurel määral ja ainult kuivtiheduse põhjal toimivuse üle otsustada ei saa. Rõhutati eraldi, et just soojuslikud ja niiskuslikud omadused on materjalide lõikes väga ebaühtlased. Näiteks Aeroc Classic müürikivi soojuserijuhtivus ületas 2,1% tootja deklareeritavat. Difusioonitakistustegur oli tootja deklareeritavast „märja anuma" katsel 22% suurem ja „kuiva anuma" katsel 25% väiksem. Selgus ka, et materjali kuivatamine temperatuuril (105±5)°C lõhub materjali struktuuri. Materjali kuivatamisel ja konditsioneerimisel kulub 3-5 korda rohkem aega kui standardis soovitatud (Koitmäe, 2015). Tsementi sisaldava Aeroci ja TexoBlocki ning põlevkivituhka sisaldava Roclite võrdlev ülevaade katsetulemustest on esitatud tabelis 2.

Tabel 2. Poorbetoonplokkide ehitusfüüsikaliste näitajate võrdlus. (Koitmäe, 2015).

	TexoBlock	Roclite	Aeroc
Absoluutne tihedus (kg/m^3)	2442	2317	2402
Netokuivtihedus (kg/m^3)	425	422	416
Netokuivtiheduse deklareeritud väärtus (kg/m^3)	400	400	425
Poorsus (%)	83	82	83
Kaaluline niiskussisaldus, %			
- suhtelisel õhuniiskusel 23,8%	1,94	2,31	0,65
- suhtelisel õhuniiskusel 43,2%	2,58	3,00	1,06
- suhtelisel õhuniiskusel 77,8%	4,19	4,39	1,84
- suhtelisel õhuniiskusel 83,5%	5,33	5,10	2,29
- suhtelisel õhuniiskusel 92,1%	9,74	7,45	4,21
- suhtelisel õhuniiskusel 97,6%	19,05	15,84	10,64
Kapillaarne veeimavus kg/(m^2·s^{0,5})	0,0536	0,0389	0,0506
Difusioonitakistustegur μ (erinevate reaktiivide keskmine)	5,48	8,67	7,04
Soojuserijuhtivus, W/(m·K)			
- suhtelisel õhuniiskusel 0%	0,0915	0,1045	0,1021
- suhtelisel õhuniiskusel 50%	0,1021	0,1139	0,1044
- suhtelisel õhuniiskusel 80%	0,1239	0,1202	0,1108

1.2.2 Mahumuutused

Poorbetooni mahumuutused on tingitud eelkõige niiskusesisalduse muutusest ning tsemendi mahukahanemisest. Mahukahanemine on 0,3‰ ehk 0,3 mm/m. See toimub siis, kui materjali kaaluline niiskussisaldus langeb 60%-lt 5% peale. Mahukahanemine hakkab järsult suurenema materjalis, mille niiskussisaldus on alla 3%, mistõttu tuleks vältida ekstreemselt kuiva hoone sisekeskkonda (bauroc Eesti, 2017a). Tavabetooni mahukahanemine võib sõltuvalt tsemendisisaldusest olla kuni 0,6‰ (Otsmaa, 2014). Samas vähendab armatuur nii poorbetooni kui tavabetooni mahukahanemist, kuid käesolevas töös uuritud korrusekõrguste seinteelementide puhul tavapärast terasest vuugiarmatuuri ei kasutada. Suured mahukahanemised toovad kaasa aga materjali pragunemise ja liidete ning vuukide vaheliste õhupilude tekke. Temperatuurist tingitud mahumuutuste arvutamisel võib kasutada temperatuuripaisumise koefitsent 8 x 10^{-6} / K. (bauroc Eesti, 2017a)

Siiri-Liis Kivits jätkas oma magistritööga „Eesti kliima mõju autoklaavitud poorbetoonist müürikivide mahumuutustele ja tugevusnäitajatele" Kaia Koitmäe

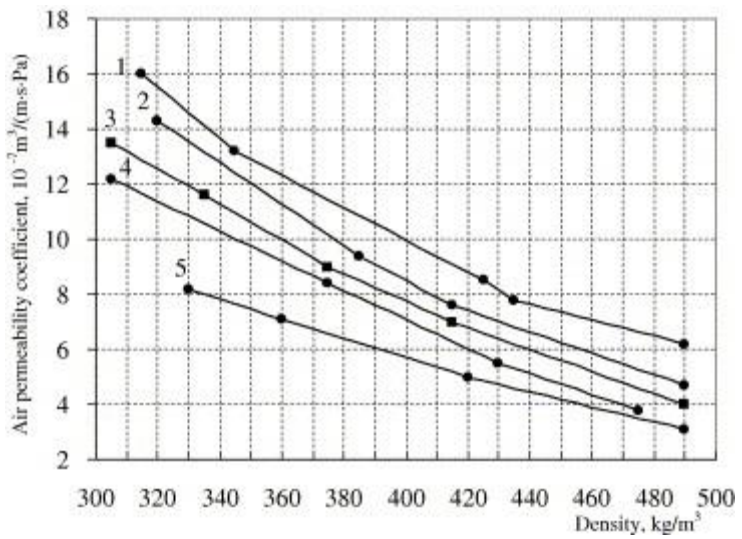
uuringut. Selgus, et kui katses suhtelise niiskus 90% korral 30°C juures vaba vesi välja kuivatati, toimus 0,93 mm/m lühenemine, mis on oluliselt suurem, kui tootja antud mahumuutus 0,3 mm/m. (Kivits, 2018).

1.2.3 Külmakahjustused

Külmakahjustuste põhjuseks on enamike hüpoteeside kohaselt jääkristallide tekitatav hüdrostaatiline rõhk, mis lõhub pooride vaheseinad. Kuigi materjali külmumine algab suurema läbimõõduga poorides, sest nendes on poorirõhk madalam, töötavad suured poorid reservmahutitena, kuhu surutakse materjalis külmuv vesi. Uuringute järgi saavad just väiksemad poorid määravaks külmakahjustuste tekkel, kuigi vesi hakkab seal jäätuma madalamal temperatuuril. Kriitiliselt väikestes poorides (<0,25 µm) tekib purustav jää ligikaudu -13°C juures (Eskusson, 2001). Suurema tihedusega ja madalama poorsusega materjal on külmakindlam, sest pooride vaheseinad on ühtlasemad ja tugevamad. Bauroci tootereas on alla 500 kg/m^3 tihedusega materjalidel külmumistsüklite arv 35 ja üle 500 kg/m3 tihedusega materjalidel 50 (bauroc Eesti, n.d.). Selliseid tsükleid määratakse läbivettinud katsekehasid korduvalt 8 tundi külmutades ja 8 tundi sulatades ning siis massikadu hinnates (*EVS-EN 15304:2010*, n.d.). Siiri-Liis Kivitsa uurimustööst ilmnes, et kümne külmumis-sulamistsükli järel vähenes Aeroci (ρ = 425 kg/m^3) survetugevus 32%, kuid tõmbetugevus oluliselt ei vähenenud (Kivits, 2018). Külmakindluse toimivuskriteeriumiks võib pidada poorbetooni niiskussisaldust alla 30% kaalu järgi (Zapotoczna-Sytek, 2018). Sellise niiskussisalduse juures võib madala tihedusega poorbetoonil (ca 300 kg/m^3) avalduda 50 külmumis-sulamistsükli katse järel kuni 16% survetugevuse langus (Kočí et al., 2018).

1.2.4 Õhupidavus

Energiatõhususe miinimumnõuetes loetletud välispiirde õhupidavus on oluline peamiselt kontrollimatute õhulekete vältimiseks (põhjustab soojakadu), eksfiltratsiooniga kaasneva konvektiivse niiskuslevi vältimiseks ning soojusliku mugavuse tagamiseks. Veel võivad õhu konvektsiooniga kaasneda probleemid siseõhu ventilatsiooni juhtimise, tuleohutuse ja helipidavuse tagamisega. Suurema tihedusega poorbetooni õhuerijuhtivus on väiksem (vaata joonis 5), sest poorsus ja suletud pooride läbimõõt on väiksem, aga seejuures omavahel ühendatud pooride maht on suurem (vaata tabel 1). See on põhjustatud väiksemast vee ja kergitusaine kogusest segus.



Joonis 5. Poorbetooni tiheduse ja õhuerijuhtivuse seos erinevate vesitsementtegurite korral: (1) 0,50; (2) 0,55; (3) 0,60; (4) 0,65; (5) 0,70 (Laukaitis & Fiks, 2006)

1.3 Poorbetoonist paneelmaja ehitustehnoloogia

Kolmekihiline poorbetoon on tehaseline valmistoode, mille terviklahenduse kontseptsioon võimaldab sarnaste omaduste ja mõõtmetega elemente kokku sobitada. Müüriplokkide kõrval kõrgemat monteeritavuse astet tagavad mittekandvad seinapaneelid, vertikaalasetusega korrusekõrgused kandvad seinapaneelid ja laepaneelid seotakse omavahel tsemendibaasilise peenmördiga. Seinapaneelide levinud mõõtmed on laius 600 mm, paksus 100-500 mm ja kõrgus kuni 6000 mm. Laepaneelide tavapärased dimensioonid on laius 600 mm, paksus 250 mm ja pikkus kuni 6000 mm. Mõõtmetele lubatud tolerantsid on esitatud toote omadusi käsitlevas standardis EVS-EN 12602 „Autoklaavitud sarrustatud poorbetoonist valmistooted", vaata tabel 3.

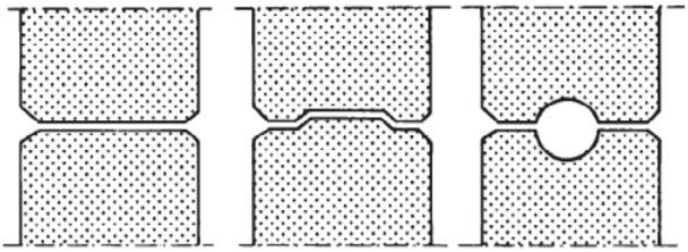
Tabel 3. Standardi EVS-EN 12602 lubatavad tolerantsid poorbetoonelemendi mõõtmetele. (*EVS-EN 12602:2016*, n.d.)

Tolerantsi klass	T1	T2	T3
Pikkus	± 5	± 3,0	± 3,0
Paksus	± 3	± 1,0	± 1,0
Kõrgus	± 3	± 1,5	± 1,5
Liitekoha pinna tasasus	Nõue puudub	Nõue puudub	≤ 1,0
Liitekoha paralleelsus	Nõue puudub	Nõue puudub	≤ 1,0

Tabeli ühik on millimeeter.

Kolmekihilise paneeli korral lüheneb ehitusaeg veelgi, sest ära jäävad ehitusplatsil aeganõudvad soojustus- ja fassaaditööd ning hoonekarp on lühemat aega ilmastikule avatud. Poorbetooni puhul on see eriti oluline, sest vähem niiskust jõuab materjali koguneda. Erinevalt müürikividest ei seisa paneelid ka pikalt laoruumides ega ehitusplatsil, vaid monteeritakse tehasest tulles kiirelt paika. See võimaldab teha paneelidele tehaselist eelkuivatust. Kolmekihilise paneeli kihtide ja pinna tugevus peab olema aga piisav, et paneeli hõõrdele töötava haaratsiga tõsta. Poorbetooni temperatuurikõikumistest ja niiskussisalduse muutusest võivad areneda deformatsioonid, mistõttu on vajalik ette näha deformatsioonivuugid.

Paneelide liitmiseks kasutatava peeneteralise liimmördi õhukese kihi tõttu selle mõju soojustehnilistes arvutustes ei arvestata. Võrreldes müüritisega on paneelehitus õhulekkevabam, sest vähem on vuuke. Vajalik on vuukide pahteldamine. Erinevalt betoonseinapaneelist lõigatakse poorbetoonpaneelidesse avad ja läbiviigud tavaliselt ehitusplatsil. Elementidel tõsteaasasid ja montaažitaskuid ei ole. Transpordi, montaaži ja avade lõikamise käigus tekkivad defektid parandatakse poorbetoonijääkidest toodetava parandusseguga, mis soojusisolatsiooniomadustele mõju ei avalda (*Toimivusdeklaratsioon Nr. 210CPR2013-07-01*, 2021).

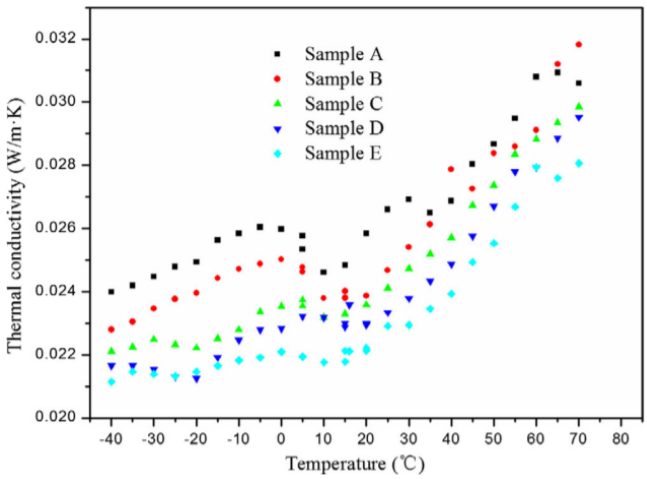


Joonis 6. Poorbetoonpaneelide liitetüübid (horisontaallõige) (Hebel, 2010).

Välispinna viimistlemisel tehakse tasandatud aluspinnale kruntimine, et poorbetoon ei imaks krohvisegu niiskust liiga kiiresti endasse. Puitroovide korral eraldatakse roovid hüdroisolatsiooniga poorbetoonist ja kasutatakse korrosioonikindlaid kinnitusvahendeid. Sisepindu reeglina ei krohvita ja tehakse vaid nakkekruntimine ning lauspahteldamine, mis jääb viimistluse aluspinnaks. Eriti sobilik on kipspahtel ning oluline on, et siseviimistluskiht oleks veeauru juhtiv – nii aitab hügroskoopne poorbetoon siseõhu suhtelise niiskuse kõikumisi puhverdada. Niiskete ruumide pinnad kaetakse hüdroisolatsiooniga, mis on suhteliselt veeaurutihe. See tähendab, et poorbetooni niiskus ei saa olulisel määral siseruumidesse kuivada (*Seinte Krohvimise Põhitõed - Bauroc Eesti*, n.d.), lisaks on keraamilistel seinaplaatidel märkimisväärne veeaurutakistus.

1.4 Polüuretaanvaht soojusisolatsioonina

Paneelide soojustusena kasutatav polüuretaan ehk PU või PUR on materjal, mis valmistatakse kemikaalide polüooli ja isotsüanaadi reageerimisel. Sarnaselt poorbetoonile on ka polüuretaanvahul suur poorsus, jäädes vahemikku 92-95%. Soojusisolatsioonina kasutatava materjali tihedus on 30-60 kg/m^3. Avatud pooridega polüuretaani soojuserijuhtivus on sarnane mineraalvillale või vahtpolüstüreenile. Suletud pooridega materjali tühimikes on täitegaas, mis muudab soojuserijuhtivuse kuni poole madalamaks. Suletud poorid vähendavad veeimavust ja suurendavad difusioonitakistust. Soojuserijuhtivust mõjutab kõige rohkem soojusülekanne läbi poorides oleva gaasi. Täitegaas võib aga materjali pooridest aja jooksul lahkuda ja omadused seetõttu halveneda. (Raado, 2018). Gaasivahetus stabiliseerub üldiselt esimese kolme aastaga. Madala temperatuuri korral pooride täitegaas kondenseerub ja soojuserijuhtivus suureneb. Kõrge temperatuuri korral hakkavad poorisisesed õhumolekulid kiiremini võnkuma, mis samuti soojuserijuhtivust suurendab. (Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations, 1993). Soojuserijuhtivuse seos temperatuuriga on nähtav joonisel 7.



Joonis 7. Soojuserijuhtivuse sõltuvus temperatuurist 5 erineva vahukoostisega polüuretaani näitel, mille tihedus oli vahemikus 29-34 kg/m^3. (Zhang et al., 2017).

Polüuretaan töötab veeauru tõkestava kihina. Veeauru difusioonitakistus μ on üldiselt 100-200. Veeimavus on väga väike, 1,5% mahust või 0,001 kg/(m^2·s^{0,5}). Niiskuse absorptsioon on 2 kuni 7% kaalust ja niiskussisaldus mõjutab soojuserijuhtivust tühisel määral. 28-päevase veeimavuse katse põhjal suureneb näitaja vaid 8%. (Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations, 1993)

PUR vahu valmistamine nõuab stabiilset temperatuuri üle 10°C ning õhuniiskust alla 90%. Poorsus ja pooride kuju on kontrollitav toormaterjalide koguse ja lisanditega. Mida ümarama kujuga poorid, seda jäigem materjal. Paisutusaine lisamisel eraldub soojus, mis põhjustab paisumise. Paisutusainest sõltuvad ka vahu nakkeomadused. Polüuretaan on hallitusekindel. Materjali nõrk külg on tulekindlus. Tavapärane tulekindlusklass on E, paljudel materjalidel on seda lisandite abil parandatud kuni klassini C. Suitsu leviku klass on reeglina keskmise tihedusega suitsu eraldav ehk s2, põlevaid tilku tavaliselt ei eralda ehk d0. (Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations, 1993)

1.5 Tarindi kui terviku soojus- ja niiskustehniline toimivus

Ruumi soojusliku mugavuse saavutamiseks peab piirdetarind olema piisavalt soojustatud ning minimaalsete külmasildade ja õhuleketega. Hea energiatõhususe tagamiseks võib välisseina soojusläbivuse projekteerida vahemikku 0,12-0,22 W/(m^2·K), kuid tegemist ei ole kohustusliku nõudega. Tervikuna ei tohi liginullenergia korterelamu energiatõhususarv olla suurem kui 105 kWh/(m^2·a). Soojus- ja niiskustehniliselt kriitilised on tarindite liitekohad välisseina liitumine akna, katus- ja vahelae ning põrandaga, kus projekteerimis- ja ehitusvead võivad viia suurte soojuskadude, sisekliima halvenemise ja niiskuskahjustuste tekkega.

Tarindi toimivuse võivad määrata erinevad toimivuse kriteeriumid:

1) Temperatuur ja suhteline niiskus tarindi sisepinnal (madalam temperatuur = kõrgem niiskus pinnal)
2) Temperatuur ja niiskus tarindi sees (sõltub materjalide soojustakistusest ja veeaurutakistusest, tarindi sisepinna soojustakistusest, ehitusniiskusest, kaldvihmast, veeavariist, kondensaadist, kapillaartõusust, õhuleketest vmt)
3) Soojusläbivuse suurenemine niiskumisest
4) Külmakindlus
5) Pragunemine (piki tarindit)
6) Pragunemine (tarindi kihtide eemaldumine teineteisest nakke kadumise tõttu)
7) Liitekohad (õhutihedus, külmasillad, piisav ruum mahumuutusteks)

Nõuete täitmiseks ja toimivuse tagamiseks tuleb välispiirdetarind projekteerida vastu võtma järgmisi koormusi:

1) Välimised kliimakoormused: temperatuur, niiskus, otsene ja hajus päikesekiirgus, sademed (vihm, lumi), tuul

2) Sisemised kliimakoormused: niiskus (niiskuslisa), veeaurusisaldus, suhteline niiskus, temperatuur
3) Füüsikalised koormused: omakaal, koormus vahelagedest, kasuskoormus, lumekoormus, tuulekoormus, avariikoormus
4) Temperatuuri ja niiskuskoormusest tulenevad deformatsioonid
5) Keemilised ja bioloogilised koormused (tänavasoolad, vetikad, bakterid, hallitusseened)

Seinte niiskuse põhjused võivad olla (*EVS-EN 13914-1:2016*, n.d.)

1) kontakt pinnavee või niiskusega
2) vihmavee pritsmed
3) ülespoole suunatud kapillaarne veeimavus
4) vihmavee sissetungimine läbi krohvi (koos õhusurvega)
5) ehitusniiskus (nii tootmisprotsessist tulenev kui ka ehitusaegsetest sademetest)
6) vee sissetungimine projekteerimis- ja ehitusvigade tõttu (läbi paneeli liitekohtade või hilisematest deformatsioonidest tekkinud pragude)
7) niiskuse moodustumine hoones veeauru kondenseerumisel (suur niiskuslisa)
8) lekkivad torustikud

Poorbetoonpaneeli kaitseb ilmastiku kahjulike mõjude eest krohvikiht või tuulduv fassaadikate. Krohvisüsteemile esitatavad nõuded (*EVS-EN 13914-1:2016*, n.d.)

1) tasandada aluspinna väiksemaid ebatasasusi ja moodustada sile ning tasapinnaline pind
2) tagada dekoratiivne viimistlus või aluspinna selliseks viimistlemine (s.h. nake)
3) piisava tugevusega
4) tagada sobiv auruläbilaskvus
5) saavutada vajalik õhutihedus
6) vastata tuleohutusnõuetele

Väliskrohvile esitatavad nõuded (*EVS-EN 13914-1:2016*, n.d.)

1) takistada vihmavee sissetungimist aluspinda
2) löögi-või kulumiskindlus
3) piisav külmakindlus
4) pragunemiskindlus
5) arhitektuursetele elementidele (parapetid, ekraanseinad, räästad) kaitset pakkuv

Eesti kliimatingimustes üle 50 aastasel ekspluateerimisel avaldunud paneelelamute ja kärgbetoonplokkidest hoonete puhul on peamisteks murekohtadeks külmakahjustused ja terassarruse korrosioon. Külmakahjustuste peamised põhjused on materjali vähene

külmakindlus, vesi konstruktsiooni rõhtpindadel, paneeli vuukide läbilaskmine ning puudulikud räästa- ja aknaplekid. Kokkuvõtvalt on välisseina põhikriteeriumiteks kande- ja piirdefunktsioon ning materjali külmakindlus ja mitte liiga kõrge hügroskoopsus. (Õiger, 2015).

1.6 Uurimistöö eesmärk

Käesolev lõputöö uurib, kas kolmekihiline poorbetoonpaneel Eesti kliimas toimib, millised peaks olema tema tehnilised näitajad, et ta toimiks ning kas sellised lahendused on ehituslikult teostatavad. Uurimisküsimust võib sõnastada järgnevalt: „Milliste omadustega peaks kolmekihilise paneeli kiudpoorbetoon ja selle kombinatsioon soojustusega olema, et sellise sein vastu peaks soojus- ja niiskustehnilisest vaatepunktist?" Eesmärk on anda poorbetoonist hoonekehandi arendamiseks infot edasist katselist uurimist vajavate kriitiliste kohtade üle ning teha esmased arvutusmudelid ja tüüplahendused, mida edasi arendada.

Peamised eesmärgid:

1) Uurida ja arvutuslikult tõendada kolmekihilise seinapaneeli toimivust
2) Hinnata külmakahjustuste esinemise tõenäosust
3) Modelleerida poorbetooni ehitusniiskuse väljakuivamist ajas
4) Töötada välja tüüpsed sõlmelahendused

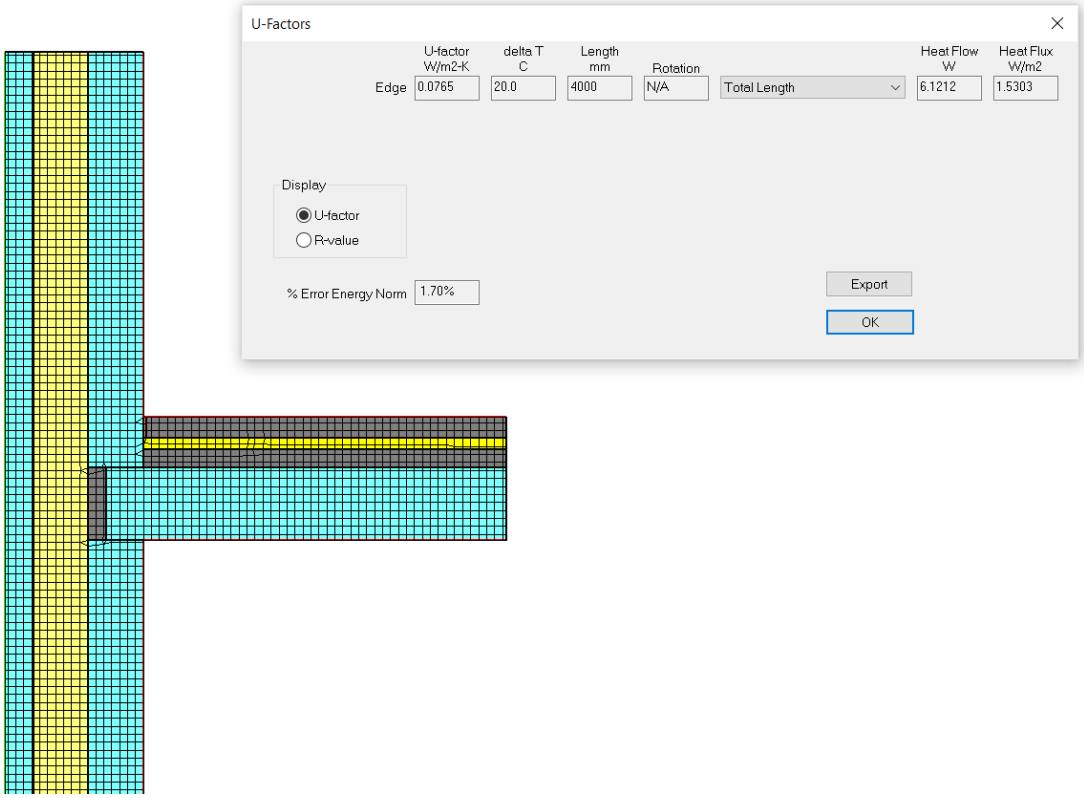
2 MEETODID

2.1 Arvutusmeetod

2.1.1 Arvutustarkvara

Tarkvara võimaldab hinnata tarindi toimivust, mudeldades erinevaid kliimaolukordi ilma suure aja- ja materjalikuluta. Käesoleva töö simulatsioonide tegemiseks valiti välja kaks tarkvara: California Ülikooli Lawrence Berkeley National Laboratory osakonna väljatöötatud programm Therm (*THERM Components | Windows and Daylighting*, n.d.) ja Dresdeni Tehnikaülikooli ehituskliima osakonnas arendatud programm Delphin (*Delphin 5 Help _ Manualzz.Pdf*, n.d.). Therm leiab kasutust keerukama geomeetriaga mudelite vaatlemiseks statsionaarolukorras. Delphini abil on otstarbekas vaadelda lihtsa geomeetriaga mudeli parameetrite muutumist ajaperioodi jooksul dünaamiliselt, kus materjaliomadused sõltuvad keskkonnatingimustest.

Sõlmelahenduste toimivuse hindamiseks on kasutatud Therm 7.8.16 tarkvara. Temperatuurivälja tarkvara Therm võimaldab modelleerida soojusülekannet ühe- ja kahemõõtmelises statsionaarolukorras. Arvutus põhineb lõplike elementide meetodil ja on mõeldud konstantsete ääretingimustega arvutamiseks. Thermi abil saab määrata sõlmede joonsoojusläbivust ja külmasilla kriitilisust. Arvutamiseks tuleb joonestada sõlme geomeetria ja määrata materjalide soojuserijuhtivused ning tarindite pinnatakistused. Lisaks tuleb sisestada sise- ja välisõhutemperatuur. Selle info põhjal genereerib programm väikestest elementidest koosneva arvutusvõrgustiku. Mida väiksemateks elementideks mudel jagatakse, seda rohkem elemente tekib ja seda täpsem on simulatsioon. Programmi sisseehitatud matemaatiline moodul Finite Element Analysis Solver arvutab iga elemendi temperatuuri ja soojusvoo. Seejärel summeeritakse üksikute elementide temperatuur ja soojusvoog, mille kaudu kuvatakse kasutajale nn U-arvu lipik ehk piirde soojusläbivus ning minimaalne ja maksimaalne temperatuur. Lisaks joonistab programm temperatuurijaotuse ja isotermid või soojusvoo vektorid. (*THERM Components | Windows and Daylighting*, n.d.)



Joonis 8. Tarkvara Therm kuvatõmmis. Pildil arvutusmudeli elementideks jagamine Finite Element Mesh ja arvutustulemuste kuvamine.

Dünaamilise soojus- ja niiskuslevi tarkvara Delphini abil saab mudelile rakendada kliimatingimusi aastate lõikes, mille abil modelleeritakse väljakuivamist, külmasildade kriitilisust ja materjali niiskumisest tingitud soojaläbivuse suurenemist. Võimalik on nii ühe- kui kahemõõtmeline modelleerimine. Töös kasutati versiooni Delphin 5.9.6.

Soojus- ja niiskuslevi modelleerimiseks Delphini tarkvaras on vajalikud materjalide mitmekülgsed karakteristikud. Delphini materjalide kataloogis on erinevate tootjate materjalide usaldusväärsed parameetrid, mis on laboratoorsete meetoditega kindlaks määratud. Kasutatud on Saksa Standardiinstituudi (DIN) standarditele toetuvat metoodikat. Modelleerimiseks vajalikud poorsete materjalide andmed ja kataloogis olevate materjaliparameetrite määramise standardid on järgnevad (Copyright & Ashrae, 2007):

1. Kuivtihedus, absoluutne tihedus, poorsus (DIN 2001a)
2. Soojuserijuhtivus (DIN 2001b)
3. Tasakaaluniiskused (DIN 2000)
4. Kapilaarse veeimavuse koefitsent (DIN 2003)
5. Difusioonitakistus (DIN 2001c)

Delphini tööpõhimõte seisneb kolme peamise tasakaaluvõrrandi lahendamises. Need võrrandid on niiskuse, õhu ja siseenergia tasakaal. Materjal tükeldatakse väikesteks elementideks ja arvutatakse iga elemendi võrrandid eraldi. Tasakaaluvõrrandid on seotud ka materjaliomaduste funktsiooniga niiskuslikust keskkonnast.

Niiskuse tasakaaluvõrrand

Niiskuse tasakaaluvõrrand liidab kapillaarsel teel liikuva vedela vee, difusiooni teel liikuva veeauru ning konvektiivsel teel liikuva veeauru niiskusvoo.

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_{REV}^{m_{w+v}} = \frac{\partial}{\partial x}\left[j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v}\right] + \sigma_{REV}^{m_{w+v}}, \quad (1)$$

kus:

$\rho_{REV}^{m_{w+v}}$ on vedela vee ja veeauru tihedus ruumalaühikus (kg/m^3)

$j_{conv}^{m_w}$ on konvektiivne vedela vee voog (kg/m^{2}s)

$j_{conv}^{m_v}$ on kapillaarse veeauru voog (kg/m^{2}s)

$j_{diff}^{m_v}$ on veeauru difusiooni voog (kg/m^{2}s)

$\sigma_{REV}^{m_{w+v}}$ on niiskuse allikad/kaod ruumalaühikus (kg/m^{3}s)

Kapillaarselt liikuva vedela vee osavõrrand: $j_{conv}^{m_w} = c_l^{m_w} \cdot j_{conv}^{m_l}$, (2)

kus

$c_l^{m_w} = 1 - c_l^{m_{voc}}$ on vee konsentratsioon vedelas faasis (kg/kg) (3)

$c_l^{m_{voc}}$ on lenduvate orgaaniliste ühendite konsentratsioon vedelas faasis (kg/kg)

$j_{conv}^{m_l} = -K_l\left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l g\right]$ on konvektiivne voog vedelas faasis (kg/m^{2}s) (4)

K_l on vedela vee juhtivus (s)

p_l on vedela vee rõhk (Pa)

ρ_l on vee absoluuttihedus (kg/m^3)

g on raskuskiirendus (m/s^2)

$\eta_w(T)$ on puhta vedela vee viskoossus

$\eta_{voc}(T)$ on lenduvate orgaaniliste ühendite viskoossus

$K_l\left(\theta_l, T, c_l^{m_{voc}} = 0\right)$ on mõõdetud vedela vee juhtivus

$$K_l\left(\theta_l, T, c_l^{m_{voc}}\right) = \frac{[\eta_{voc}(T) - \eta_w(T)]c_l^{m_{voc}} + \eta_w(T)}{\eta_w(T_{ref})} K_l\left(\theta_l, T, c_l^{m_{voc}} = 0\right) \quad (5)$$

Veeauru konvektsiooni osavõrrand: $j_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} \cdot j_{conv}^{m_g}$, (6)

kus

$c_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_a}{R_v}$ on veeauru massi konsentratsioon gaasilises faasis (kg/kg) (7)

p_v on veeauru osarõhk gaasilises faasis (Pa)

p_a on õhurõhk gaasilises faasis (Pa)

R_a on õhu gaasi konstant (J/kgK)

R_v on veeauru gaasi konstant (J/kgK)

$j_{conv}^{m_g}$ on konvektsioon gaasi faasis (kg/m²s)

Veeauru difusiooni osavõrrand: $j_{diff}^{m_v} = -\frac{D_{v,air}(T)}{\mu R_v T} f(\theta_g) \frac{\partial p_v}{\partial x}$, (8)

kus

$D_{v,air}(T)$ on paigalseisva õhu veeaurujuhtivus (m²/s)

μ on difusioonitakistus

$f(\theta_g)$ on gaasilise faasi ruumala fraktsiooni funktsioon

$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l$ gaasilise faasi ruumalafunktsioon (m³/m³) (9)

θ_{por} on materjali poorsus (m³/m³)

θ_l on vedela faasi ruumala fraktsioon (m³/m³)

Õhu tasakaaluvõrrand

Delphin arvestab õhu konvektiivselt liikumise voogu.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_a} = \frac{\partial}{\partial x} \left[j_{conv}^{m_a} \right] + \sigma_{REV}^{m_a}, \quad (10)$$

kus

$\rho_{REV}^{m_a}$ on õhu massi tihedus (kg/m³)

$j_{conv}^{m_a}$ on konvektiivne õhu massi voog (kg/m²s)

$\sigma_{REV}^{m_a}$ on õhu allikad/kaod ruumalaühikus (kg/m³s)

Õhu massi konvektsiooni osavõrrand: $j_{conv}^{m_a} = c_g^{m_a} j_{conv}^{m_a}$, (11)

kus

$c_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_v}{R_a}$ on õhu massi konsentratsioon gaasilises faasis (kg/kg) (12)

$j_{conv}^{m_a} = -K_g \left[\frac{\partial p_g}{\partial x} + p_g g \right]$ on konvektiivne voog gaasilises faasis (kg/m²s) (13)

K_g on gaasi läbilaskvus materjalist (s)

$p_g = p_a + p_v$ on gaasirõhk (Pa) (14)

$\rho_g = \frac{p_g}{R_a T}$ on gaasi absoluuttihedus (kg/kg) (15)

Siseenergia tasakaaluvõrrand

Siseenergia tasakaaluvõrrand arvestab eraldi iga materjalikihi soojusvoogu. Arvutus käib naaberkihtide temperatuuride kaudu. Programm arvestab difusiooni, vedela vee, gaasi, veeauru ja lendlevate orgaaniliste ühenditega edasi kanduvad soojusenergiat.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{U} = \frac{\partial}{\partial x} \left[j_{diff}^{Q} + u_i j_{conv}^{m_i} + u_g j_{conv}^{m_g} + h_v j_{diff}^{m_v} + h_{voc,g} j_{diff}^{m_{voc,g}} \right] + \sigma_{REV}^{U}, \quad (16)$$

kus

ρ_{REV}^{U} on sisemise energia tihedus ruumalaühikus (J/m^3)

j_{diff}^{Q} on soojusvoog (W/m^2)

$u_i j_{conv}^{m_i}$ on vedela vee siseenergia

$u_g j_{conv}^{m_g}$ on gaasi siseenergia

$h_v j_{diff}^{m_v}$ on veeauru sise- ja rõhuenergia

$h_{voc,g} j_{diff}^{m_{voc,g}}$ on lenduvate orgaaniliste ühendite sise- ja rõhuenergia

σ_{REV}^{U} on energia allikad/kaod ruumalaühikus W/m^3

Soojusvoog: $j_{diff}^{Q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$, (17)

kus

λ on materjali niiskusest sõltuv soojuserijuhtivus (W/(m·K))

T on temperatuur (K)

2.1.2 Arvutusmudelid

Arvutusmudelid pidid imiteerima kolmekihilise paneeli toimimist kortermaja välispiirde tarindina. Mudelid andsid infot, kuidas toimib tarind erinevate klimaatiliste ääretingimuste ja poorbetooni algniiskuste korral. Piirdetarindite liitekohtade uurimiseks kahemõõtmelise arvutusena töötati uurimuse algfaasis välja tarindilahenduste eskiisid. Poorbetoonpaneeli kombineeriti võimalike põranda, vahelae ja katuslae tarinditega nii, et kandvates tarindites saaks samuti võimalikult palju poorbetooni kasutada. Kahemõõtmeliste mudelite toimivust hinnati külmasildade analüüsiga tarkvaras Therm. Paneeli niiskustehnilise toimivuse vaatlemiseks koostati ühemõõtmeline mudel tarkvaraga Delphin, kus poorbetoonpaneelile rakendatakse välise kliimakoormusena hallituse- ja kondensaadi testaastaid. Mudelites kasutati poorbetooni, mille algne kaaluline niiskussisaldus on 5, 20, 35 ja 70%. Lisaks tehti märja ruumi välisseina mudel ehk olukord, kus poorbetoonpaneeli sisemine kiht on ühelt poolt ümbritsetud hüdroisolatsiooniga ja teiselt poolt madala veeaurujuhtivusega polüuretaankihiga ning väljakuivamine on oluliselt aeglasem.

Erinevate programmide mudelites kasutatavad materjalid pidid olema arvutustulemuste võrreldavuse eesmärgil samade soojus- ja niiskustehniliste omadustega. Arvutusprogrammis Therm on ainsateks kasutaja poolt sisestatavateks materjaliomaduseks soojuserijuhtivus (W/(m·K)) ja emissiivsus. Arvutusprogrammis Delphin on materjalid määratletud suure hulga andmete kogumiga, sealhulgas soojuserijuhtivus (W/(m·K)), veeimavus (kg/(m²·s^{0,5})) ja difusioonitakistus. Lisaks on

omadused funktsioonidega seotud. Tulemuste võrreldavuse eesmärgil on nii Delphini kui Thermi arvutusmudelites kasutatavad poorbetoonpaneeli materjalide parameetrid samad ning esitatud tabelis 4. Arvutamiseks sobilike omadustega poorbetooni valik on ühtlasi ka üks töö tulemustest.

Tabel 4. Materjalide parameetrid, mida kasutati tarkvaras Therm külmasildade analüüsil ja tarkvaras Delphin niiskustehnilisel analüüsil.

Materjal	Viide	Soojuserijuhtivus W/(m·K)	Kuivtihedus kg/m^3	Avatud poorsus m^3/m^3	Difusioonitakistus-tegur μ	Veeimavus kg/(m^2·s^{0,5})
Poorbetoon (*Cellular Concrete)*	Delphini kataloog ID=473	0,10	415	0,78	8,9	0,039
Polüuretaanvaht (*Polyurethane-foam)*	Delphini kataloog ID=195	0,029	45	0,92	104	0,0001
Väliskorhv (*Lime Cement Plaster*)	Delphini kataloog ID=145	0,55	1270	0,45	25 (muudetud)	0,0258 (muudetud)
Sisepahtel (*Lime Cement Plaster*)	Delphini kataloog ID=145	0,55	1270	0,45	25 (muudetud)	0,0516 (muudetud)
Betoon (sarrustatud 1%)	(1)	2,3	Materjale kasutati vaid külmasildade 2D analüüsis.			
Mineraalvill (jäik plaat)	(1)	0,038				
Vahtpolüstüreen EPS	(1)	0,040				
Ekstrudeeritud vahtpolüstüreen XPS	(1)	0,035				
Puit	(1)	0,13				
Pinnas	(1)	2,0				
Kergkruusplokk	(2)	0,24				

(1) (*EVS-EN ISO 10456:2008*, n.d.)

(2) (*Tapp-Liitega Fibo Standardplokk*, n.d.)

2.1.3 Külmasildade 2D analüüs tarkvaras Therm

Külmasildade arvutuslik analüüs seisneb standardi EVS-EN 10211:2017 kohaselt energia jäävuse seadust ja Fourier' seadust kasutades sõlmede temperatuurifunktsiooni lahendamises. Tarindite liitekoha joonsoojusläbivus leitakse valemiga:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{Nj} U_j \cdot l_j, \ [\mathrm{W/(m \cdot K)}] \qquad (18)$$

kus

L_{2D} on liitekoha soojuserikadu $[\mathrm{W/(m \cdot K)}]$;

U_j on kahte keskkonda eraldava 1D komponendi soojusläbivus j, [W/(m·K)];

l_j on 2D geomeetrilise mudeli lõigu pikkus, mille ulatuses väärtus U_j kehtib, m;

N_j on 1D komponentide arv, tk.

Valemis olev soojuserikadu L_{2D} on määratud kahte keskkonda eraldava komponendi 2D arvutuse põhjal. Töös tehakse 2D arvutus temperatuurivälja tarkvaraga Therm, mille poolt kuvatakse kasutajale soojusvool (Heat Flow) vattides (W). Standardi EVS-EN 10211:2017 kohaselt on soojusvool Φ defineeritud järgneva valemiga:

$$\Phi = L_{2D} \cdot (\theta_{int} - \theta_e), \ [\mathrm{W/(m \cdot K)}] \qquad (19)$$

kus

L_{2D} on liitekoha soojuserikadu $[\mathrm{W/(m \cdot K)}]$;

θ_{int} on sisekeskkonna temperatuur $[K]$

θ_e on väliskeskkonna temperatuur $[K]$.

Arvutusmudelis on sise- ja väliskeskkonna temperatuurid θ_{int} ja θ_e kasutaja valida. Soojusvoolu Φ kuvab tarkvara. Seega saab valemist avaldada otsitava soojuserikao L_{2D}:

$$L_{2D} = \Phi \ / \ (\theta_{int} - \theta_e) \ [\mathrm{W/(m \cdot K)}] \qquad (20)$$

Joonsoojusläbivuse valemis olev kahte keskkonda eraldava 1D komponendi soojusläbivus U_j leitakse samuti tarkvara Therm abil. Selleks tehakse iga erineva tarindilahenduse jaoks vajaliku arvutuspikkusega osamudel ning leitakse tarkvaraga selle tarindi soojusläbivus. Arvutuspikkuse l_j määramisel kasutatakse sisemõõte. Arvutuspikkus ehk minimaalne kaugus keskelemendist on 1 m, põranda ja seina osamudelis on põranda arvutuspikkus 4 m.

Joonsoojusläbivuse arvutamisel kasutati ääretingimustena sisetemperatuuri 20°C ja välistemperatuuri 0°C. Tarindi pinnatakistuseks valiti standardi EVS-EN 6946:2017 kohaselt järgmised väärtused:

1. Kõik välispinnad 0,04 (m^2·K)/W

2. Põranda sisepind 0,17 (m^2·K)/W
3. Seina sisepind 0,13 (m^2·K)/W
4. Lae sisepind 0,10 (m^2·K)/W

Lisaks poorbetoonpaneelile kasutati Thermi sõlmelahenduste arvutusmudelites ka paneeliga kokkupuutuvate tarindite järgmisi materjale:

Materjalikihi soojustakistus:

$$R = \frac{d}{\lambda}, \text{ (m}^2\text{·K)/W} \quad (21)$$

kus

d on materjalikohi paksus (m)

λ on materjali soojuserijuhtivus W/(m·K)

Soojuslikult homogeensetest kihtidest piirdetarindi kogusoojustakistus

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 \ldots + R_n + R_{se}, \text{ (m}^2\text{·K)/W} \quad (22)$$

kus

R_{si} on piirde sisepinna soojustakistus, (m^2·K)/W

R_1, R_2 on iga materjalikihi arvutuslik soojustakistus, (m^2·K)/W

R_{se} on piirde välispinna soojustakistus, (m^2·K)/W

Piirde soojusläbivus U, W/(m^2·K)

$$U = \frac{1}{R_T}, \text{ W/(m}^2\text{·K)} \quad (23)$$

Külmasilla kriitilisusele annab hinnangu temperatuuriindeks. Temperatuuriindeks näitab, kui suure osa moodustab välispinna soojustakistus kogu lõike soojustakistusest. See on dimensioonita suurus valemiga:

$$f_{Rsi}(x;y) = \frac{\theta_{si}(x;y) - \theta_e}{\theta_{int} - \theta_e} \quad (25)$$

kus

f_{Rsi} on temperatuuriindeks sisepinnal punktis (x;y)

θ_{si} on temperatuur sisepinnal punktis (x;y), °C

θ_{int} on sisetemperatuur, °C

θ_e on välistemperatuur, °C

Temperatuuriindeksi arvutamise mudelid tehti kõigile eelloetletud viiele sõlmele. Temperatuuriindeksi arvutusmudelis kasutati kõikidel välispindadel pinnatakistuse väärtust 0,04 (m^2·K)/W ja kõikidel sisepindadel tagavara kasuks 0,25 (m^2·K)/W. Arvutuste ülevaatlikkuse lihtsustamiseks võeti arvutusmudelites sisetemperatuuriks

1°C ja välistemperatuuriks 0°C. Standard EVS-EN 13788 annab temperatuuriindeksi toimivuskriteeriumiks uutel hoonetel $f_{Rsi} \geq 0{,}8$ ja aknaraamidel ≥ 0,7.

Thermi arvutusmudelis tuleb määrata ka arvutustäpsuse parameetrid. Arvutusvõrgustiku täpsust iseloomustav parameeter (Quad Tree Mesh Parameter) määrati 8, maksimaalne arvutuse veaprotsent (Maximum % Error Energy Norm) valiti 2% ja maksimaalne arvutust uuesti korrata proovimiste arv (Maximum iterations) 10.
Töös tehti külmasildade analüüs järgnevatele sõlmedele:

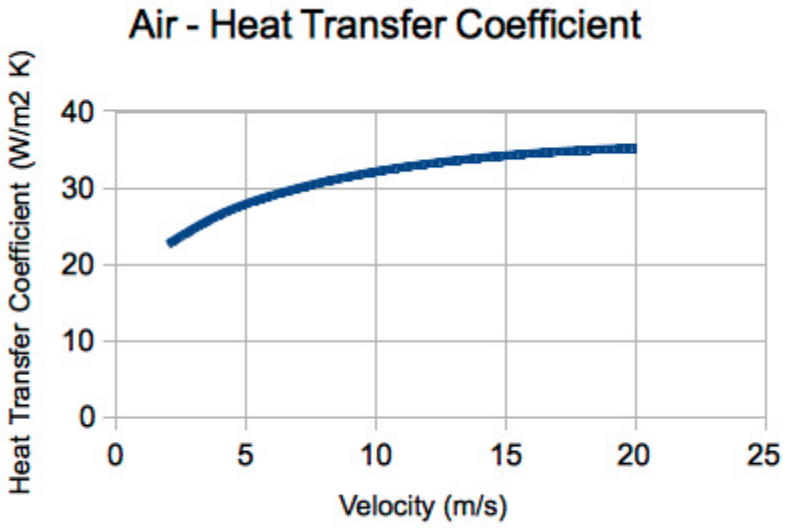
1. Nurgapaneelide liitekoht (2 varianti)
2. Põranda- ja välisseina liitekoht
3. Akna- ja välisseina liitekoht
4. Vahelae- ja välisseina liitekoht
5. Lamekatuse- ja välisseina liitekoht
6. Kaldkatuse- ja välisseina liitekoht
7. Sise- ja välisseina liitekoht

2.1.4 Katsekeha 1D niiskustehniline analüüs tarkvaras Delphin

Katsetulemuste ja arvutustulemuste võrdlemiseks koostati soojus- ja niiskuslevi poorbetoonkuubiku mudel. Mudeli eesmärk on võrrelda, kui palju erinevad 199 x 199 x 199 mm mõõtmetega poorbetoonkuubiku sorptsioonkõverad katseliselt ja arvutuslikult. Selle abil saab hinnata arvutustulemuste usaldusväärsust ning leida kõige analoogsemate omadustega poorbetoonmaterjal Delphini materjalikataloogist. Mudel jagati vertikaalsuunaliselt 93 kihiks nii, et kuubiku keskmes olevad kihid on laiemad (kuni 1 mm paksused) ja kuubiku äärtes olevad kihid järjest kitsamad. Mudeli ääretingimustena kasutati konstantselt laborikatse keskmist temperatuuri 23,6°C ja õhu suhtelist niiskust 44,7%. Arvutusperiood oli 99 päeva.

Arvutustes kasutati ühemõõtmelist vertikaalsuunalise levikuga mudelit. Sellises mudelis on küljed adiabaatilised, soojus ja niiskus külgede suunas ei levi ja seetõttu, ei määratud kuubiku külgedele ka alumiiniumfooliumi kihti. Kuubiku alumisele pinnakihile, mis oli katses alumiiniumfooliumiga kaetud, määrati veeauru suhteliseks difusioonitakistuseks Sd = 20 m. Kuubiku ülemisel pinnakihil võeti sama parameeter võrdseks 0-ga. Kuna laborikatses viidi pinnatakistus ventilaatorite abil võimalikult madalaks, korrigeeriti ka mudelis pinna difusiooniliikumise koefitsent (exchange coefficient for vapor diffusion) vastavaks mõõdetud õhu liikumiskiirusele 1,8 m/s.

Pinna konvektiivne soojusülekanne 20 W/m^2·K korrigeeriti samuti mõõdetud õhu liikumiskiiruse järgi joonise 9 abil.



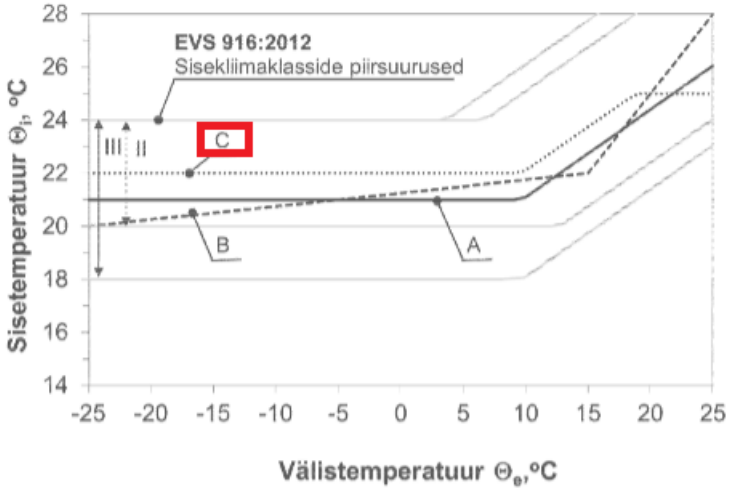
Joonis 9. Pinna soojusülekanne sõltuvalt õhu liikumiskiirusest. (*Heat Transfer in Cook Stoves (Velocity)* | *Aprovecho*, n.d.)

2.1.5 Poorbetoonpaneeli 1D niiskustehniline analüüs tarkvaras Delphin

Ühemõõtmelise horisontaalsuunalise soojus- ja niiskuslevi seinamudeliga uuriti poorbetoonpaneeli erinevate testaastate ja algniiskuste korral. Paneel koosnes seestpoolt väljapoole lugedes viiest kihist: sisekrohv, poorbetoon, polüuretaanvaht, poorbetoon ja väliskrohv. Materjalide parameetrid on esitatud tabelis 5. Paneeli kihid jagati varieeruva laiusega osadeks. Iga kihi keskmes olevad arvutusosad on laiemad ning äärtes, teiste kihtide puutepinna lähedal olevad osad kitsamad.

Arvutustes kasutatud väliskliima ääertingimused olid „kondensaadi testaasta 1995-1996" ja „hallituse testaasta 1989-1990". Kliimaandmed on kogutud Eestis Väike-Maarja testjaamas koordinaatidega 59°08'29''N, 26°13'51''E. Seina orientatsiooniks valiti edelasuund 225° kui kõige kriitilisem ilmakaar Eestis. Seina asukoht ja orientatsioon mõjutab päikesekiirguse, tuule ja sademete mõju suurust. Kondensaadi testaastaga tehti arvutused algusega talv, kevad, sügis ja suvi kõige kriitilisema algperioodi leidmiseks. Hallituse testaastaga tehti arvutused algusega 1. juuli. Arvutusperioodi pikkus on 5 aastat.

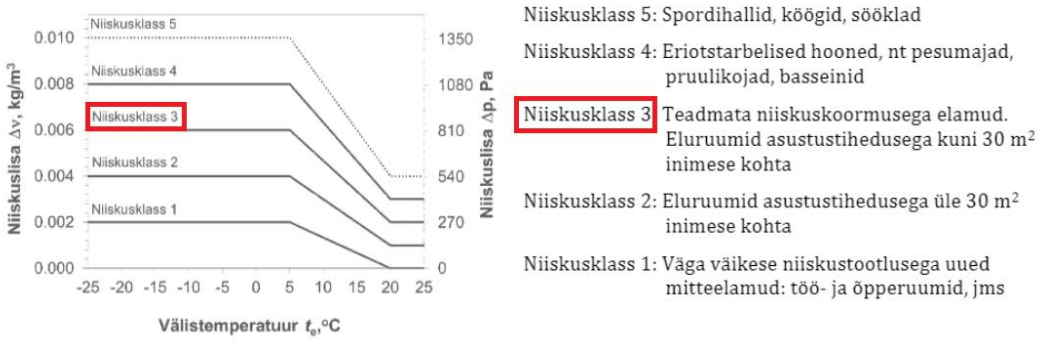
Sisekliima tingimused on tehtud väliskliimast sõltuvaks. Sisetemperatuurina on kasutatud standardi EVS-EN 13788 soovitusel arvutuslikku sisetemperatuuri graafikut, vt joonis 10.



Joonis 10. Sisetemperatuuri ja välistemperatuuri sõltuvus (*EVS-EN 13788:2012*, n.d.).

Arvutusolukord on C ehk peale 2000. aastat ehitatud välisõhu temperatuuri abil juhitava keskküttesüsteemiga elamu. Seega sisetemperatuur püsib konstantsena 22°C peal kuni ööpäeva keskmise välisõhu temperatuurini 10°C. Kui välistemperatuur on vahemikus 10°C...20°C, on sisetemperatuur vahemikus 22°C...25°C. Kõrgema välistemperatuuri korral kui 20°C jääb sisetemperatuur 25°C peale. Sellise funktsiooni rakendamiseks tehti eraldi sisekliima fail, kus kondensaadi või hallituse testaasta igale välisõhu temperatuurile pandi vastama eelloetletud tingimustel siseõhu temperatuur.

Sisekeskkonna niiskustingimused on määratud niiskuslisa abil arvutatud suhtelise niiskusega. Valitud on niiskusklass 3 kui teadmata niiskuskoormusega elamu. Niiskusklass 3 on kõige kriitilisem elamutele rakendatav arvutusliku niiskuskoormuse klass 90/10% usaldusnivool (niiskuslisa 6 g/m^3), mis on saadud Eesti elamutes tehtud mõõtmistest.



Joonis 11. Niiskusklassi valik (*EVS-EN 13788:2012*, n.d.).

Sisekeskkonna suhteline niiskus on samuti sõltuvuses välisõhu temperatuurist ja suhtelisest niiskusest. Sisekliima faili loomisel arvutati esmalt kondensaadi või hallituse testaasta välisõhu suhtelise niiskuse 24 tunni keskmine. Seejärel leiti 24 tunni keskmine välisõhu niiskussisaldus. Liites välisõhu niiskussisaldusele joonise 10 järgi siseõhu niiskuslisa, saadi siseõhu niiskussisaldus. Sealt avaldati igale kondensaadi või hallituse testaasta välisõhu suhtelisele niiskusele vastav siseõhu suhteline niiskus ja rakendati seda Delphini poorbetoonpaneeli mudelile.

Välisõhu/siseõhu niiskussisaldus avaldub valemist

$$\nu = RH \cdot \nu_{sat,} \ (g/m^3) \tag{26}$$

kus

RH on suhteline niiskus (%)

ν_{sat} on veeauru küllastussisaldus õhus (g/m^3)

Veeauru küllastussisaldus õhus on võrdne

$$\nu_{sat} = \frac{M_w \cdot p_{sat}}{R \cdot T}, \ (g/m^3) \tag{27}$$

kus

M_w on vee molaarmass 18,015 kg/kmol

p_{sat} on veeauru küllastusrõhk (Pa)

R on universaalne gaasikonstant 8314,41 J/(kmol·K)

T on õhutemperatuur kelvinites

Veeauru küllastusrõhk võrdub

$$p_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\frac{17{,}269 \cdot t}{237{,}3+t}}, \text{ Pa, kui vaadeldav temp.} \geq 0°C \tag{28}$$

$$p_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\frac{21{,}875 \cdot t}{265{,}5+t}}, \text{ Pa, kui vaadeldav temp.} < 0°C \tag{29}$$

Mudeli sisepinna soojustakistus muudeti kriitilise niiskusmudeldamise tarvis 0,25 $(m^2 \cdot K)/W$ peale. Välispinna soojustakistus on 0,04 $(m^2 \cdot K)/W$. Sisepinna difusioonitakistus on $3 \cdot 10^{-8}$ s/m, välispinna difusioonitakistus $2 \cdot 10^{-6}$ s/m.

Paneeli simulatsioonid koostati poorbetoonile algniiskusega 5%, 20%, 35% ja 70% kaalu järgi. Algniiskus 5% on poorbetooni tavapärane tasakaaluniiskus, milleni materjal peaks kuivama, et täisväärtuslikult tarindis toimida. 20% niiskussisaldus valiti kui 5% ja 35% vaheline niiskussisaldus. Lisaks on paneelidele tehaselist eelkuivatust tehes üks võimalik variant kuivatada materjal 20% niiskussisalduse lähedaseks. 35% on niiskussisaldus, millega poorbetoon reeglina tehasest tuleb ja konstruktsiooni paigaldatakse (juhul, kui ei saa kilepakendis enne paigaldust oluliselt

kuivada). Ka uurimistöö katselises osas määrati niiskussisaldus poorbetoonil, mis oli tehasest tulnud ja peale seda ka laoruumides seisnud. Tulemuseks oli 35,5% (vaata joonis 31 lk 63). Sellise algniiskusega materjal on kõige lähedasem tavapärasele ehitusolukorrale ja seetõttu annab olulist infot, kui kaua poorbetoon ajas välja kuivab. Viimaks tehti simulatsioonid kõige kriitilisemale olukorrale ehk poorbetoonile, mis on veega peaaegu küllastunud ja mille niiskussisaldus on 70%. Simulatsioonide tegemist alustati katsega paralleelselt. Katse algusajal saavutas vetteuputatud katsekeha 70% niiskussisalduse ja jäi selle lähedale umbes 20-ks päevaks püsima (vaata joonis 32 lk 64). Selle järgi valiti ka simulatsioonide algniiskus. Hiljem suurenes läbivettinud katsekeha niiskussisaldus veelgi. Siiski pole taoline materjali läbivettimine konsktruktsioonis niivõrd tõenäoline ja 70% algniiskust võib simulatsioonide tegemisel pidada piisavalt kriitiliseks. Simulatsioonides tehakse eeldus, et algniiskus on poorbetoonis ühtlaselt jagunenud. Erinevate aastaaegade väliskliimast tingitud mõju hindamiseks alustati simulatsioone neljal erineval ajal: 1. jaanuar, 1. aprill, 1. juuli ja 1. oktoober ning simulatsioonide kestus oli üldjuhul 5 aastat.

Väliskrohvi paksuseks valiti 10 mm. Lisaks korrigeeriti Delphini kataloogist valitud krohvi difusioonitakistustegurit ja veeimavust sarnaseks Eestis laialdaselt kasutatavatele Caparoli (tootja DAW) toodetele. Üks võimalik lahendus poorbetooni katmiseks on 8 mm paksune aluskrohv (nt Capatect ArmaReno 700), selle peal krunt (nt Caparol PutzGrund 610) ja siis 2 mm viimistluskrohv (nt Caparol Longlife K15). Välisvärvi puhul eeldati, et toonitakse viimistluskrohvi ja eraldi fassaadi üle ei värvita. Lihtsustuse mõttes on kogu väliskrohvi näitajad 10 mm ulatuses μ = 25 ja A_w = 0,0258 kg/(m^{2}s^{0,5}) (*Toimivusdeklaratsioon Nr: CAP-998-4670128*, n.d.). Väliskrohvile määrati lisaks maksimaalne algniiskus 0,449 m^3/m^3. Kuna Caparoli toote puhul on tegemist lubitsemendi baasilise krohvimördiga, siis valiti Delphini kataloogist sarnase koostisega krohv Lime Cement Plaster (ID = 145).

Sisepahtli paksuseks valiti 3 mm ning näitajaid korrigeeriti sarnasel moel. Üks võimalik sisepahtel poorbetooni katmiseks on näiteks ettevõtte DAW toodetav bauroc PUTTY. Delphini kataloogist valiti krohvimördiks taas Lime Cement Plaster (ID=145) ja määrati näitajad μ = 25 ja Aw = 0,0516 kg/(m^{2}s^{0,5}) (*Toimivusdeklaratsioon Nr: BAU-998-0001*, 2021). Algniiskus määrati taas 0,449 m^3/m^3. Lisaks rakendati sisemise värvikihi veeauru difusioonitakistust 0,1 m kui väljakuivamist raskendav asjaolu. Märja ruumi seina mudeldamiseks määrati sisepahtli pinna veeauru difusioonitakistuseks vastavalt fiiberkummist hüdroisolatsiooni S_d = 1,8 m (*Kiilto Fibergum Tooteleht*, n.d.) ja keraamilise plaadi S_d = 1 m (*Construction Materials Manual - Manfred Hegger,*

Volker Auch-Schwelk, Matthias Fuchs, Thorsten Rosenkranz - Google Books, n.d.) veeauru difusioonitakistuste summale Sd = 2,8 m.

Simulatsioonides on kasutatud termineid veeküllastus ja jääküllastus. Need näitavad, mitu % poori ruumalast on veega või jääga täidetud. Veeküllastus võtab arvesse nii vedelat vett, jääd kui veeauru. Jääküllastus arvestab ainult jääd.

2.1.6 Kontrollarvutused kondenseerumisriskile

Kondenseerumisriski arvutused koostati standardi EVS-EN 13788:2012 juhiste järgi välisõhu madalaima ööpäevase keskmise välisõhu temperatuuri kohta. Hoone asukohaks valiti Tallinn ja niiskuslisaks klass 3. Materjalide soojuserijuhtivused võeti samaks simulatsiooniprogrammides kasutatud materjalide parameetritega, mis on esitatud tabelis 4 lk 30. Materjalide veeauruerijuhtivused δ_p, (kg/(m·s·Pa) avaldati järgnevate valemite kaudu:

$$\delta_a = 2{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{T^{0{,}81}}{P_n} \qquad (30)$$

kus T on temperatuur kelvinites

P_n on õhu normaalrõhk 101325 Pa

δ_a on seisva õhu veeauruerijuhtivus, kg/(m·s·Pa)

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \qquad (31)$$

kus μ on difusioonitakistustegur

Välisõhu veeauru sisaldus leiti suhtelise niiskuse ja välisõhu temperatuurile vastava õhu maksimaalse veeaurusisalduse korrutisena. Välisõhu temperatuurina kasutati standardi EVS-EN 13788:2012 lk 47 tabelite NA.1 ja NA.2 andmeid. Välisõhu veeaurusisaldusele liideti niiskuslisa ja jagati siseõhu maksimaalse veeaurusisaldusega vastaval temperatuuril, et saada siseõhu suhteline niiskus.

Tarindi kihtidevahelised temperatuurid arvutati valemiga

$$t = t_i - (t_i - t_e) * (R_{si}/R_{tot}) \qquad (32)$$

kus t on kihtide vaheline temperatuur °C

t_i on siseõhu temperatuur °C

t_e on välisõhu temperatuur °C

R_{si} on sisepinna soojustakistus $(m^2 \cdot K)/W$

R_{tot} on kihtide kogusoojustakistus $(m^2 \cdot K)/W$

Kihtidevahelised suhtelised niiskused arvutati valemiga

$$RH = \frac{p}{p_{sat}} \cdot 100 = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100 \quad (33)$$

kus p on veeauru osarõhk, Pa

p_{sat} on veeauru küllastusosarõhk, Pa

v on õhu veeaurusisaldus, g/m^3

v_{sat} on õhu maksimaalne veeaurusisaldus, g/m^3

2.2 Katsemeetod

Et simulatsioonides kasutatavale poorbetoonile oleks võrdlusbaas, teostati Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemaja (Mäepealse 3) katselaboratooriumis poorbetooniga katsed. Delphini simulatsiooniprogrammi kaks peamist väljundit, mis tarindi niiskuslikku käitumist iseloomustavad, on materjalikihtide suhteline niiskus ja niiskussisaldus. Vaadelda saab näiteks suhtelise niiskuse ja niiskussisalduse jaotumist üle konstruktsiooni, ühe kindla punkti väärtuste muutumist ajas ja keskmisi väärtusi. Et võrrelda programmi simulatsioone erinevate poorbetoonide kohta, jälgiti ühe Eestis laialdaselt kasutatava poorbetooni suhtelist niiskust ja niiskussisaldust ka katseliselt. Selleks paigaldati katsekehasse kolm suhtelise niiskuse andurit (vt. joonis 15). Katsekeha jäeti kuivama ning kaaluti pidevalt, et jälgida niiskussisalduse vähenemist. Kuna töös vaadeldava kolmekihilise paneeli poorbetoon on kavas toota Eestis saadaolevatest toormaterjalidest, on lõputöö katsete ajal kõige sarnasemate omadustega saadaolev materjal Bauroci Lääne-Virumaal Andjas paikneva tehase toodetav poorbetoon. Katsete abil valiti Delphini programmi kataloogis olevatest poorbetoonidest sarnaselt käituv materjal ja tehti sellega edasised simulatsioonid. Lisaks kasutati laotingimustel seisnud ja veega küllastunud poorbetooni kaalulisi niiskussisaldusi simulatsioonide algniiskustena.

2.2.1 Katsekehad

Niiskussisalduse muutumise vaatlemiseks kuivatati välja kolm erineva suurusega poorbetoonkuubikut. Katsetatavaks poorbetooniks valiti Bauroc Classic poorbetoonplokk (kuivtihedus 425±30 kg/m^3). Poorbetoonplokid olid peale tehasest väljasaatmist seisnud kilega kaetuna ehituspoe laos kaubaaluse peal. Laborisse jõudes lõigati ehitusplokist välja katsekeha nr 1, määrati niiskussisaldus ning jäeti laboritingimustel kuivama. Katsekeha aeglase väljakuivamise tõttu lisati hiljem katsesse kaks väiksemat katsekeha nr 2 ja 3. Uute katsekehade valmistamiseks

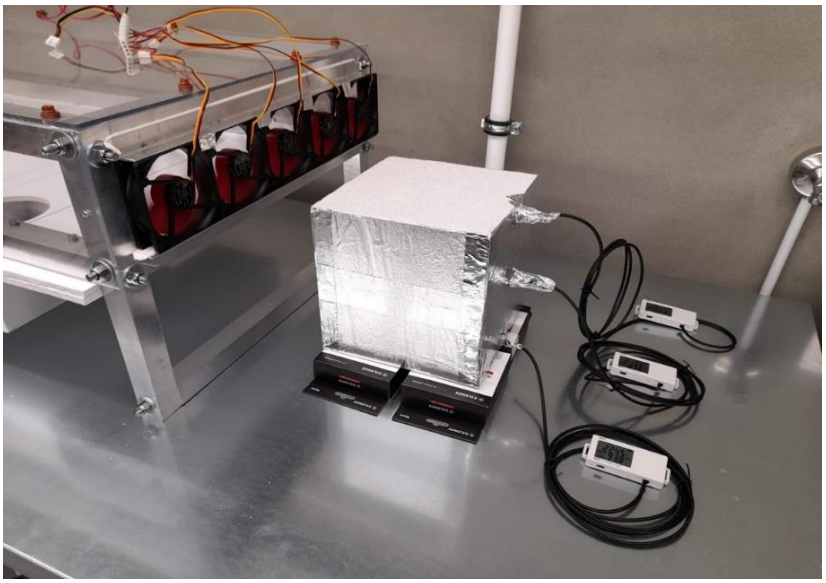
kasutati teisest partiist pärinevat poorbetoonplokki, mis erines ka niiskussisalduse poolest. Katsekehade niiskussisaldused arvutati esialgselt tootja deklareeritud kuivtiheduse järgi, mida hiljem korrigeeriti katseliselt saadud väärtusega.

Tabel 5. Katsetes kasutatud poorbetooni Bauroc Classic olulisemad andmed (bauroc Eesti, 2017b).

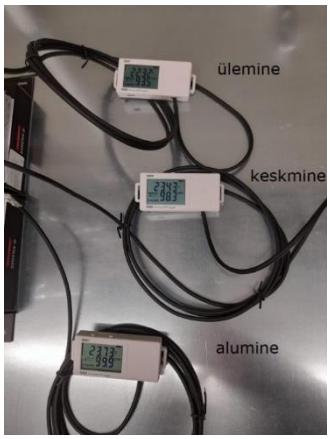
Kuivtihedus	425 ± 30 kg/m^3
Normaliseeritud survetugevus	3,0 MPa
Soojuserijuhtivus	0,11 W/(m·K)
Veeauru difusioonitegur (kuiv/märg)	5 / 10
Külmakindlus	35 tsüklit

Kuubikud kuivasid välja katselaboratooriumi ruumis, kus hoiti võimalikult ühtlast temperatuuri ja suhtelist niiskust. Katsekehade lähedusse paigutatud anduri järgi oli labori keskmine õhutemperatuur 23°C ja suhteline niiskus 43%. Pinnatakistuse vähendamiseks paigutati kuubikud ventilaatorite lähedusse ja kuubikute pinnal mõõdeti õhuvoolu kiiruseks 1,8 m/s.

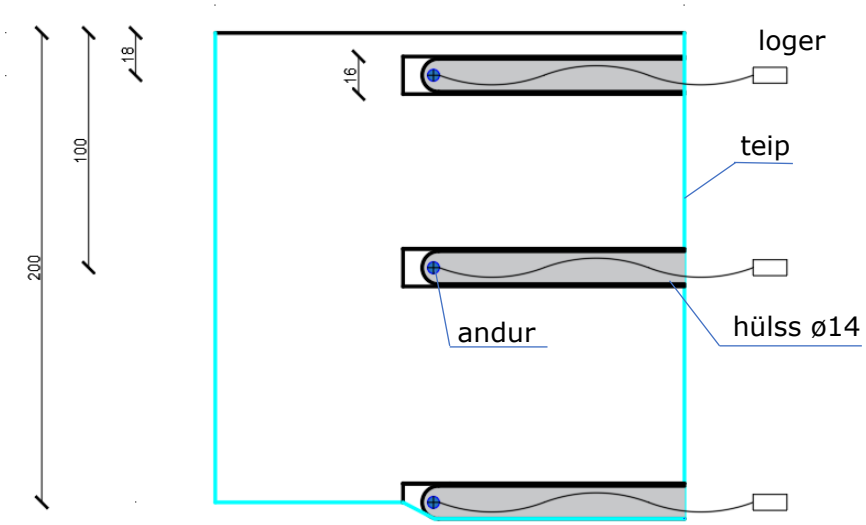
Katsekeha 1 oli mõõtmetega 199 x 199 x 200 mm ja selle algne niiskussisaldus katseliselt leitud kuivtiheduse järgi oli 35%. Kuubik ümbritseti viiest küljest alumiiniumteibiga Advance, et tagada ühemõõtmeline väljakuivamine. Oluline oli äärmiselt hoolikas teipimine, tagada 5 külje veeaurutihedus. Kuubiku sisse paigaldati kolm temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurit Rotronic. Andurite näidud salvestati 5-minutilise ajalise sammuga Hobo UX 100-023A andmelogeritega. Andurid paigaldati kuubiku ülemise pinna, keskosa ja alumise pinna lähedale, et vaadelda niiskuse jaotumist katsekehas. Andurite paiknemine on näidatud joonisel 14. Poorbetooni niiskussisaldust jälgiti katsekeha pideva kaalumise teel. Kaalunäitude ja ruumala kaudu avaldati katsekeha tihedus ajas. Peale poorbetooni kuivtiheduse täpsustamist katsekeha nr 4 abil arvutati kuiva katsekeha kaal. Tegelike kaalunäitude ja kuiva katsekeha kaalu järgi arvutati niiskussisaldused. Katsekehasid kaaluti koos teibikihi ja anduritega. Teibid ja andurid kaaluti katse lõpus eraldi ning lahutati kaalunäitudest maha.



Joonis 12. Viiest küljest alumiiniumteibiga ümbritsetud katsekeha 1 väljakuivamine.

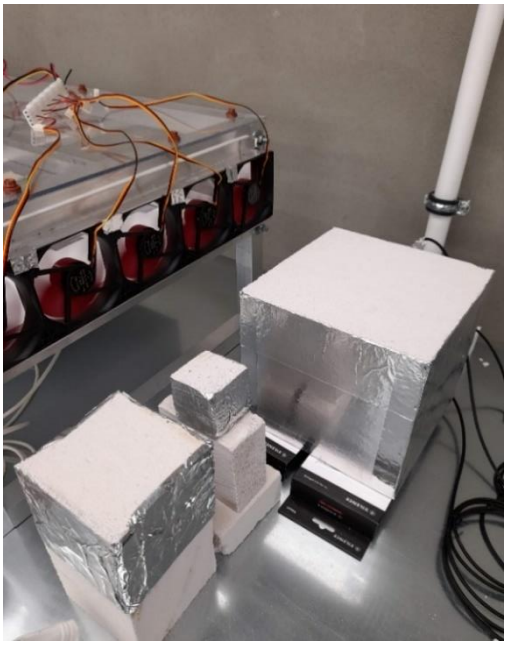


Joonis 13. Poorbetoonkeha temperatuuri ja suhtelise niiskuse kolm andurit.



Joonis 14. Andurite paiknemine katsekehas 1.

Katsekeha 2 mõõtmed olid ligikaudu 102 x 100 x 100 mm ja katsekeha 3 mõõtmed 51 x 51 x 50 mm. Laborisse jõudnud katsekehade 2 ja 3 niiskussisaldused oli vastavalt 38,7% ja 39,5%. Kuigi katsekehad 2 ja 3 olid välja lõigatud samast poorbetoonplokist, võib niiskussisalduse väike erinevus olla tingitud ebaühtlasest niiskuse jaotumisest poorbetoonplokis ja ka mõõtmistäpsusest. Et katse käiku kiirendada, kuivatati kõrge niiskussisaldusega katsekehasid nr. 2 ja 3 esmalt kolme tunni jooksul 50°C temperatuuriga ahjus. Seejärel oli katsekeha 2 niiskussisaldus 31% ja katsekeha 3 niiskussisaldus 21%. Mõlemad katsekehad ümbritseti viiest küljest alumiiniumteibiga ja alustati väljakuivamise katsega. Katsetulemused saadi katsekehasid igapäevaselt kaaludes.



Joonis 15. Katsekeha 2 ja katsekeha 3.

Katsekehade niiskussisalduse arvutamiseks määrati poorbetooni kuivtihedus. Poorbetoonplokist saeti 199 x 199 x 199 mm suurune kuubik (katsekeha 4) ning pandi 50°C temperatuuriga ahju kuivama. Poorbetoonist katsekeha kaaluti, kuni selle kaal stabiliseerus. Määrati katsekeha ruumala ja saadud kuivtiheduse väärtust kasutati kõikide katsekehade niiskussisalduse arvutamiseks.

Katsetatava poorbetooni maksimaalse niiskussisalduse määramiseks paigutati kaks katsekeha vette. Katsekeha nr 5 oli suurusega 199 x 199 x 100 mm ning uputati üleni vette. Katsekeha 6 oli suurusega 178 x 73 x 183 mm ja pandi veega kontakti vaid ühest, kõige suurema pindalaga küljest. Vees hoiti katsekeha 0...1,5 cm sügavusel. Katsekeha nr 6 oli toetatud katsekeha nr 5 peale. Veemahuti suurus oli 55 l. Katsekehasid kaaluti regulaarselt, et leida nende maksimaalset niiskussisaldust.

Katsekeha veest välja võttes lasti esmalt katsekeha pinnal oleval veel maha joosta. Seejärel pühiti katsekeha pind õrnalt kuivaks ning asetati katsekeha kaalule. Arvutustes võeti kuivtiheduse väärtuseks taas katseliselt leitud arv.

Joonis 16. Katsekehade nr 5 ja 6 vees paiknemine.

Arvutustulemustes saadud tihedus leiti valemiga

$$\rho = g / V, \ (kg/m^3) \qquad (34)$$

kus g on kaalunäit, kg

V on katsekeha ruumala, m^3

Katsekeha vee mass

$$g_w = g - g_{kuiv} \ (kg) \qquad (35)$$

kus g on kaalunäit, kg

g_{kuiv} on katseliselt määratud kuivtihedusega arvutatud kuiva katsekeha kaal, kg

Kaaluline niiskussisaldus

$$w_{kaaluline} = g_w / g_{kuiv}, \ (kg/kg) \qquad (36)$$

kus g_w on vee mass, kg

g_{kuiv} on katseliselt määratud kuivtihedusega arvutatud kuiva katsekeha kaal, kg

Mahuline niiskussisaldus

$$w_{mahuline} = w_{kaaluline} * \rho_{kuiv} / 1000, \ (m^3/m^3) \qquad (37)$$

kus $w_{kaaluline}$ on kaaluline niiskussisaldus (kg/kg)

ρ_{kuiv} on katseliselt määratud kuivtihedus

1000 on vee tihedus, kg/m^3

Tabel 6. Katsete kestus.

	Algus	Lõpp	Kestus	Keskkond
Katsekeha 1	07.04.2021	15.07.2021	99 p	t = 23°C ja RH = 43%
Katsekeha 2	16.05.2021	15.07.2021	60 p	t = 23°C ja RH = 43%
Katsekeha 3	16.05.2021	15.07.2021	60 p	t = 23°C ja RH = 43%
Katsekeha 4	13.04.2021	14.06.2021	62 p	Ahi 50°C
Katsekeha 5	12.04.2021	15.07.2021	94 p	Üleni vette uputatud
Katsekeha 6	15.04.2021	15.07.2021	91 p	Suurema küljega vees

2.2.2 Mõõtevahendid

Katseandmete monitoorimiseks paigutati poorbetooni puuritud aukudesse kolm Hobo UX 100-023A andurit (mõõtetäpsus T = ±0,21°C; RH = ±2,5%). Augud puuriti 16 mm diameetriga ning andurid paigutati 14 mm diameetriga plastikhülsi sisse. Andurite paiknemine katsekehas on näha joonisel 15. Katsekehade kõrval mõõtis õhutemperatuuri ja niiskust Hobo UX 100-011 andur (mõõtetäpsus T = ±0,21°C; RH = ±2,5%). Hobo andurite mõõtmisintervalliks on 5 minutit. Õhu liikumiskiirus mõõdeti Airflow TA440 seadme abil, mõõtetäpsus ± 3%. Poorbetoonkehad kaaluti Kern PLJ kaalu abil (mõõtetäpsus 0,1 g). Katsekeha tahukaid mõõdeti digitaalse nihikuga kolmest erinevast kohast ja leiti keskmised külgede mõõdud ning ruumala. Katsekehade mõõdud leiti nihiku Mahr GmbH – Esslingen 16EWRi 300 mm abil, mõõtmistäpsus 0,01 mm.

3 TULEMUSED JA TULEMUSTE HINDAMINE

3.1 Külmasildade arvutusanalüüs tarkvaras Therm

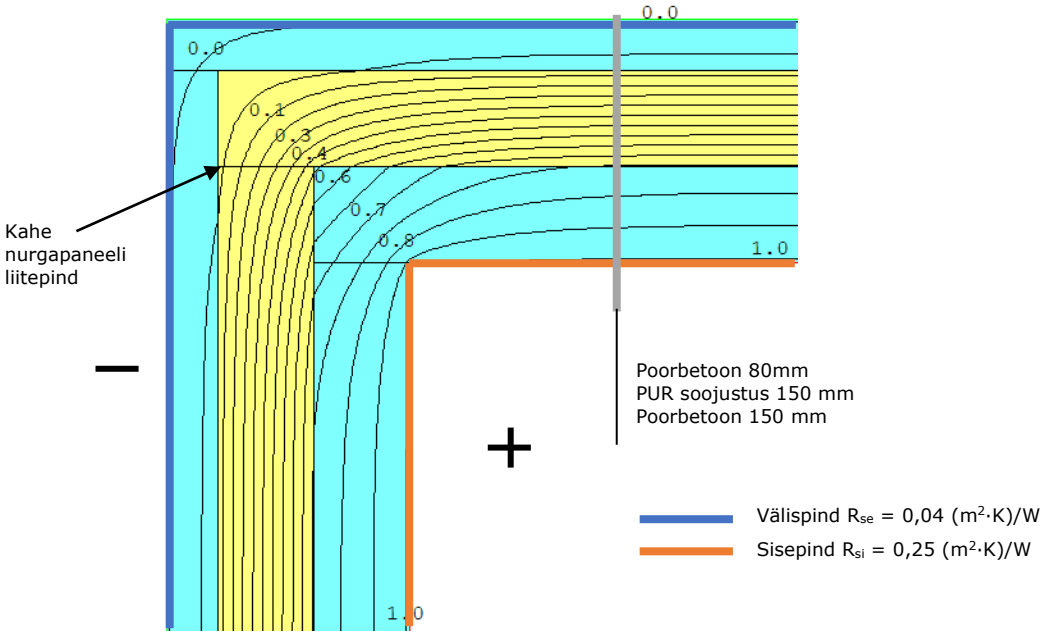
Joonkülmasilla väärtuste määramiseks arvutatud piirdetarindite soojusläbivused U, W/(m²·K) on toodud tabelis 7. Nii soojusläbivused kui kõikide sõlmede temperatuuriindeksite ja külmasildade arvutused on teostatud kahe erineva soojuserijuhtivusega poorbetooni versiooniga λ = 0,1 W/(m·K) ja λ = 0,13 W/(m·K), sest 1D poorbetoonpaneeli simulatsioonide koostamisel programmis Delphin on kasutatud programmi kataloogis olevat poorbetooni, mille soojuserijuhtivus λ on 0,1 W/(m·K), kuid kandevõime seisukohalt on seinapaneelis vajalik kasutada esialgse hinnangu järgi poorbetooni tihedusega umbes 500 kg/m³, mille soojuserijuhtivus λ on 0,13 W/(m·K). Sõlmelahenduste arhitektuursed joonised on esitatud uurimistöö lisas.

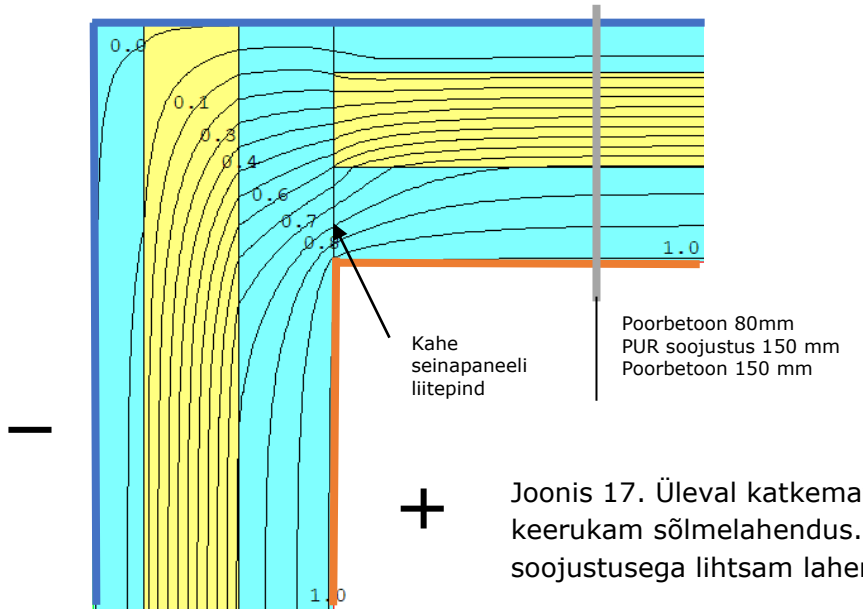
Tabel 7. Piirdetarindite soojusläbivused.

Piirdetarind	Piirdetarindi kihid	Soojusläbivus U, W/(m²·K)
Poorbetoonpaneel 1 (tihedus 415 kg/m³)	Välispind R_{se} = 0,04 (m²·K)/W Poorbetoon λ = 0,10 W/(m·K) 80mm PUR soojustus λ = 0,029 W/(m·K) 150 mm Poorbetoon λ = 0,10 W/(m·K) 150 mm Sisepind R_{si} = 0,13 (m²·K)/W	0,13
Poorbetoonpaneel 2 (tihedus 500 kg/m³)	Välispind R_{se} = 0,04 (m²·K)/W Poorbetoon λ = 0,13 W/(m·K) 80 mm PUR soojustus λ = 0,029 W/(m·K) 150 mm Poorbetoon λ = 0,13 W/(m·K) 150 mm Sisepind R_{si} = 0,13 (m²·K)/W	0,14
Põrand pinnasel	Välispind R_{se} = 0,04 (m²·K)/W Pinnas λ = 2,0 W/(m·K) Vahtpolüstüreen EPS λ = 0,040 W/(m·K) 250 mm Betoon λ = 2,3 W/(m·K) 80 mm Sisepind R_{si} = 0,17 (m²·K)/W	0,12
Lamekatus poorbetoonist laepaneelidega	Välispind R_{se} = 0,04 (m²·K)/W Mineraalvill λ = 0,036 W/(m·K) Vahtpolüstüreen EPS λ = 0,040 W/(m·K) 270 mm Kiudbetoon λ = 2,3 W/(m·K) 50 mm Poorbetoon λ = 0,21 W/(m·K) 250 mm (laepaneel 800 kg/m³ poorbetoonist) Sisepind R_{si} = 0,10 (m²·K)/W	0,11
Kaldkatus poorbetoonist laepaneelidega	Välispind R_{se} = 0,04 (m²·K)/W Tuuletõkkeplaat λ = 0,035 W/(m·K) 15 mm Mineraalvill λ = 0,036 W/(m·K) 200 mm Puit λ = 0,13 W/(m·K) 200 mm Poorbetoon λ = 0,21 W/(m·K) 200 mm (laepaneel 800 kg/m³ poorbetoonist) Sisepind R_{si} = 0,10 (m²·K)/W	0,34

3.1.1 Välisseina nurk

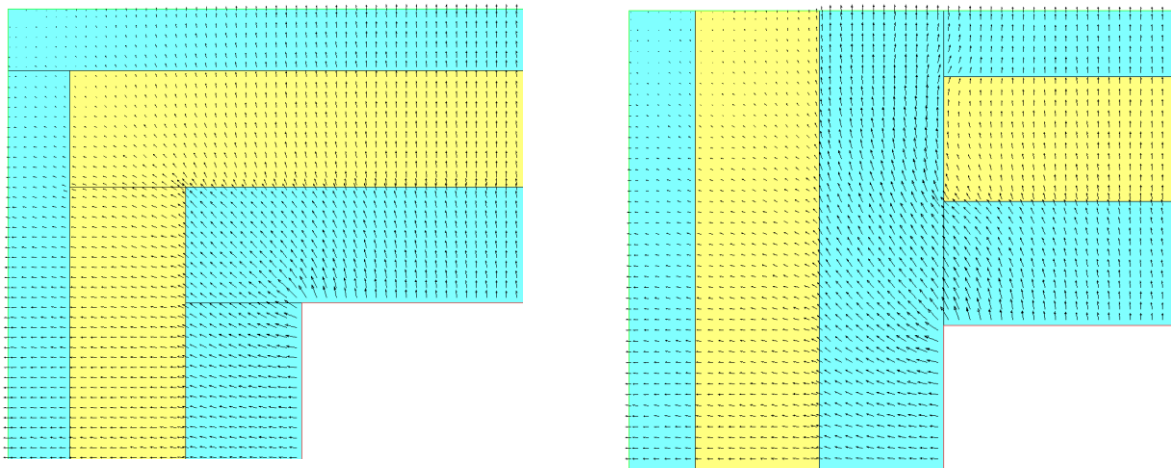
Nurgasõlme lahendus, kus kahe paneeli soojustus viiakse omavahel kokku, tähendab hoone iga nurga jaoks kahe erikujulise paneeli tootmist. Nurgapaneelide kõik kihid on erinevate mõõtmetega, mis muudab tootmistehnoloogia, transpordi ja montaaži oluliselt keerukamaks, kuid minimeerib võimalike soojakadude ohtu. Nurgapaneeli täpsem kuju ja mõõtmed on toodud lisas joonisel „Nurgasõlm variant 1". Lihtsam variant on viia kaks ühesugust seinapaneeli kokku, katkestades soojustusekihi. Selle lahenduse puhul on sõltuvalt paneelide paigalduskvaliteedist risk veelekkeks või suuremaks soojakaoks. Samas püsib selline oht kõikide paneelide liitekohtades. Joonis 17 annab ülevaate kahest võimalikust nurgasõlme lahendusest koos isotermidega. Isotermid näitavad piltlikult seda, et kui ühel tarindi poolel oleks 0°C ja teisel 1°C, siis milline oleks temperatuuride jaotus tarindi kihtides. Ühtlasi kirjeldab see temperatuuriindeksit.





Joonis 17. Üleval katkematu soojustusega keerukam sõlmelahendus. All katkeva soojustusega lihtsam lahendus.

Joonisel 17 on näha, et kui ülemisel nurgalahendusel jooksevad isotermid sujuvalt, siis alumisel tekib selgelt külmem ala soojustuse katkemiskohas. Ka soojusvoo vektoritelt joonisel 18 on näha, kuidas nurgapunktis tekib vektorite koondumine, sest PUR kihti on soojusel oluliselt raskem läbida kui poorbetooni. Parempoolsel lahendusel on aga vektoritel otsetee väliskeskkonda.



Joonis 18. Kahe sõlmelahenduse soojusvoo vektorid.

Tabel 8 annab ülevaate kahe erineva poorbetooniga arvutatud temepratuuriindeksitest ja külmasilla joonsoojusläbivustest.

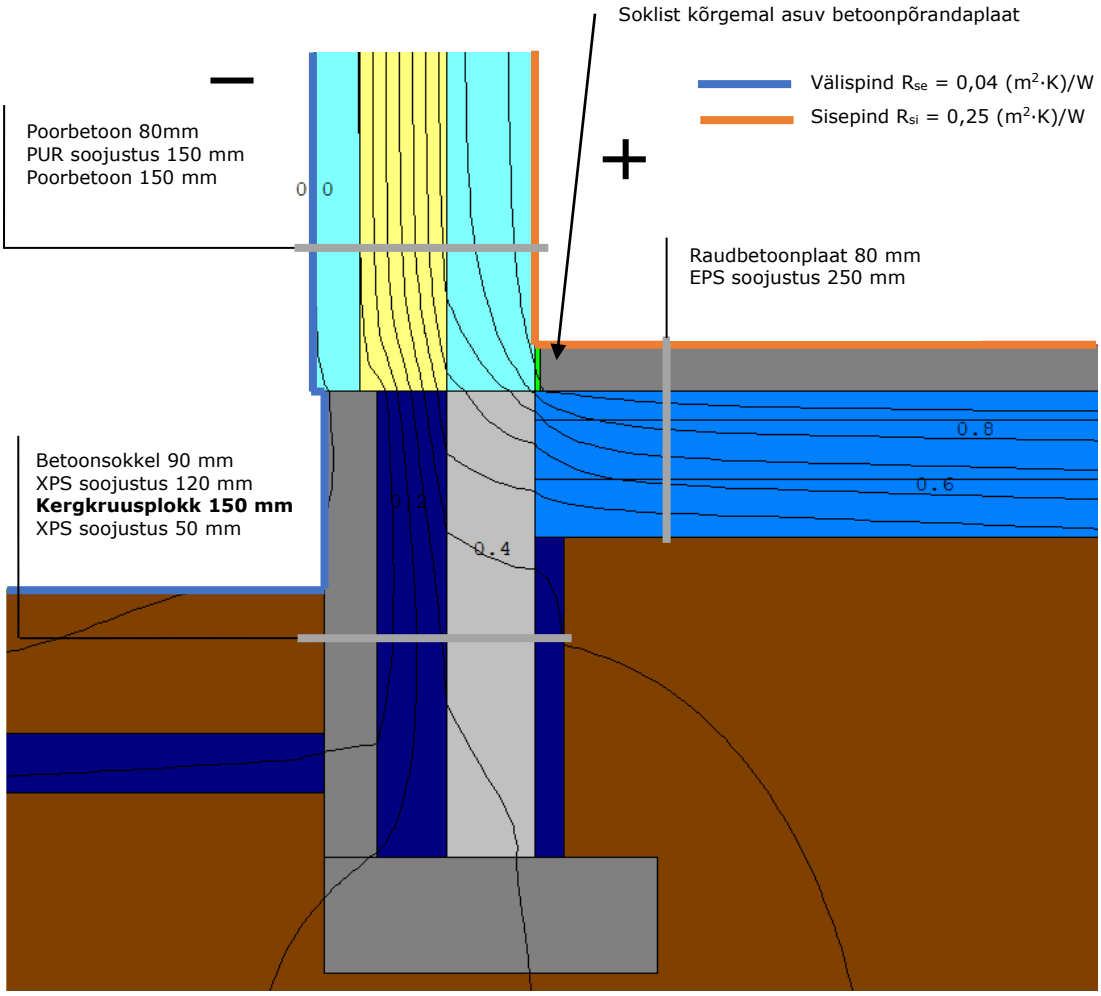
Tabel 8. Nurgasõlme temperatuuriindeksid ja joonkülmasilla soojusjuhtivused.

	Katkematu soojustusega lahendus (vasakpoolne)		Katkestatud soojustusega lahendus (parempoolne)	
	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)
Temperatuuri-indeks *f*Rsi	0,90	0,90	0,88	0,87
Külmasilla joonsoojusläbivus ψ W/(m·K)	0,04	0,04	0,05	0,06

Tabeli 8 tulemuste põhjal selgub, et temperatuuriindeksid on kõikide lahenduste puhul üle 0,8. Lisaks tehti arvutus läbi ka väga kõrge niiskussisaldusega poorbetooniga, mille λ = 0,25 W/(m·K). Temperatuuriindeks oli sel juhul 0,85 ehk endiselt tavapärase niiskuskoormusega hoone puhul lubatu piires. Katkeva soojustusega lahendus tõstab külmasilla joonsoojusläbivuse väärtust väga vähesel määral ja endiselt on temperatuuriindeks lubatu piires.

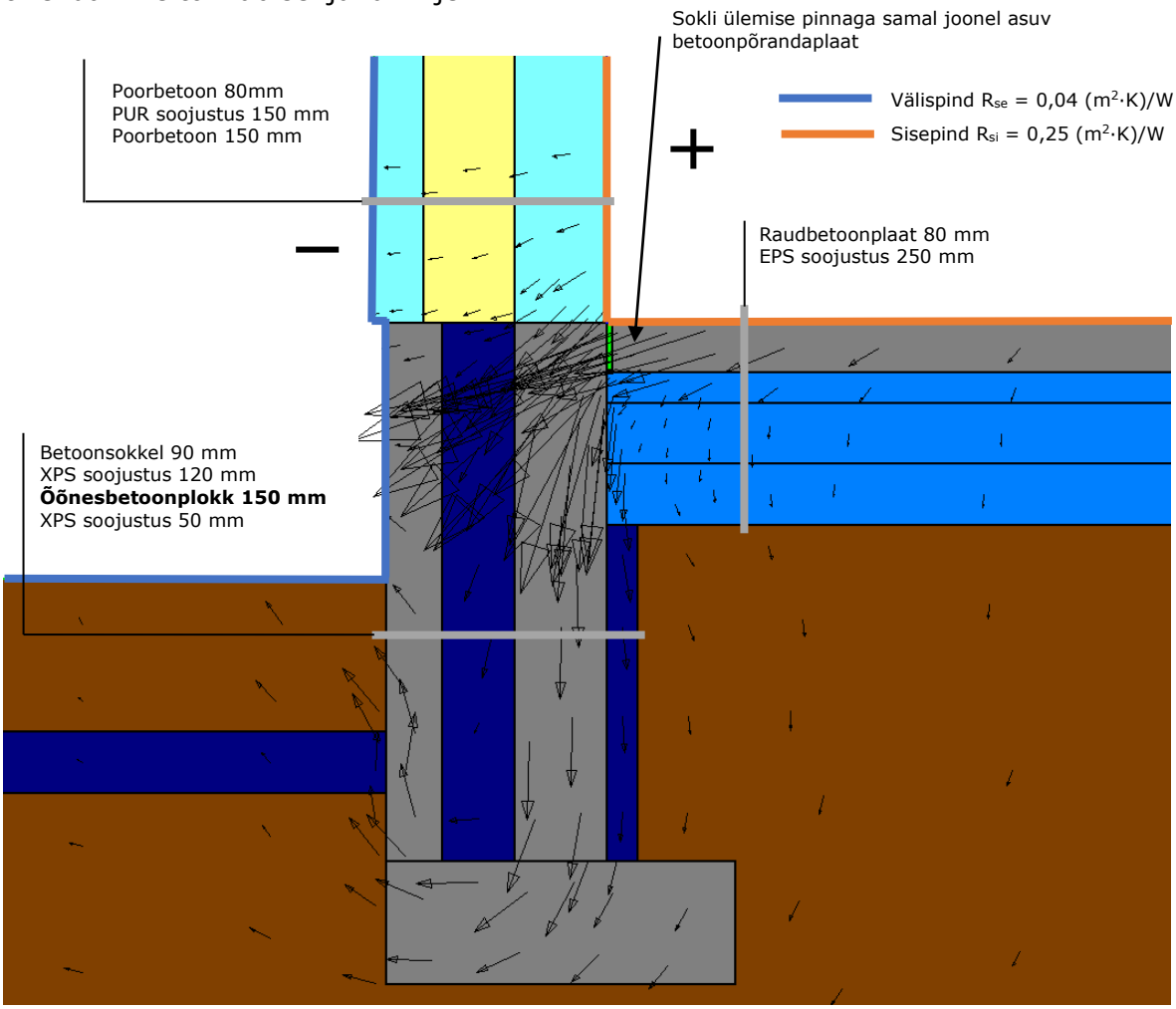
3.1.2 Põranda ja välisseina liitekoht

Neljakorruselise korterelamu puhul on kõige tõenäolisem hoone projekteerida lintvundamendile. Tulenevalt asjaolust, et poorbetooni pinnasega kokkupuutuvates konstruktsioonides kasutada ei tohi, saab soklimüürina kasutada kergkruusplokke parema soojustakistuse pärast või täisvalatud õõnesbetoonplokke suurema kandevõime saavutamiseks. Eeldatavasti on poorbetoonist seinapaneeli normatiivne survetugevus ca 5 MPa ning sama väärtusega toodetakse ka kergkruusplokke. Seega, kui 5 MPa poorbetoon on esimese korruse soklimüüri kohal kandevõime poolest sobilik, peaks ka kergkruusplokk soklimüüritises sobima. Sokli vastupidavuse suurendamiseks on väljatöötatud sõlmes välise kihina kasutatud betoonsoklit ning soojustusena ekstrudeeritud polüstüreeni XPS. Esteetiliselt parema hoone välimuse saavutamiseks on poorbetoonpaneeli välimine koorik betoonsoklist väljapoole ulatuv. Seetõttu seab poorbetoonpaneeli paksus piirangu ka sokli paksusele ja sokli soojustuskihti suurendada ei saa. Sokli sõlme lahendus on esitatud joonisel 19.



Joonis 19. Sokli sõlm. Põranda betoonplaadi ülemine piir on soklimüüri ülemisest piirist kõrgemal. Soklimüürina on kasutatud kergkruusplokki.

Põranda betoonplaadi projekteerimine sokli ülemisest piirist kõrgemale võib olla vajalik radoonitõkkekile paigalduseks. Joonisel 20 on toodud lisaks lahendus, kus betoonplaadi ülemine pind on samal tasemel soklimüüri ülemise pinnaga. Sellise lahenduse korral on võimalik hoone põrandad valmis ehitada enne poorbetoonist seinapaneelide paigaldust. Joonisel 19 toodud lahenduse korral on aga vajalik põranda betoneerimiseks kasutada ajutist lisaraketist põranda perimeetril. Elastse vuugi tihendamine toimub sel juhul hiljem.



Joonis 20. Sokli sõlm. Põranda betoonplaadi ülemine piir on soklimüüriga samal joonel. Soklimüürina on kasutatud täisvalatud õõnesbetoonplokki.

Joonisel 19 on näha toimiv soklisõlm, kus temperatuuriindeksi 0,8 isoterm läbib isegi kergkruusplokki. Peale soklimüüri valmimist võidakse aga teatud juhtudel kohe ära betoneerida ka põranda betoonplaat ja alles siis paigaldada seinapaneelid. Joonisel 20 on näha soklimüürist madalamal asuvat betoonplaati ja õõnesbetoonplokkidest ehitatud soklimüüri läbivad soojusvoo vektorid. Tabelid 9 ja 10 annavad ülevaate kahe lahenduse temperatuuriindeksitest ja külmasilla joonsoojusläbivustest.

Tabel 9. Põranda betoonplaat soklimüürist kõrgemal

	Kergkruusplokist soklimüür		Täisvalatud õõnesbetoonplokist soklimüür	
	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)
Temperatuuri-indeks f_{Rsi}	0,92	0,91	0,86	0,85
Külmasilla joonsoojusläbivus ψ W/(m·K)	0,05	0,06	0,12	0,13

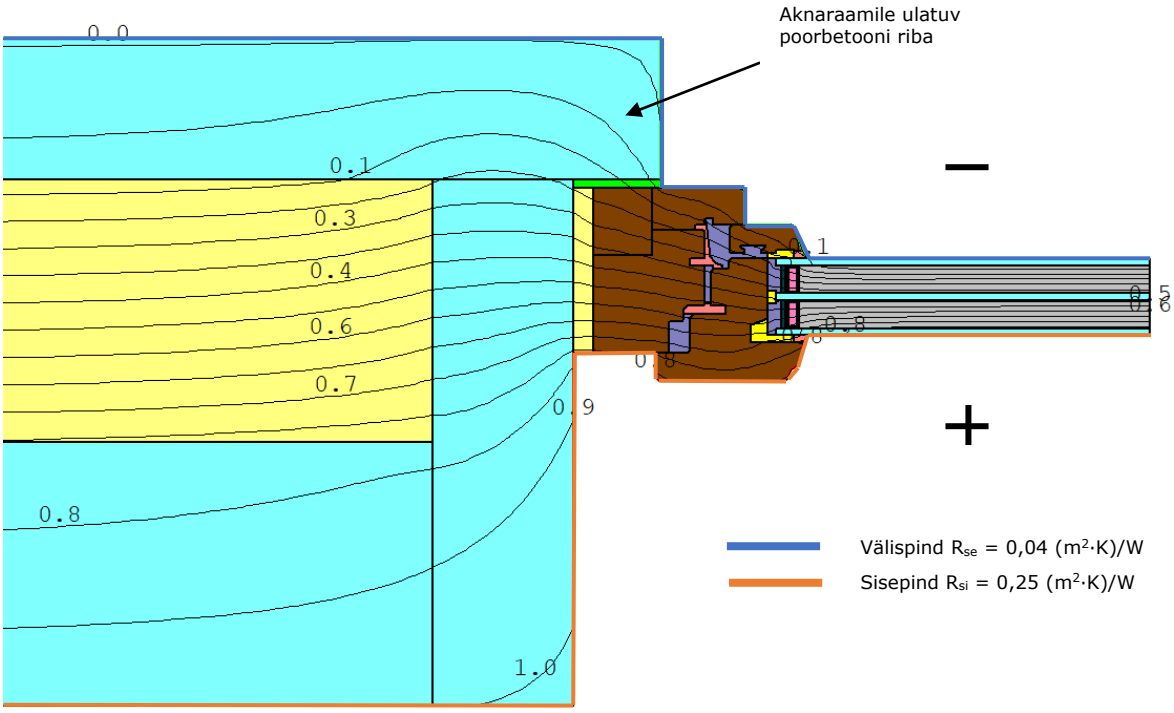
Tabel 10. Põranda betoonplaadi ülemine piir sokli müüri ülemise piiriga samal kõrgusel.

	Kergkruusplokist soklimüür		Täisvalatud õõnesbetoonplokist soklimüür	
	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)
Temperatuuri-indeks f_{Rsi}	0,89	0,89	**0,68**	**0,69**
Külmasilla joonsoojusläbivus ψ W/(m·K)	0,08	0,08	0,22	0,22

Kui põrandaplaat asub soklimüürist kõrgemal ja soklimüüris kasutada kergkruusplokke, on temperatuuriindeksid väga head, kondenseerumise ega hallituse ohtu ei ole ning külmasillad on väga madalad. Ka täisvalatud õõnesbetoonploki korral on tulemused positiivsed ning külmasilla joonsoojusläbivused endiselt madalad. Õõnesbetoonploki kasutamine tõstab joonsoojusläbivuse väärtust 2-3 korda. Poorbetooni soojuserijuhtivuse muutmine muudab joonsoojusläbivuse väärtust tühisel määral ehk kuni 0,01 W/(m·K). Kui põrandaplaat asub soklimüüri pealmise pinnaga samal joonel, on kergkruusplokkidest müüritisega sõlm endiselt väga hästi toimiv. Toimiv ei ole aga sõlm siis, kui asendada müüritis armeeritud täisbetooniga. Temperatuuriindeksid jäävad siis tugevalt alla lubatud piiri, kuigi joonsoojusläbivuse väärtused on suhteliselt rahuldavad.

3.1.3 Akna ja välisseina liitekoht

Akna ja poorbetoonist seinapaneeli liitekohana pakutakse välja lahendus, kus sisemine aknaleng paigaldatakse poorbetoonist. Sel juhul saab kasutada võimalikult palju ühe tootesarja ehk poorbetooni tooteid. Lahenduse puhul on energiasäästliku hoone projekteerimise põhimõtetele tuginevalt viidud poorbetoonpaneeli välimine koorik aknaraami peale. Samas on sellise lahenduse valmistamine töömahukam ning väljaulatuv osa võib montaaži ajal kergesti puruneda. Vajadusel tuleb see hiljem juurde liimida. Akende ja kinnituskoha vahele on jäetud paigaldustolerants 15 mm, mis on täidetud spetsiaalse vähepaisuva polüuretaanvahuga. Väiksem paigaldustolerants ei oleks võimalik, sest isegi montaaživahu püstoli otsik ei mahuks vahele ning montaaživahu suhteline deformatsioon oleks liiga suur. Akna mudelina on kasutatud kolmekordse klaaspaketiga puitalumiiniumakent OptiWin, mille soojusläbivus U = 0,83 W/(m²·K).



Joonis 21. Akna sõlme üks võimalik kinnitusvariant.

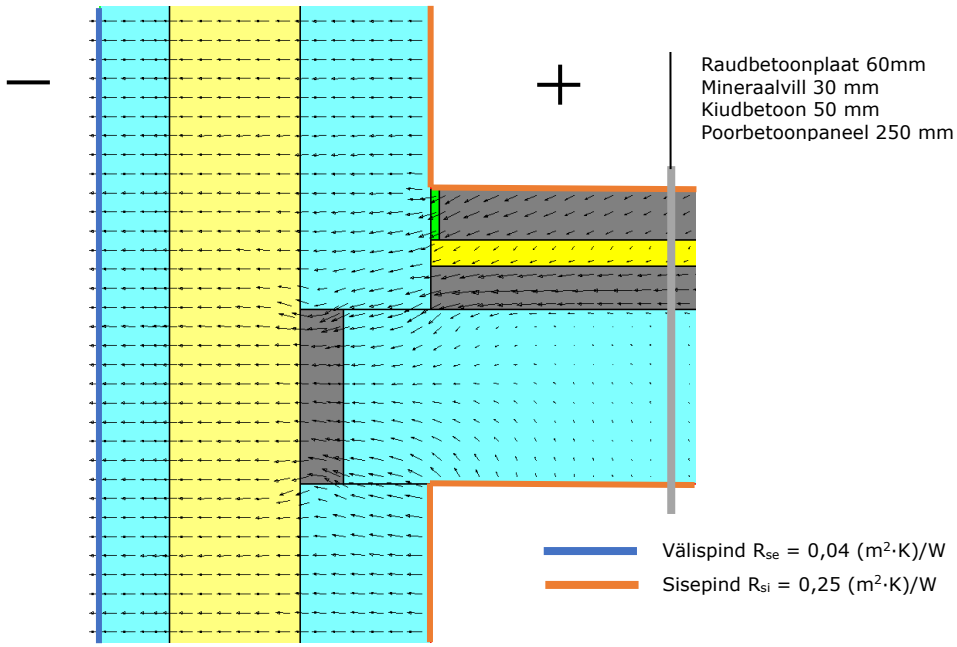
Akna sõlme temperatuuriindeksid ja külmasilla joonsoojusläbivused on toodud tabelis 11. Akna kinnituskoha temperatuuriindeksi toimivuskriteeriumiks loetakse $f_{Rsi} \geq 0{,}7$. Lahendused tagavad selle. Kõige madalamad temperatuuriindeksid esinesid aknaraami pinnal kinnituskoha lähedal.

Tabel 11. Akna kinnituskoha temperatuuriindeksid ja külmasilla joonsoojusläbivused. Tähis PB - poorbetoon.

	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)
Temperatuuriindeks f_{Rsi}	0,77	0,76
Külmasilla joonsoojusläbivus ψ W/(m·K)	0,02	0,02

3.1.4 Vahelae ja välisseina liitekoht

Vahelae kandvaks osaks on 250 mm kõrgune poorbetoonpaneel. See on paneelide pikivuukidest armeeritud poorbetoon, võimalik on ka kiudpoorbetooni kasutamine. Esialgse hinnangu järgi peab poorbetooni tihedus olema kandevõime saavutamiseks vähemalt 800 kg/m^3, millele vastab joonise 1 lk 14 järgi soojuserijuhtivus 0,21 W/(m·K). Joonkülmasillale see märkimisväärset mõju ei avalda. Paindekandevõime tagamiseks on lisatud survetsooni veel täiendavalt 50 mm kiudbetooni kiht. Selle peal on 30 mm mineraalvillaplaat sammumüra summutamiseks. Soovituslik on sammumüra plaat paigaldada kahes kihis nii, et pealmine plaat katab ära paneelide peal olevad tehnosüsteemid. Kõige peal 60 mm tasandusbetoon. Poorbetoonpaneelide vaheliste pikiarmatuurvarraste ning ringsarruse ankurdamiseks on paneeli otsas seina osas betoon. Sõlmelahendus on joonisel 22.



Joonis 22. Vahelae ja välisseina sõlme soojusvoo vektorid.

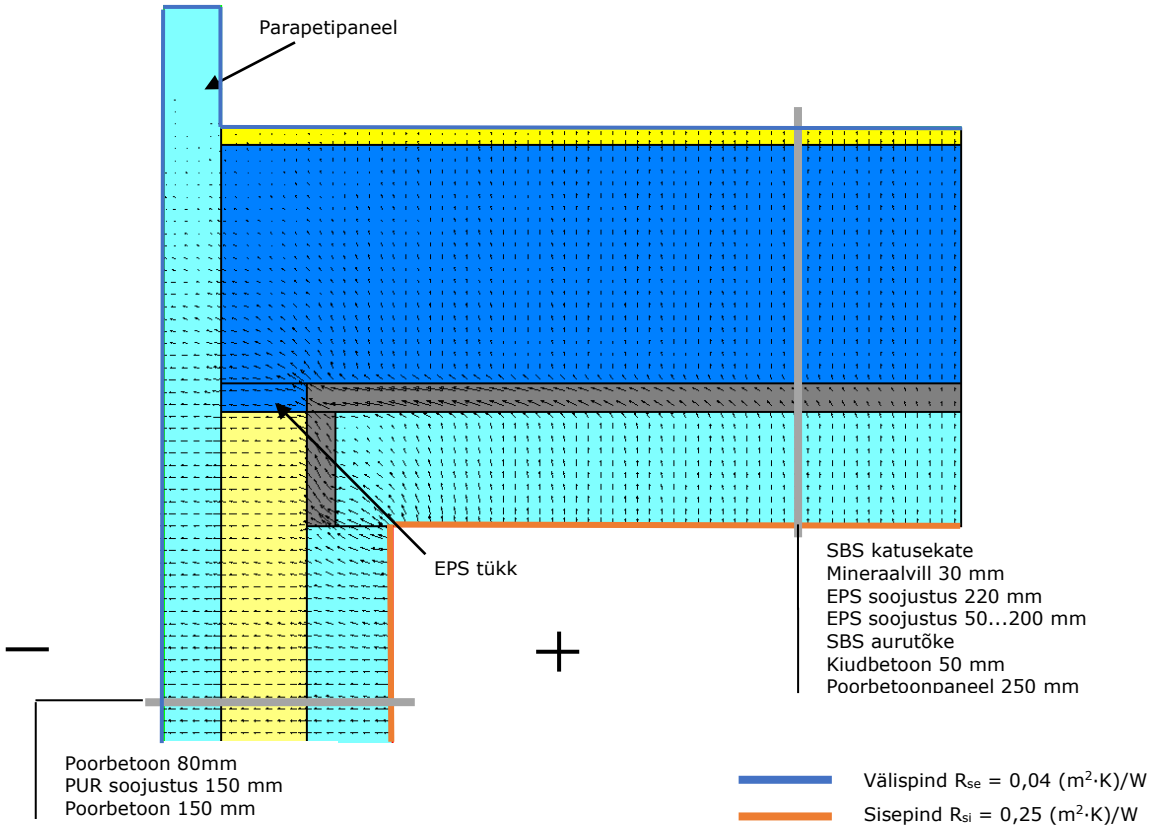
Tabel 12 esitab vahelae külmasilla arvutustulemused. Temperatuuriindeksid on piisavalt kõrged.

Tabel 12. Vahelae ja välisseina sõlme temperatuuriindeksid ja külmasilla joonsoojusläbivused

	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)
Temperatuuriindeks f_{Rsi}	põrandanurgas 0,96 laenurgas 0,95	põrandanurgas 0,95 laenurgas 0,95
Külmasilla joonsoojusläbivus ψ W/(m·K)	0,01	0,01

3.1.5 Lamekatuse ja välisseina liitekoht

Lamekatuse katuslae kandva osa moodustamiseks on kasutatud 250 mm kõrgust poorbetoonpaneeli komposiidina 50 mm kiudbetooniga. Soojustusena kasutatakse kaldega vahtpolüstüreenplaati EPS paksusega 50...200, selle peal EPS plaati paksusega 220 mm ning siis 30 mm paksune tuulutussoontega mineraalvillaplaat. Parapeti moodustamiseks on ühekihiline 80 mm paksune poorbetoonpaneel, eeldusel, et selle katuse pinnast kõrgemale ulatuv osa on piisavalt vastupidav tuulekoormusele. Lahenduse joonis on 23.



Joonis 23. Lamekatuse sõlm.

Tabelis 13 on toodud katuslae ja välisseina liitekoha külmasilla arvutustulemused. Sõlm on hästitoimiv. Sõlme külmasilla joonsoojusläbivuse vähendamiseks lisati EPS

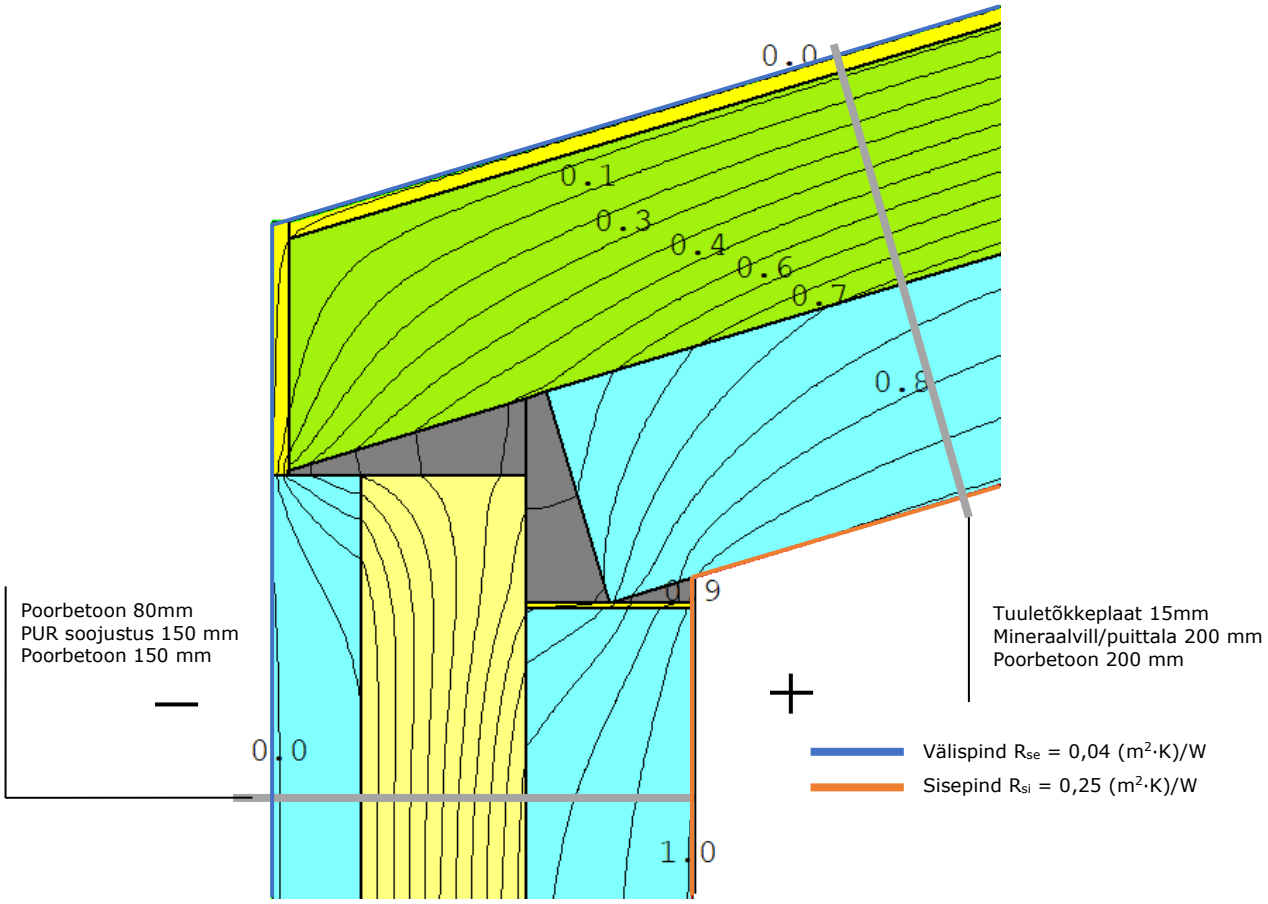
tükk kiudbetooni kihi ja seina väliskooriku vahele. Kui valada kiudbetoon väliskoorikuni ilma külmasilla katkestita, oleks temperatuuriindeks 0,88.

Tabel 13. Lamekatuse katuslae temperatuuriindeksid ja külmasilla joonsoojusläbivused.

	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)
Temperatuuriindeks f_{Rsi}	0,91	0,91
Külmasilla joonsoojusläbivus ψ W/(m·K)	0,02	0,03

3.1.6 Kaldkatuse ja välisseina liitekoht

Kaldkatuse moodustamiseks on asetatud poorbetoonist laepaneelid piki hoonet nii, et paneelide otsad toetuvad hoone põikikandeseintele. Plekk- või kivikatusekatte kinnitamiseks on poorbetoonpaneelide peal 200 mm kõrgused puitprussid, mis ulatuvad seinapaneelist väljapoole ja moodustavad räästa. Prusside vahele on paigaldatud mineraalvill ja peale (või vahele olenevalt villa survetugevusest) mineraalvillast tuuletõkkeplaat. Poorbetoonist laepaneeli ja seinapaneeli vahele on lisatud mineraalvilla riba. Sõlmelahendus on joonisel 24.



Joonis 24. Kaldkatuse liitumine välisseinaga.

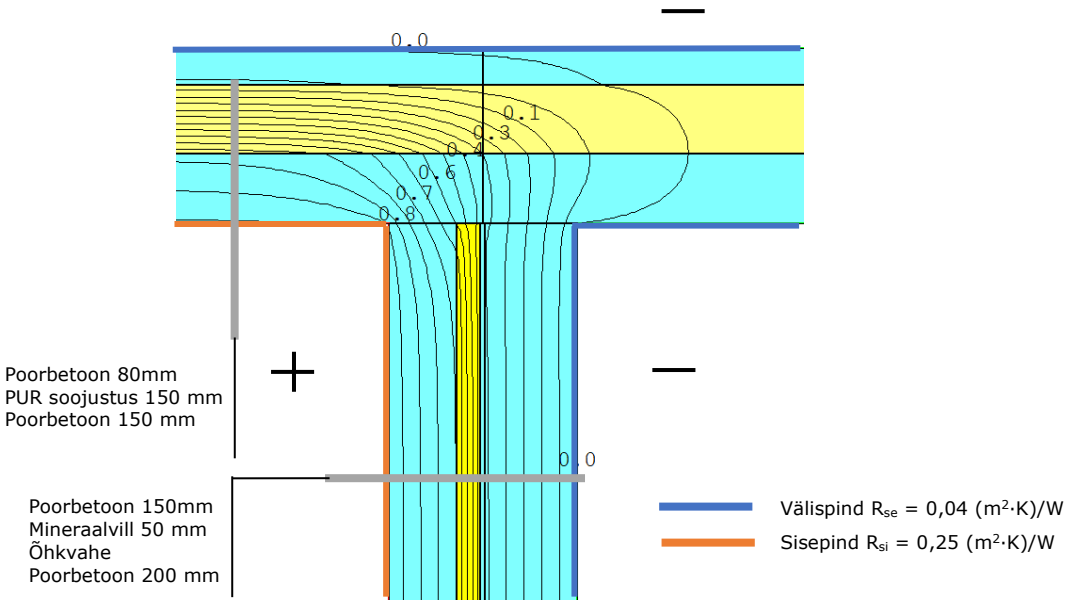
Tabelis 14 on arvutustulemused. Kaldkatuse sõlmelahendus on temperatuuriindeksi poolest toimiv. Mittehomogeense kihi (puit ja mineraalvill) soojuserijuhtivusena on kasutatud väärtust λ = 0,043 W/(m·K). Katuslae soojusläbivus on sellise lahenduse korral U = 0,18 W/(m²·K). Poorbetoonist laepaneelide paigaldamiseks võib vajalik olla paneelide armeerimine ja betoonseguga monolitiseerimine külgedelt, mis tekitab täiendava külmasilla. Siiski jääb lahendus napilt lubatud temperatuuriindeksi vahemikku. Kui osa betoonsegust asendada montaaživahu või puistevillaga (seinapaneeli väliskooriku ja PUR soojustuse peal), paraneksid näitajad veelgi.

Tabel 14. Kaldkatuse katuslae temperatuuriindeksid ja külmasilla joonsoojusläbivused.

	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)
Temperatuuriindeks *f*Rsi	0,84	0,84
Külmasilla joonsoojusläbivus ψ W/(m·K)	0,04	0,05

3.1.7 Sise- ja välisseina liitekoht

Korterite vahelise seina peamine keerukus seisneb helipidavuse saavutamises õhumüraisolatsiooni tasemele $R'_w \geq 55$ dB. Esmase hinnangu põhjal ei saavuta seda poorbetooniga ning vaja on lisada voodersein. Joonisel 28 on näidatud kahe poorbetoonist seinapaneeli vaheline 50 mm paksune mineraalvilla isolatsioon, mis on paneeli peale liimitud. Kui sellist kihti ei ole paneelide montaaži ajal võimalik paigaldada, tuleks ühele poole sisepinnale ehitada 66 mm laiuse karkassiga ja mineraalvillaga täidetud kipskarkass-sein. Oluline on välisseina kandvate seinte vahelisel alal arvestada ka deformatsioonivuugiga.



Joonis 25. Sise- ja välisseina sõlm.

Külmasilla analüüs on vaadeldavas sõlmes tehtud juhuks, kui kahest poorbetoonpaneelist ja mineraalvillast koosneva siseseina ühele poole satub kütmata või madala temperatuuriseadega ruum. Selline olukord võib hoones tekkida näiteks juhul, kui sein eraldab korterit ja trepikoda või panipaika. Sellise seina soojusläbivus U = 0,22 W/(m^2·K), mis on sobilik ka välispiirdetarindiks. Arvutustulemused on esitatud tabelis 15. Sõlm on sellisel juhul toimiv ja joonsoojusläbivused 0,01 W/(m·K).

Tabel 15. Sise- ja välisseina liitumise temperatuuriindeksid ja külmasilla joonsoojusläbivused

	Poorbetoon 1 λ = 0,10 W/(m·K)	Poorbetoon 2 λ = 0,13 W/(m·K)
Temperatuuriindeks f_{Rsi}	0,90	0,89
Külmasilla joonsoojusläbivus ψ W/(m·K)	0,01	0,01

3.1.8 Deformatsioonivuugid välisseinas

Välisseina ja siseseina sõlme projekteerimisel tuleks ette näha ka kandva või korteritevahelise seina juurde deformatsioonivuuk. Deformatsioonivuukide määramine sõltub igast konkreetsest hoonest eraldi ja toimub projeteerimise käigus. Uurimistöös projekteeritud sõlmelahenduse (lisas) „Välisseina ja siseseina sõlm" deformatsioonivuugi suurusest esialgse ülevaate saamiseks tehti lihtsustatud arvutused. Paneelide tõenäoline kasutuskoht on korterelamu ning ühe korteri välisseina pikkuseks arvestati kuni 10 m. Asjaolud, et iga paneeli vaheline liimikiht ja sisekooriku ning väliskooriku vaheline PUR soojustusekiht võimaldavad täiendavalt deformatsioonimuutusi, jäeti lihtsustatud arvutuses käsitlemata. Temperatuurist tingitud mahumuutuste arvutamisel tuleb kasutada temperatuuripaisumise koefitsenti $8 \cdot 10^{-6}$ / K. (bauroc Eesti, 2017a). Simulatsioonide järgi oli madalaim temperatuur välispinnal -23°C. Sisepinna temperatuur oli sel hetkel 21°C ehk temperatuuride erinevus 44°C. Valemi põhjal on temperatuuripaisumine 10 m väliseina korral

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t° = 8 \cdot 10^{-6} / K \cdot 10\ m \cdot 44°C = 3{,}5 \cdot 10^{-3}\ m = 3{,}5\ mm$$

kus α – temperatuuripaisumise koefitsent (/K)

l – arvutuspikkus, (m)

Δt° - temperatuuride erinevus kahel pool tarindit

Niiskusdeformatsiooni hindamiseks kasutati peatükis 1.2.2 viidatud info järgi võib mahukahanemine olla kuni 0,93 mm/m. 10 m pikkuse välisseina mahumuutus oleks 10 m · 0,93 mm/m = 9,3 mm. . Seega on maksimaalne võimalik välisseina pikisuunaline kahanemine (soojast ja niiskest keskkonnast kuiva ja külma) 3,5+9,3=12,8 mm. Antud tulemust tuleb kasutada deformatsioonivuugi laiuse

projekteerimisel, mis sõltub vuugitäite (tüüpiliselt nn villasukk paneelide liitekohas ja elastne ilmastikukindel vuugimastiks vuugi välispinnal) elastsusest.

3.2 Kontrollarvutus kondensaadi tekkeriskile

Paneeli materjalikihtide vahelise kondenseerumisriski hindamiseks tehti EVS-EN 13788 kohased kontrollarvutused nii välisõhu madalaima keskmise ööepäeva temperatuuriga kui ka välisõhu keskmise kuu temperatuuriga iga kuu lõikes. Kasutatud arvutusandmed ja arvutustulemused on esitatud tabelites 16 ja 17.

Kondensatsiooni riski kontrollarvutus välisõhu madalaima keskmise ööpäevatemperatuuriga

Hoone asukoht: Tallinn

Välisõhu madalaim keskmine ööpäevatemperatuur: -17°C

Välisõhu suhteline niiskus: 85%

Välisõhu veeaurusisaldus: 0,99 g/m^3

Niiskusklass: 3 (niiskuslisa külmal aastaajal 6 g/m^3, suvel 2 g/m^3)

Siseõhu temperatuur: 22°C

Siseõhu veeaurusisaldus: 6,99 g/m^3

Siseõhu suhteline niiskus: 38,2%

Tabel 16. Kondensatsioonirisk välisõhu madalaima keskmise ööpäevatemperatuuriga.

Materjal	Paksus d, m	Soojuserijuhtivus Λ W/(m·K)	t, ºC	Veeauru-erijuhtivus δp, kg/(m·s·Pa)	RH %
Siseõhk			22.0		38.2
Sisepind					
			21.3		39.7
Sisepahtel	0.003	0.55		7.4^{-12}	
			21.3		39.7
Poorbetoon	0.15	0.1		2.1^{-11}	
			13.7		60.0
PUR	0.15	0.029		1.8^{-12}	
			-12.6		80.1
Poorbetoon	0.08	0.1		2.1^{-11}	
			-16.7		91.5
Väliskrohv	0.01	0.55		7.4^{-11}	
			-16.8		83.4
Välispind					
			-17.0		85.0
Välisõhk					

Arvutustulemuste põhjal võib öelda, et madalaima keskmise ööpäevatemperatuuriga arvutades ei teki tarindi kihtide vahel kondenseerumisriski. Kõige kõrgem suhteline niiskus on tulenevalt madalast välisõhu temperatuurist poorbetooni ja väliskrohvi vahel. Suhteline niiskus on kõige kriitilisemas kohas 91,5% ning piisava varuga alla 100%, et hinnata tarindi kondensaadi tekkeohtu madalaks.

Niiskuse kontrollarvutus välisõhu kuu keskmise ööpäevatemperatuuriga.

Hoone asukoht: Tallinn

Välisõhu madalaim keskmine ööpäevatemperatuur: 14,4°C (juuli)

Välisõhu suhteline niiskus: 86%

Välisõhu veeaurusisaldus: 10,66 g/m^3

Niiskusklass: 3 (niiskuslisa külmal aastaajal 6 g/m^3, suvel 2 g/m^3)

Siseõhu temperatuur: 25°C

Siseõhu veeaurusisaldus: 15,1 g/m^3

Siseõhu suhteline niiskus: 65,5%

Tabel 17. Hallituse tekkerisk kuu keskmise ööpäeva temperatuuriga.

Materjal	Paksus d, m	Soojuserijuhtivus Λ W/(m*K)	t, ºC	δp, kg/(m*s*Pa)	RH %
Siseõhk			25.0		65.5
Sisepind			24.8		66.2
Sisepahtel	0.003	0.55	24.8	7.4^{-12}	66.1
Poorbetoon	0.15	0.1	22.7	2.1^{-11}	73.1
PUR	0.15	0.029	15.6	1.8^{-12}	80.8
Poorbetoon	0.08	0.1	14.5	2.1^{-11}	85.1
Väliskrohv	0.01	0.55	14.5	7.4^{-11}	84.7
Välispind			14.4		86.0
Välisõhk					

Hallituse tekkeriski Viitaneni järgi hinnates on kõige kõrgema suhtelise niiskusega koha temperatuuri (t=14,5°C) arvestades kriitiline piir $-0{,}00267 \cdot t^3 + 0{,}160 \cdot t^2 - 3{,}13 \cdot t + 100 = 80{,}1\%$. Vaadeldav olukord ületab seda. Siiski pole tegu hallituse kasvuks soodsate materjalidega ja lisaks on seina sees piiratud hapniku olemasolu.

3.3 Katsetulemused

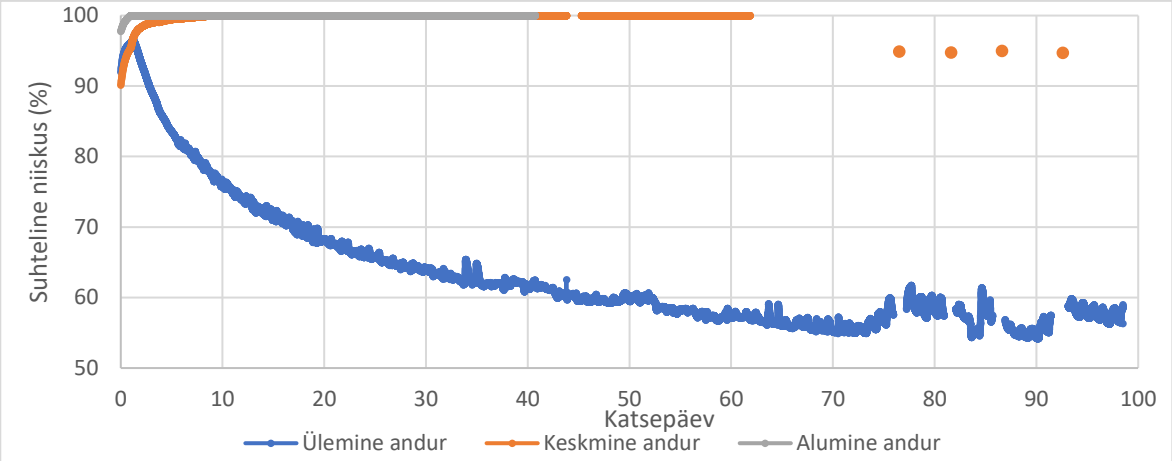
Katsetes kasutatava poorbetooni kuivtiheduse määramiseks hoiti seda 63 päeva tihedalt suletud 50°C temperatuuriga ahjus. Katsekeha ruumala oli 7878 cm^3. Kaalunäitudega arvutatud mahumassid on toodud tabelis 18.

Tabel 18. Kuivtiheduse määramine.

Katsekeha ahjus oldud ööpäevade arv	Katsekeha mahumass kg/m^3
0	500.1
8	431.0
9	429.8
18	429.5
21	429.5
63	430.1

Lõplikule tulemusele väga lähedase tulemuse saavutas katsekeha juba 8 päevaga. Kõige madalam mahumass saadi pärast 21 ööpäeva ahjus oldud kaalumist. Kuivtiheduseks määrati selle järgi 429.5 kg/m^3. Tootja antud tehniliste näitajate järgi on materjali kuivtihedus 425 ± 30 kg/m^3 ehk katsetulemus on tootja deklareeritule lähedane. Aastal 2015 määras Kaia Koitmäe oma magistritöös Aeroc Classic kuivtiheduseks 416 kg/m^3, mis on mõnevõrra madalam. Ebaselgel põhjusel on peale 63 päeva ahjus olemist katsekeha kuivtihedus vähesel määral tõusnud. Tõenäoliselt on see tingitud laboriruumi õhuniiskuse tõusust, kus ahi paiknes või mõõtemääramatusest. Siiski on tegu väikese muutusega ning lõpliku väärtusena kasutati kõige madalamat tulemust.

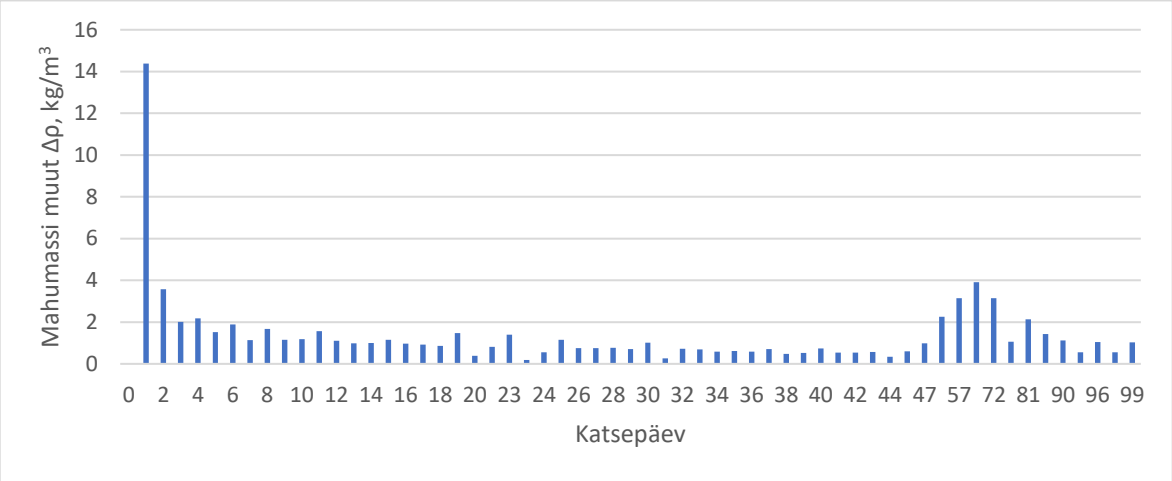
Kolme erisuuruses katsekehade nr 1, 2 ja 3 abil monitooriti suhtelise niiskuse ja poorbetooni niiskussisalduse muutu ajas. Suhtelise niiskuse andurid asusid kõige suurema katsekeha kolmes punktis ja registreerisid joonisel 26 toodud andmed.



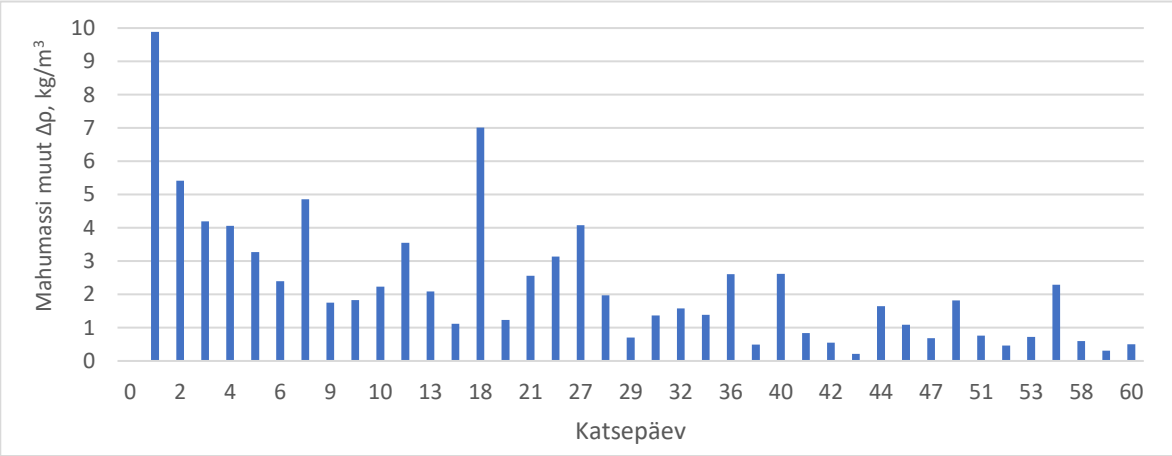
Joonis 26. Katsekeha 1 RH andurite mõõtmistulemused.

Katsekeha väljakuivamisele avatud tahu (pealmine tahk) lähedane osa kuivas 40 päeva jooksul 60% suhtelise niiskuse lähedale ning jäi siis selle väärtuse lähedaseks. Väljakuivamine selles tsoonis on peale 40 päeva järjest aeglustunud, kuid siiski toimub väärtuse järk-järguline langus. Keskmise anduri näit püsib 60 päeva stabiilselt maksimaalse suhtelise niiskuse juures. Joonisel on näha mõõtmistulemuste katkemist peale 62 päeva. See on tingitud anduri rikkest, mille põhjustas tõenäoliselt mõõteseadme oksüdeerumine pikaajaliselt niiskes keskkonnas olemisest. Sama juhtus ka alumise anduriga. Katsekeha keskmise osa näite registreeriti peale seda käsitsi ülemise mõõteanduri abil. Selleks võeti ülemine andur katsekehast välja, teibiti hoolikalt auk, ning paigutati keskosasse. Näidu stabiliseerumist oodati 1 ööpäev. Seetõttu on ka ülemise anduri joonel näha üksikuid katkevaid punkte. Keskmise osa registreeritud nelja väärtust on näha punktidena 95% suhtelise niiskussisalduse juures. Arvestades asjaolu, et mõõtmisperioodi lõpus oli keskmise osa suhteline niiskus väga vähe langenud, oli kõige alumise osa näit sel ajal tõenäoliselt 100% lähedane.

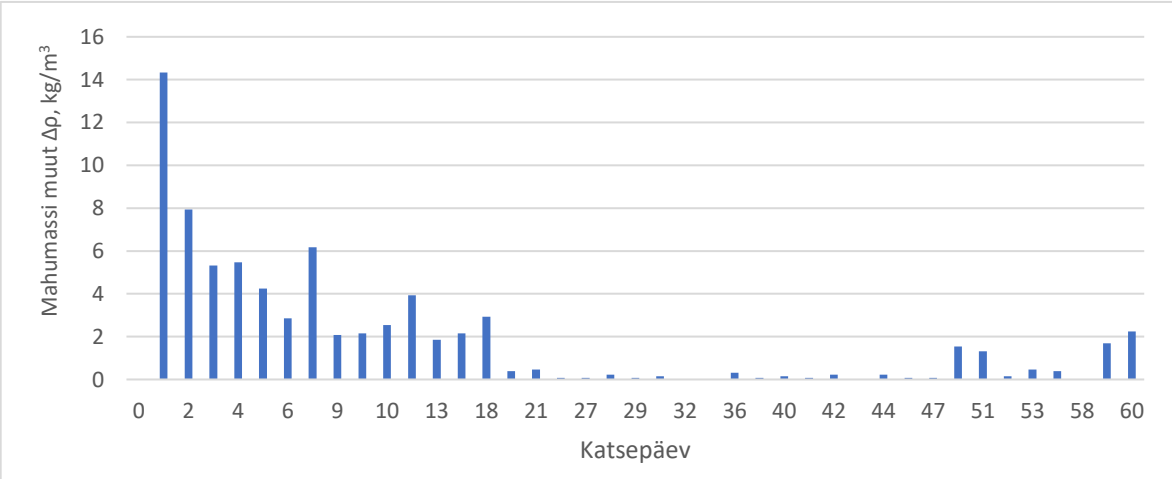
Kolme erimõõdulise katsekeha niiskussisalduse muutumist kirjeldavad joonised 27, 28 ja 29. Diagrammidel on info, kui palju muutus igal katsepäeval katsekeha mahumass võrreldes eelneva katsepäevaga. See annab infot, mis ajahetkedel oli väljakuivamine kiirem ja millal aeglasem.



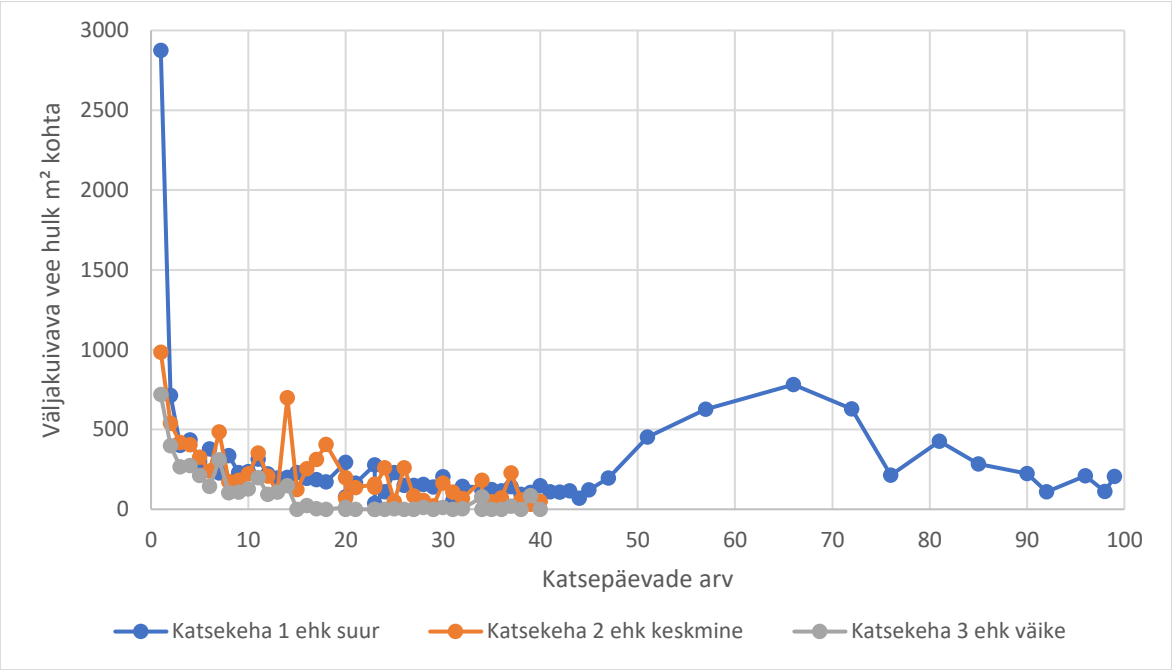
Joonis 27. Katsekeha 1 ehk suure (199 x 199 x 199 mm) katsekeha mahumassi muutumine.



Joonis 28. Katsekeha 2 ehk keskmise (102 x 100 x 100 mm) kastekeha mahumassi muutumine.

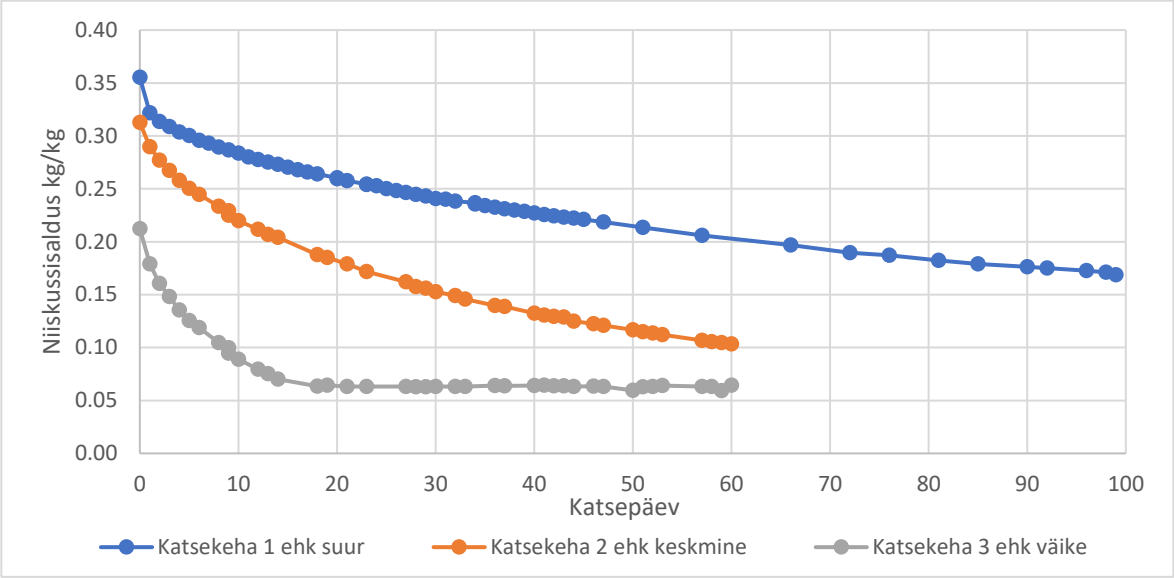


Joonis 29. Katsekeha 3 ehk väikese (51 x 51 x 50 mm) katsekeha mahumassi muutumine.



Joonis 30. Väljakuivava vee kogus pindala kohta.

Katsekeha 1 ehk mõõtmetega 199 x 199 x 199 mm keha kõige suuremad muutused toimusid esimestel katsepäevadel. Siis kuivas päevas välja umbes 1% kaalulist niiskust. Edasi on kuivamine olnud peamiselt ühtlane, kiirenedes oluliselt peale 47 katsepäeva ehk kuupäevaliselt 24. mai ajal, kui väljas oli tavapärasest kõrgem temperatuur, mis tõstis ka siseõhu temperatuuri. Katsekehad 2 ja 3 olid sel ajal 8. katsepäeva juures. Ka nendel katsekehadel on sel perioodil näha pigem suuremat tiheduse muutumist. Katsekehal 2 ehk 102 x 100 x 100 mm keha on mahumass ajaperioodi jooksul ebakorrapäraselt muutunud. Siiski on näitaja järjest stabiliseerumas. Katsekehal 3 51 x 51 x 50 mm saabub peale 18 katsepäeva stabiilsem aeg, kui katsekeha kaal püsib korduvalt samal tasemel. Katsekeha niiskussisaldus on selleks ajaks jõudnud 6,4% kaalu järgi ning jääb selle lähedale püsima. Seega kuivas kõige rohkem niiskust välja 35% kaalulise niiskuse juures ning mida väiksemaks muutub niiskussisaldus, seda aeglasemaks muutub ka väljakuivamine. Joonisel 31 on täpsemalt näha katsekehade niiskussisalduse muutumine katseperioodil.

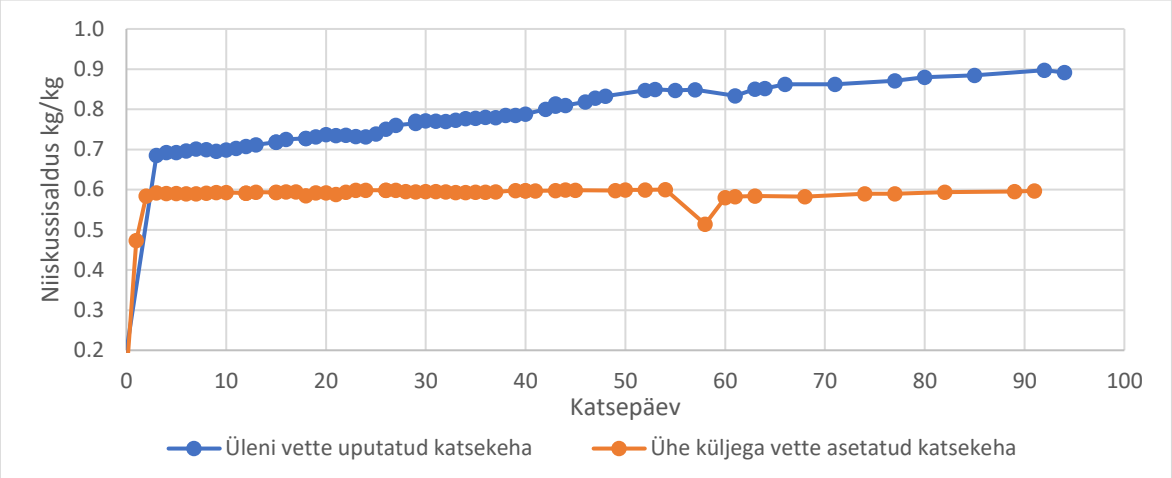


Joonis 31. Katsekehade kaaluline niiskussisaldus.

Katsekehade niiskussisalduse muutumine erineb katsekehade suuruse lõikes. Kui väikese katsekeha väljakuivamise joon on järsk, siis suur katsekeha kuivab tunduvalt aeglasemalt ja selle niiskussisalduse joon on palju laugem. Katsekeha 1 katseperiood on pikem, sest katsega alustati varem. Katsekeha 1 kuivab niiskussisalduse tasemelt 0,35 kg/kg üsna lineaarselt, jõudes 99. katsepäeval niiskussisalduseni 0,17 kg/kg. 20 esimese päevaga toimub 25% langus. Katsekeha 2 niiskussisaldus on 60 päevaga vähenenud 0,31 kg/kg-lt 0,10 kg/kg. Esimese 20 päevaga toimub 40% langus. Katsekeha 3 kui väike katsekeha kuivab kiirelt välja, niiskussisaldus langeb järsult esimese 20 päevaga ja jõuab siis tasakaaluniiskuseni 6%, mille juurde jääb püsima.

Väike katsekeha illustreeris poorbetooni väljakuivamist niiskussisalduse sklaala alumises osas. Peatükis 1.2.2 toodud info kohaselt on poorbetooni kaaluline tasakaaluniiskus umbes 5%. See on 80% suhtelise niiskuse korral. Labori õhu niiskussisaldus on umbes 43%. Kontrollimaks tasakaaluniiskuseni jõudmist, kaaluti üks laboriruumis pikalt seisnud ilma teipimata sama seeria poorbetooni tükk ning asetati õhutihedasse kilekotti koos suhtelise niiskuse anduriga. Anduri näiduks saadi 46,7% ning arvutatud kaaluliseks niiskussisalduseks 2,8%. Kaia Koitmäe määras oma lõputöös Aeroc Classic sorptsioonkõvera. Suhtelise niiskuse 43% juures saadi mahuline niiskussisaldus 1,06%. Teisendades selle kaaluliseks niiskussisalduseks, teeb see 2,5%. Need tulemused on madalamad katsetulemusest ehk võib öelda, et katsekeha nr 3 6% niiskussisaldus oleks vähesel määral võinud veel väheneda.

Katses kasutatava poorbetooni maksimaalse niiskussisalduse määramiseks korraldati poorbetooni tüki vette uputamise katse. Üks katsekeha uputati täielikult vette, teine pandi veega ühte külge pidi kontakti. Katse tulemused on toodud joonisel 32.

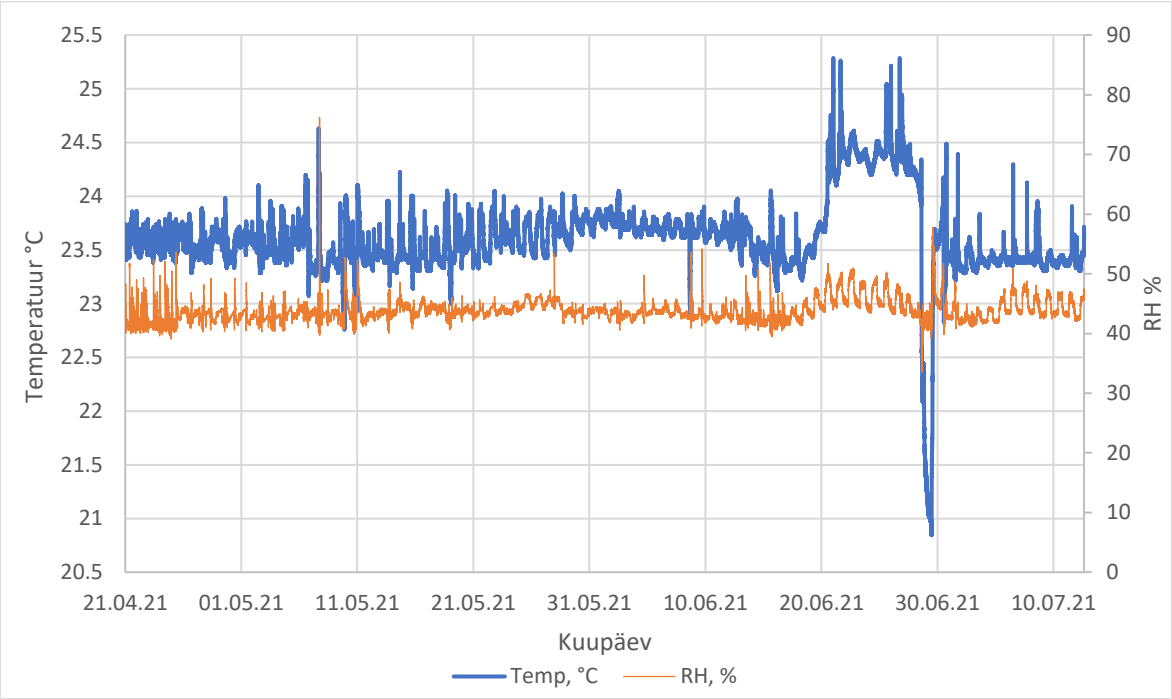


Joonis 32. Vees seisnud katsekehade niiskussisaldus.

Joonisel on näha erinevatel katsepäevadel kaalutud vees seisnud katsekehade niiskussisaldused. Oluliseks infoks on maksimaalne tulemus, mitte katsetulemuste täpne kulg. Siiski on näha, et veega kontaktis saavutavad katsekehad kiirelt kõrge niiskussisalduse ning edasi toimub kaalu juurdevõtt aeglaselt. Vette uputatud katsekeha jõudis mõne päevaga 69% niiskussisalduseni ning veega ühest küljest kontaktis olev keha 58% niiskussisalduseni. Joonisel on näha ühe küljega vette asetatud katsekeha niiskussisalduse järsku langust 58. katsepäeval. See võib olla tingitud veemahutis oleva vee kiiremast aurustumisest kui oodati. Seetõttu ei ulatunud katsekeha külg enam vee piirini ja katsekeha jäi mõneks päevaks kuivale. Siiski ei mõjuta see oluliselt katsetulemusi ning peale vee lisamist olukord taastus. Üleni vetteuputatud katsekeha maksimaalseks niiskussisalduseks määrati 0,8972 kg/kg ehk 0,3853 m3/m3. See teeb mahumassiks 814,83 kg/m3. Kaaluline niiskussisaldus ligi 90% on ootamatult kõrge tulemus. Peatükis 1.2.2 toodud info järgi võiks näitaja jääda 60% lähedale. Märgunud poorbetooni maksimaalse kaalulise niiskusena kasutati käesolevas töös 70%, kuna materjali pikaajaline viibimine üleni vee all, koos veesamba hüdraulilise rõhuga (kaaluline niiskus ca 90%) ei ole tõenäoline. Ühe küljega vette asetatud katsekeha puhul oli tulemus ootuspärane. Maksimaalne veesisaldus saadi 0,6002 kg/kg ehk kaalu järgi 60,02% ehk 0,2578 m3/m3. See on mahumass 687,26 kg/m3.

Laboris katsekehade 1, 2 ja 3 lähedal asunud temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust monitoorinud anduri mõõtmistulemused on joonisel 36. Mõõtmisandmed on kogutud

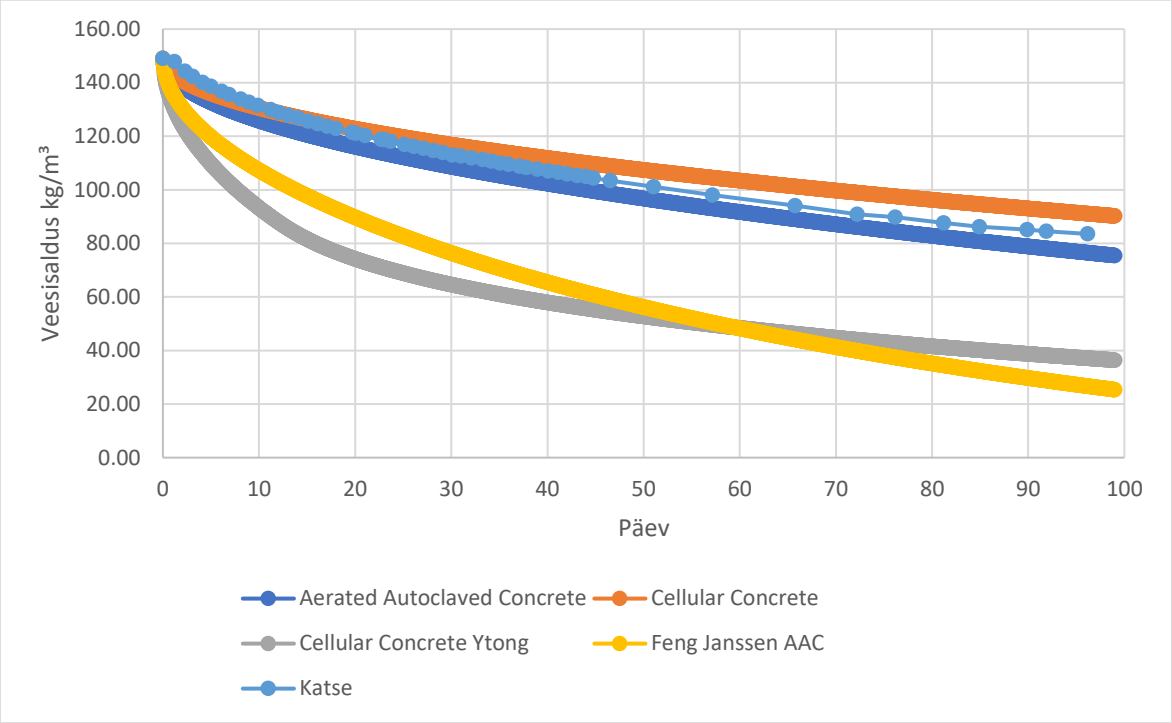
kahe erineva anduriga. Üks andur mõõtis perioodil 21.04 – 20.05 ja 15.06 - 13.07. Tulenevalt esimese anduri rikkest tegi vahepealsel perioodil mõõtmisi teine andur. Kogu mõõtmisperioodi keskmine temperatuur oli 23,6°C ja keskmine suhtelise niiskuse tase 43,9%. Delphini programmis koostati sama katse simulatsioon ning ääretingimustena kasutati mõõtmisandmete keskmist.



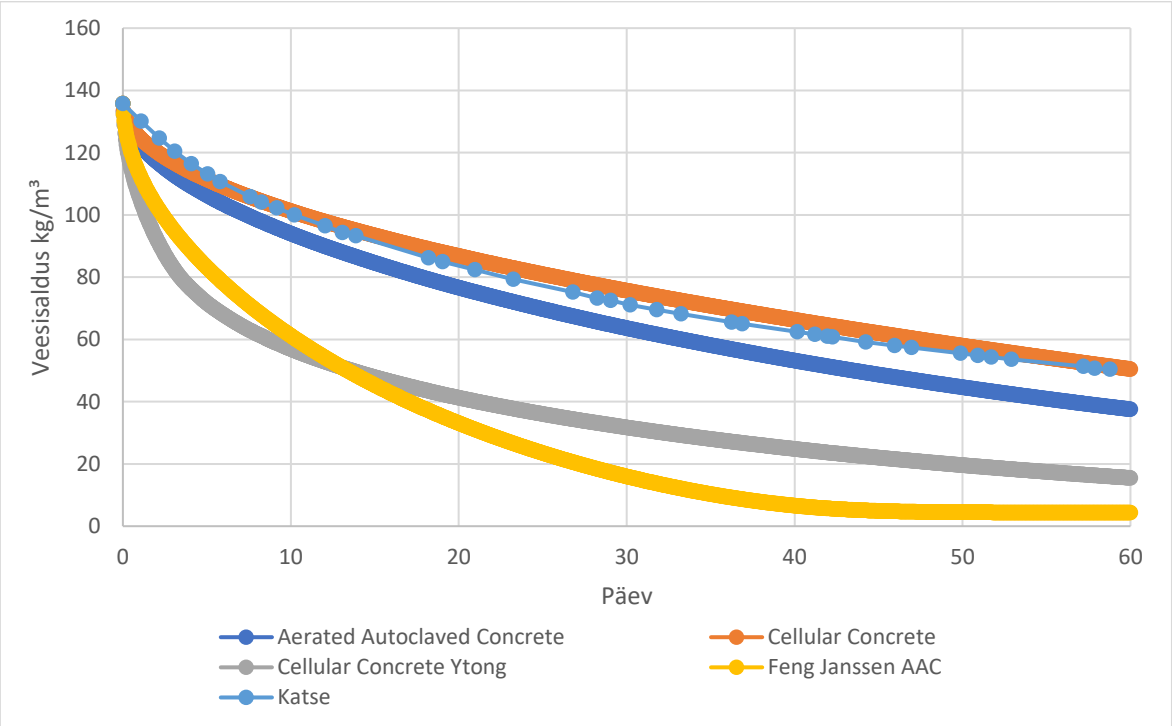
Joonis 33. Labori anduri registreeritud õhutemperatuur ja suhteline niiskus.

3.4 Katse ja katsekeha simulatsiooni võrdlus

Väljakuivamise simulatsioonid koostati kõigile kolmele erinevas suuruses katsekehale. Hinnati keskmist niiskussisaldust (Moisture Mass Average). Joonisel 34 on näha nelja erineva Delphini kataloogi materjali ja 20x20x20 cm suuruses katsekeha katsetulemuste võrdlus. Kõige lähedasemad materjalid katsetulemustele on „Aerated Autoclaved Concrete" ja „Cellular Concrete". Kokku on 57 katsepunkti. Katsepunkte kõrvutati kellaajaliselt simulatsiooni tulemustega. Materjalide igale simulatsiooni tulemusele määrati tema erinevus katsetulemusest absoluutväärtusena. Liites kokku kõigi 57 punkti erinevuse, saadi tulemuseks, et „Cellular Concrete" erineb katsetulemustest vähem kui „Aerated Autoclaved Concrete". Kui „Cellular Concrete" simulatsioonitulemused erinesid katsetulemustest keskmiselt 3,5%, siis „Aerated Autoclaved Concrete" tulemused erinesid keskmiselt 4,6%. Materjalid Cellular Concrete Ytong ja Feng Janssen AAC kuivavad välja oluliselt kiiremini. Joonisel 38 oleva 10x10x10 cm katsekeha tulemused sobituvad Cellular Concrete materjalifunktsiooniga veelgi paremini. Keskmine erinevus on 2,3%.

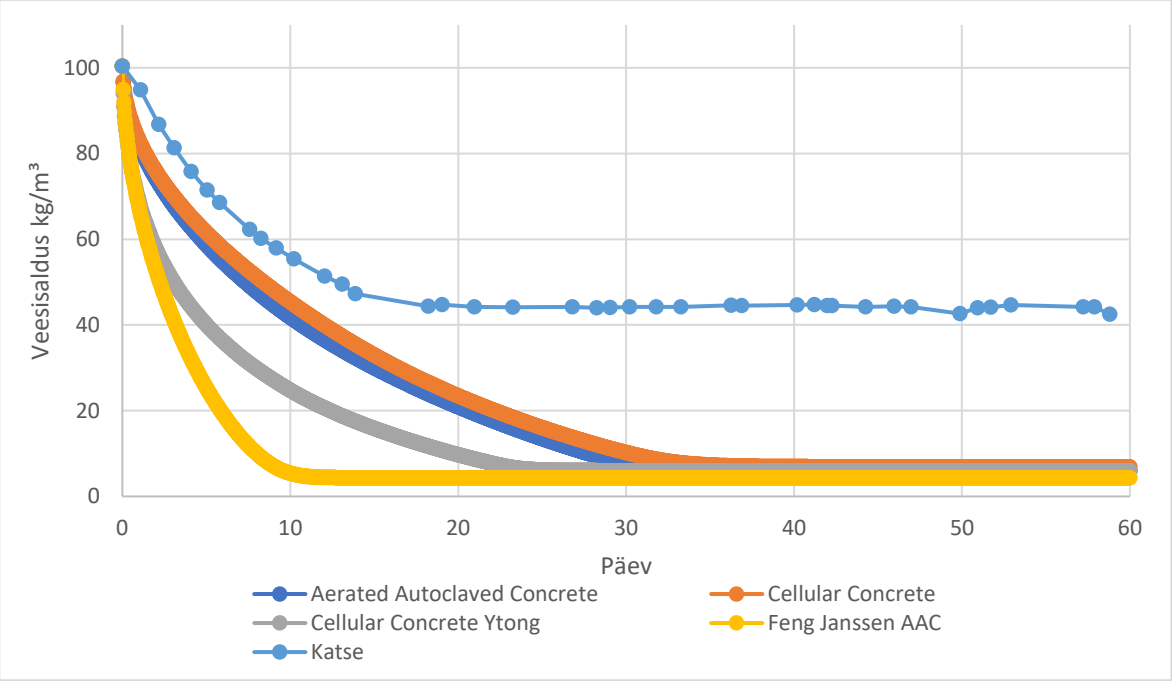


Joonis 34. 200 mm kõrguse katsekeha veesisaldus katseperioodil.



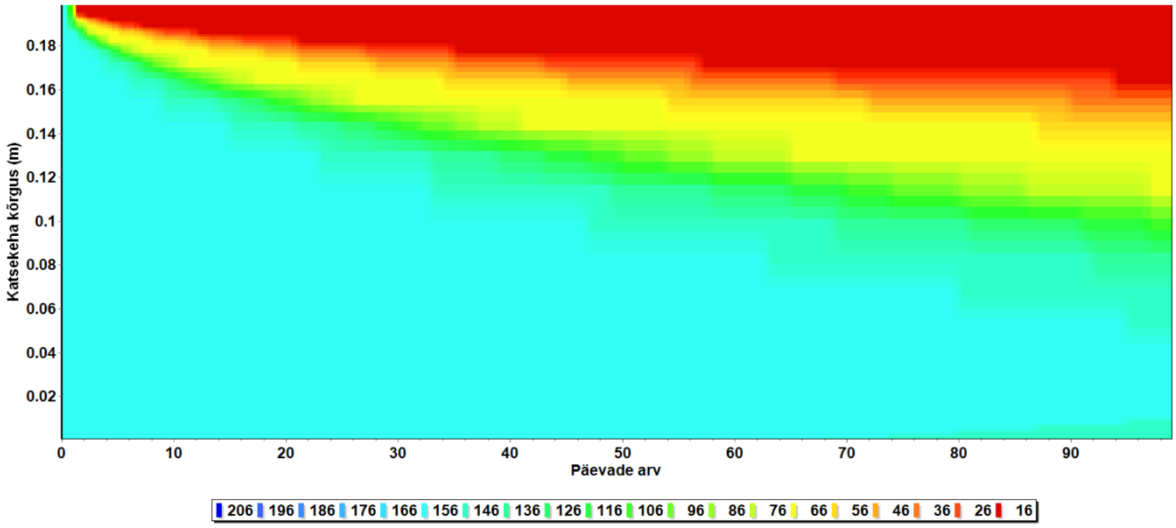
Joonis 35. 100 mm kõrguse katsekeha veesisaldus katseperioodil.

Väikese katsekeha võrdlusgraafik näitab, et esimesed 15 päeva erineb graafik väga vähe. Sealt edasi jääb katse poorbetoon püsima 6% kaalulise niiskussisalduse juurde. Simulatsiooni poorbetoon kuivab aga edasi kuni tasakaaluniiskuseni 2%. Siinkohal saab materjale võrrelda perioodil kuni 15 päeva. Sealt edasi toimub graafikute lahknemine, sest simulatsiooni poorbetoon peaaegu lõpuni välja, aga katse poorbetoon jääb 5-6% niiskussisalduse juurde. Katsetulemuste analüüsis selgus, et ka katse poorbetoon saaks veel kuivada madalamale tasakaaluniiskussisaldusele. Katsetulemusi ja arvutustulemusi võrreldes on siiski näha, et kõige kõrgemat niiskussisaldust hoiab taas Cellular Concrete, mis on ka kõige lähemal katsetulemustele.



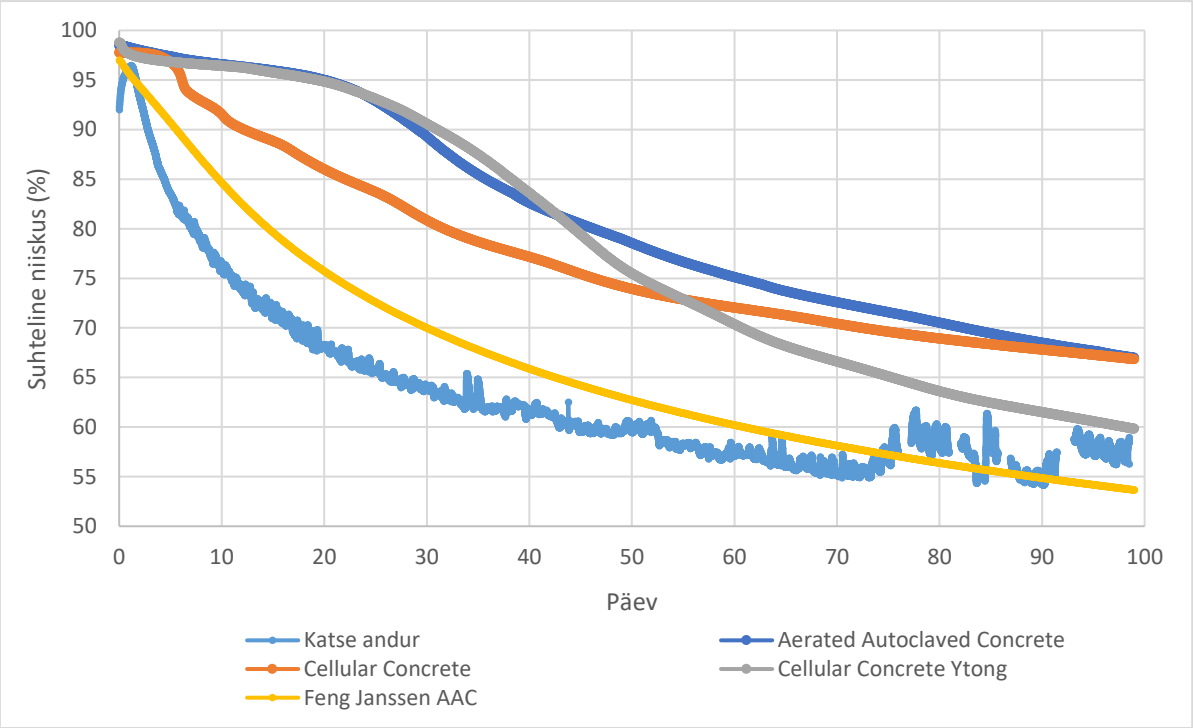
Joonis 36. 50 mm kõrguse katsekeha veesisaldus katseperioodil.

Joonis 37 illustreerib Cellular Concrete materjaliga tehtud simulatsiooni katsekeha niiskussisalduse jaotumise kohta. Simulatsiooni järgi on 200 mm kõrguse katsekeha alumise 100 mm niiskussisaldus peale 50 päeva väljakuivamist ca 150 kg/m^3 juures. Peaaegu täielikult välja kuivanud on pealmisest osa 20 mm. Katseperioodi lõpuks niiskussisalduse 156 kg/m^3 juures 40 mm kõrgune katsekeha osa. Peaaegu täielikult välja kuivanud on selleks ajaks samuti pealmise osa 40 mm kõrgune osa.



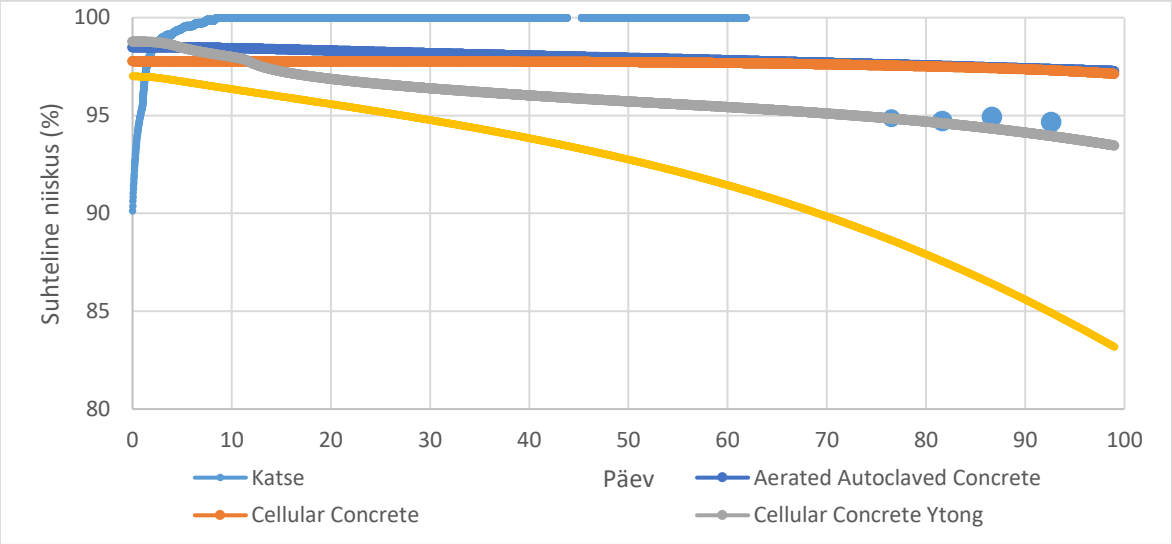
Joonis 37. Niiskuse jaotumine katsekehas Cellular Concrete materjali korral.

Ülemise anduri mõõtmiskohas ehk ülemisest pinnast 18 mm sügavusel on katsetulemuste järgi niiskuse tase madalam kui simulatsioonide järgi. Joonisel 38 on näha, et kõige lähedasemalt järgib katsetulemuste graafiku kuju materjal Feng Janssen AAC. Mõnevõrra kõrgemaid niiskussisaldusi ennustatakse simulatsioonides, mille materjaliks on valitud Cellular Concrete.



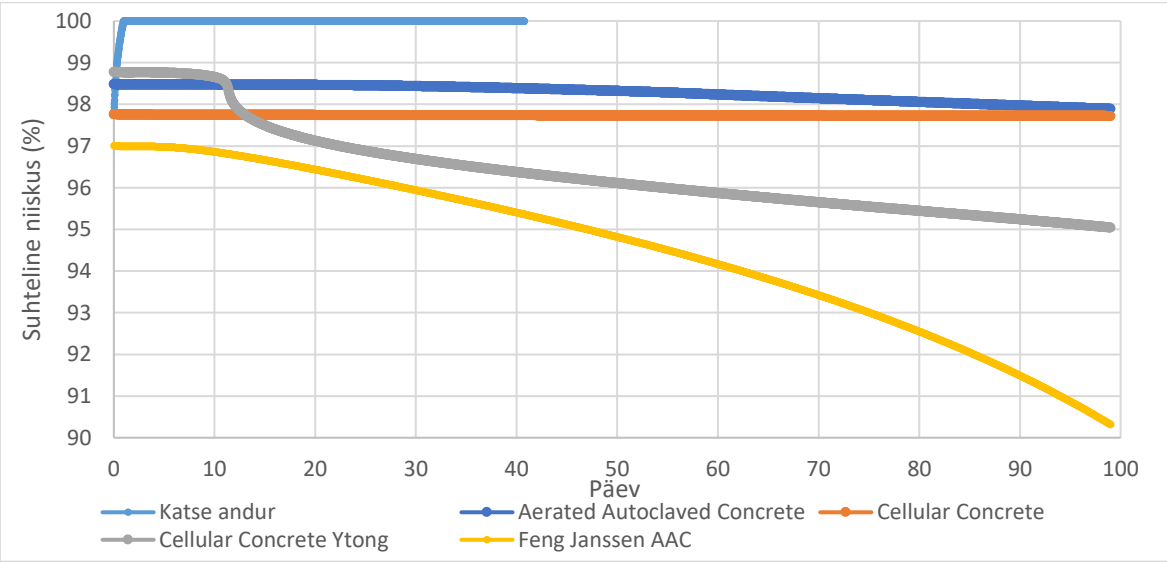
Joonis 38. Ülemise RH anduri tulemuste võrdlus simulatsiooniga.

Katsekeha keskosas paikneva anduri mõõtmistulemusi on võrreldud joonisel 39 simulatsiooni tulemustega. Võrreldavuse eesmärgil on kõikide andurite graafikute suhtelise niiskuse skaalad jäetud samaks. Graafikul on näha, et mõõtmisperioodil katkeb anduri graafik. See on tingitud anduri rikkest. Üksikud punktid on graafikule saadud ülemise anduri ümbertõstmisel katsekeha keskossa. Anduri suhtelise niiskuse tase on keskosas kõrgem, kui ennustavad simulatsioonid. Kõige kõrgemaid suhtelise niiskuse tasemeid näitavad materjalid Aerated Autoclaved Concrete ja Cellular Concrete.

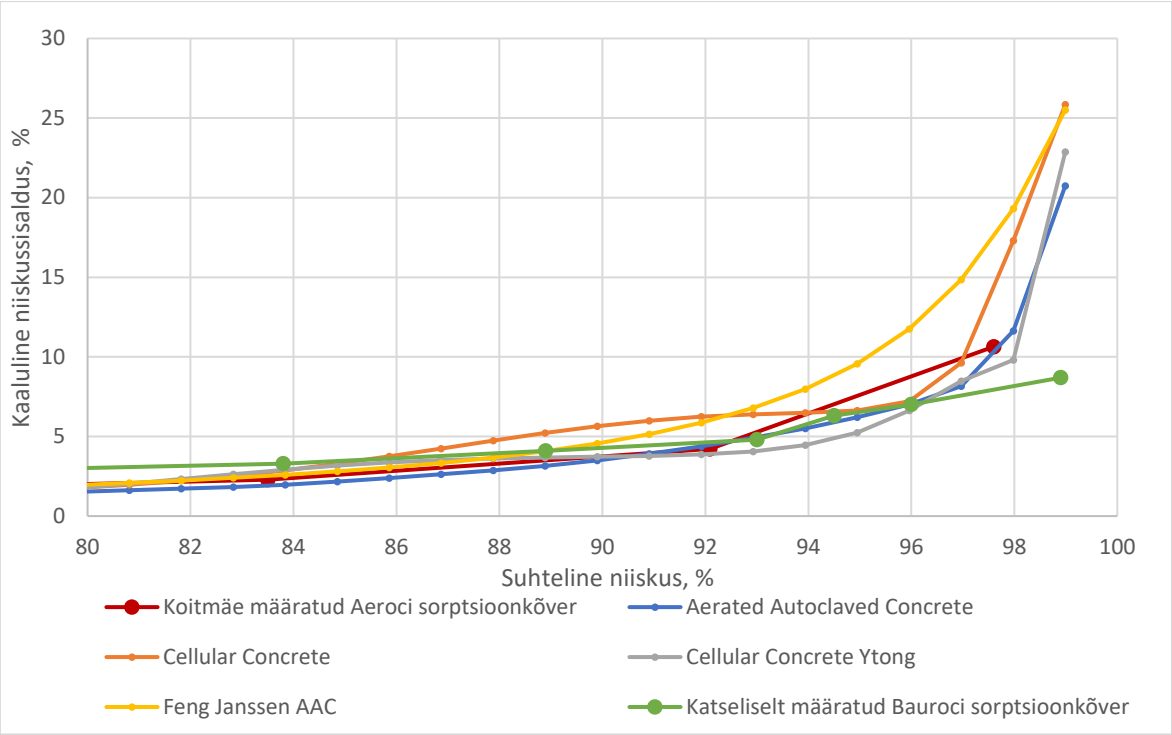


Joonis 39. Keskmise RH anduri tulemuste võrdlus simulatsiooniga.

Ka alumise anduri puhul näitab katsetulemuste graafik kõrgemaid näite simulatsioonide omast (joonis 40). Taas on kõige lähedasemad Aerated Autoclaved Concrete ja Cellular Concrete.



Joonis 40. Alumise RH anduri tulemuste võrdlus simulatsiooniga.

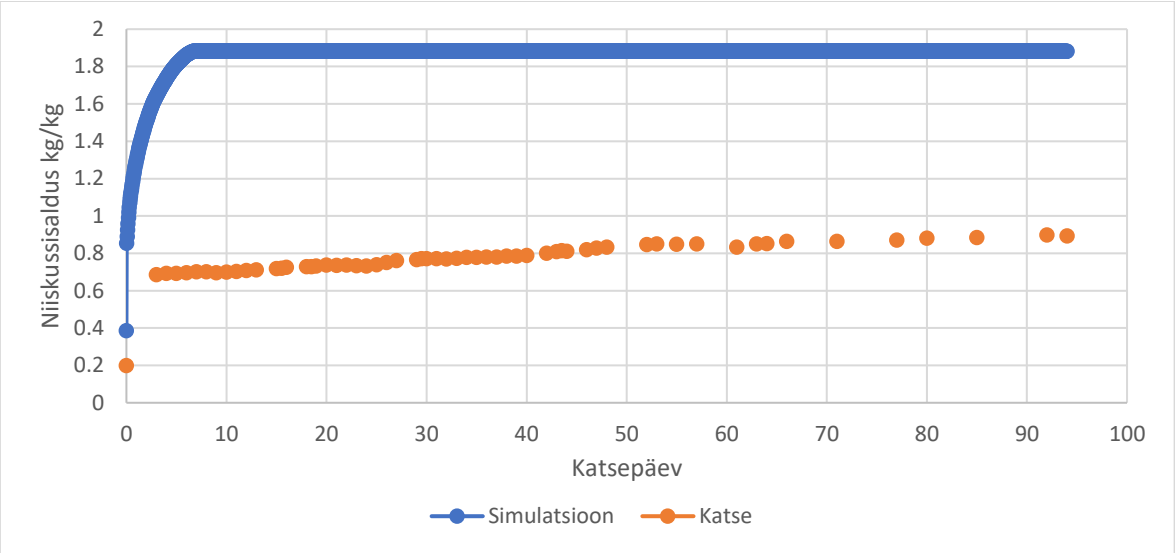


Joonis 41. Töös katseliselt määratud, Kaia Koitmäe magistritöö ja Delphini materjalikataloogi sorptsioonkõverate võrdlus.

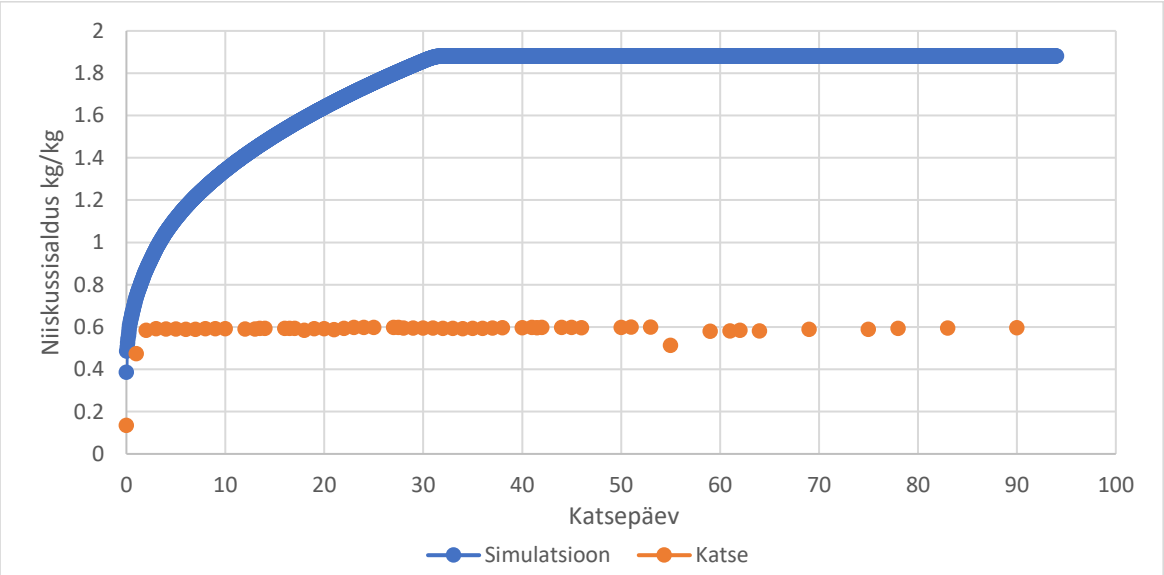
Joonisel 41 on toodud katses määratud sorptsioonkõver võrrelduna Kaia Koitmäe uurimistöös määratuga ning Delphini kataloogimaterjalide omadega. Kaia Koitmäe sorptsioonkõver on määratud mõlemat, nii absorptsiooni kui desorptsiooni arvstades. Käesoleva töö katsekõver määrati vaid absorptsioonil. Kui lisada siia ka desorptsiooni tulemused, siis oleksid kaalulise niiskussisalduse näidud tõenäoliselt veidi kõrgemad ehk lähemal Koitmäe määratule. Samas ei tee Delphini programm absorptsioonil ja desorptsioonil vahet, mistõttu võib käsitleda ka ainult absorptsiooni. Suhtelise niiskuse piirkonnas 80-86% läheneb katsejoon kõige rohkem Cellular Concretele, niiskustaseme 92…96% juures aga rohkem Aerated Autoclaved Concretele.

Veeämbrisse uputatud katsekehade ja simulatsioonide võrdlus on näha joonistel 42 ja 43. Katse ja simulatsioon ilmestavad, milline on poorbetoonkeha maksimaalne veesisaldus. Simulatsioone ja katset võrreldes on koheselt näha, et nende erinevus on väga suur. See on tingitud asjaolust, et arvutiprogramm ei võtta arvesse uputamisel katsekehasse lõksu jäävat õhku ning kuvab infot, nagu katsekeha imaks vett kogu poorsuse ulatuses. Lisaks ei võta 2D simulatsioon arvesse katsekeha kahte külge, mis samuti vett imavad. Joonistelt selgub veel, et üleni vette uputatud katsekeha imab endasse rohkem vett kui ühe küljega vees olev katsekeha. Ka simulatsioonide järgi saavutab üleni vees olev katsekeha maksimaalse niiskussisalduse kiiremini kui ühe küljega vees olev katsekeha. Ehkki üleni vette uputamisel takistab katsekeha

pooridesse jääv õhk vee tungimist pooridesse, mõjutab veeimavust olulisel määral ka hüdrostaatiline rõhk, mis sõltub veesamba kõrgusest. Katses oli see ca 6 cm, mis sai määratud ka simulatsioonile.

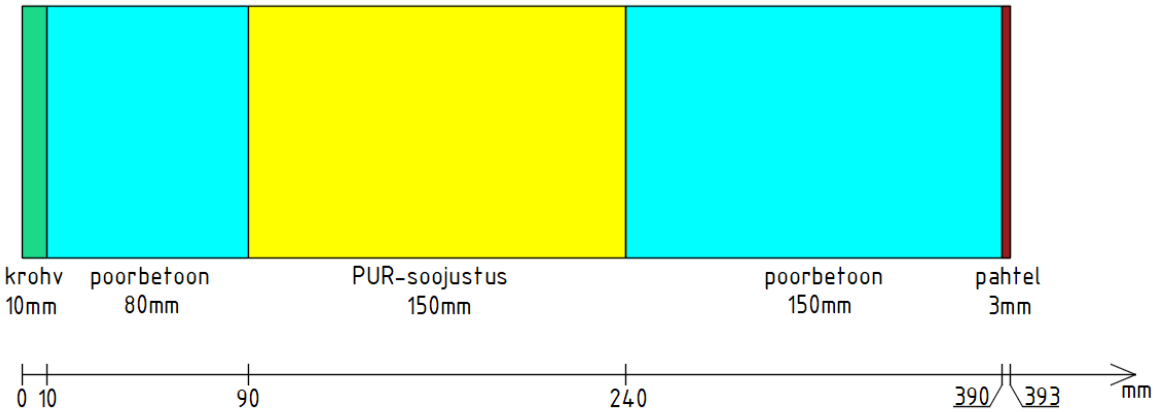


Joonis 42. Poorbetoonkeha üleni vette uputamise katse võrdlus simulatsiooniga.



Joonis 43. Poorbetoonkeha ühe küljega vette uputamise katse võrdlus simulatsiooniga.

3.5 Arvutustulemused



Joonis 44. Simulatsioonides kasutatud paneeli sügavuse skaala välispinnast.

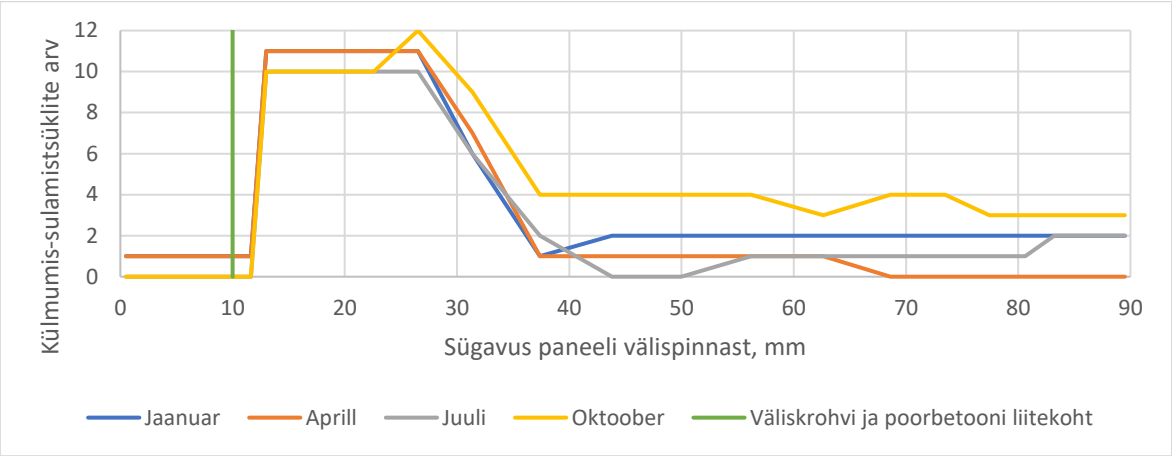
Olulisemad ääretingimused on kirjeldatud järgnevalt. Materjalide parameetrid on toodud peatükis 2.1.2 lk 30 tabel 4.

- Välis- ja sisekliima: vaikimisi kondensaadi testaasta, väliskoorikule eraldi ka hallituse testaasta. Lisatud kaldvihm. Kriitiline ilmakaar 225°. Sisekliima sõltuv väliskliimast vastavalt niiskuslisa klassile 3.
- Väliskrohv: paksus 10 mm, korrigeeritud μ = 25 ja A_w = 0,0258 kg/($m^2s^{0,5}$). Väliskrohvi algniiskus on maksimaalne 0,449 m^3/m^3. Välisvärvi ja selle veeaurutakistust ei määratud, kasutatakse toonitavat krohvi.
- Sisepahtel: paksus 3 mm, korrigeeritud μ = 25 ja A_w = 0,0516 kg/($m^2s^{0,5}$). Sisepinna värvikihi S_d on 0,1 m. Sisepahtli algniiskus on maksimaalne 0,449 m^3/m^3.
- Märja ruumi sein: fiiberkummist hüdroisolatsioonimastiks ja keraamilised plaadid, kokku määratud S_d = 2,8 m.

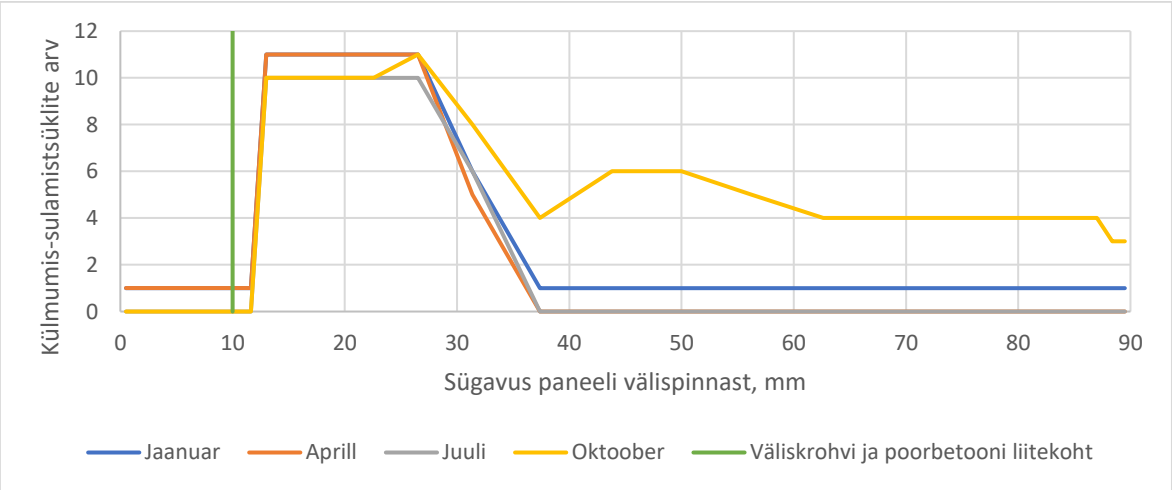
3.5.1 Väliskooriku külmakindlus

Järgnevad joonised kirjeldavad kolmekihilise paneeli väliskrohvis ja välimises poorbetoonkihis (80 mm) tekkivaid külmumis-sulamistsükleid ning jää ja pooride ruumala suhet 5 aasta jooksul erinevatel sügavustel. Simulatsioonide tegemisel määrati jääküllastuse piiriks 10%, nagu viitavad mitmed teadusartiklid. (Kočí et al., 2018). Valitud materjali puhul vastab sellele 97% suhteline niiskus ja külmumistsükkel loetakse ära juhul, kui alla 0°C temperatuuri puhul on veesisaldus arvutuskihis piisavalt kõrge. Külmumis-sulamistsüklite graafikutelt on näha, mitu korda temperatuur erinevates arvutuskihtides alla 0°C langeb. Külmumistsüklite arvu kõrgem väärtus näitab, milline arvutuskiht saab kõige suuremat temperatuuride vaheldumise ning jää paisumise koormust. Samas on tsüklite arv vaid indikatiivne

väärtus ja ei anna infot, mis hetkel poorides olev jää poori vaheseinu hakkab purustama. Selle kirjeldamiseks vaadatakse eraldi ka jää ja poori ruumala suhet. Joonistel on näidatud kõikide arvutuskihtide maksimaalne jää ja poori ruumala suhe 5 aasta jooksul.



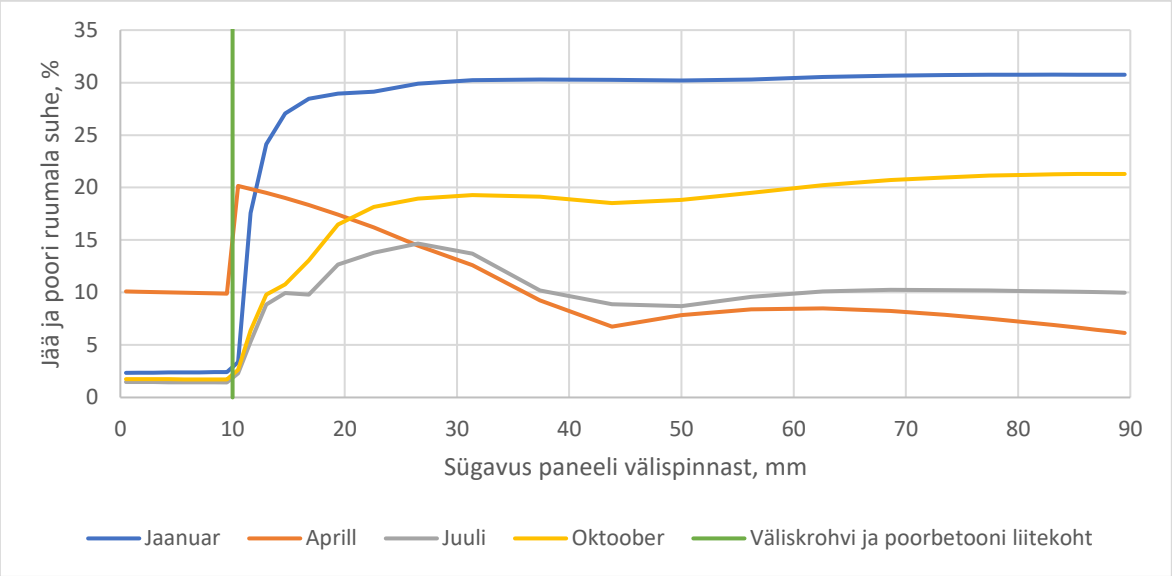
Joonis 45. Külmumis-sulamistsüklite arv erinevatel sügavustel 70% algniiskuse korral 5 aasta jooksul.



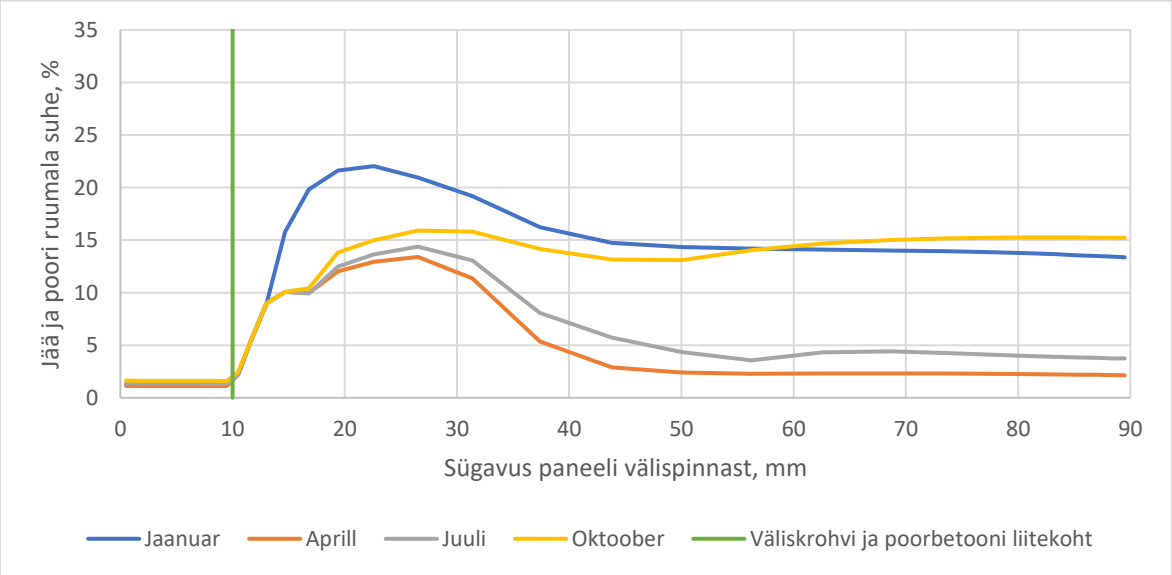
Joonis 46. Külmumis-sulamistsüklite arv erinevatel sügavustel 35% algniiskuse korral 5 aasta jooksul.

Külmumis-sulamistsüklite graafikutelt on näha, et selgelt eristub kõikide simulatsiooni algusaegade korral arvutussügavus 13-27 mm. Summeerides kõigi algusaegade külmumis-sulamistsükleid üle väliskrohvi ja välise poorbetoonkooriku, toimus neid kõige rohkem oktoobri algusajaga simulatsioonides. Kõige välispinna lähedasemas arvutuskihis kuivab niiskus kiiremini välja ja tsükleid on vähem, kuid sellest 15 mm sügavamal on niiskusetase kõrgem. Lisaks koguneb sinna arvutuskihti ka väliskooriku suhteliselt veeaurutiheda PUR soojustuse kihi lähedalt väljakuivav niiskus, mistõttu on

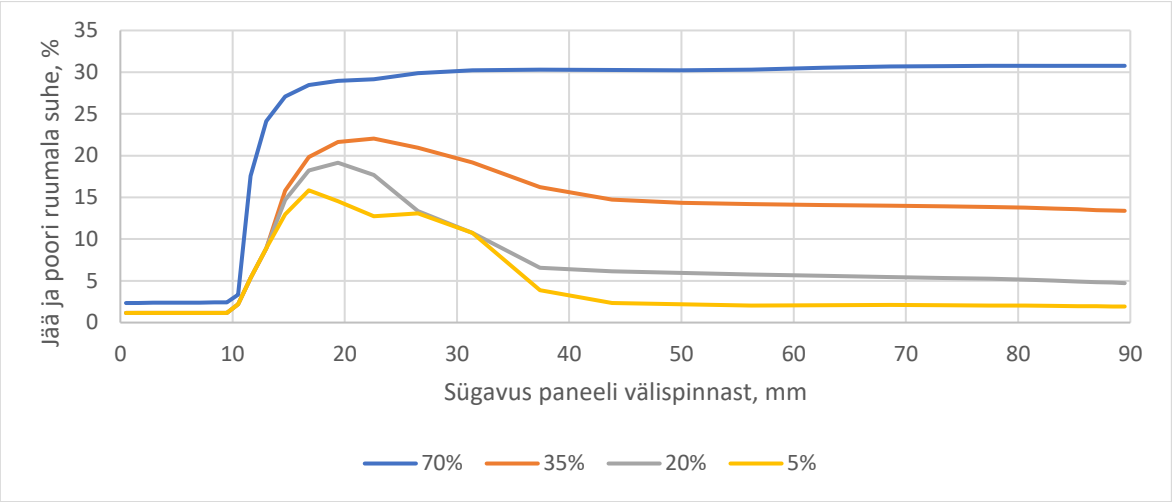
välispinnast 26,5 mm sügavusel olev arvutuskiht kõige rohkem külmumis-sulamistsüklitega koormatud nii 70% kui 35% algniiskuse korral.



Joonis 47. Jää ja poori ruumala maksimaalne suhe erinevatel sügavustel 4 erineva algusajaga 70% algniiskuse korral.



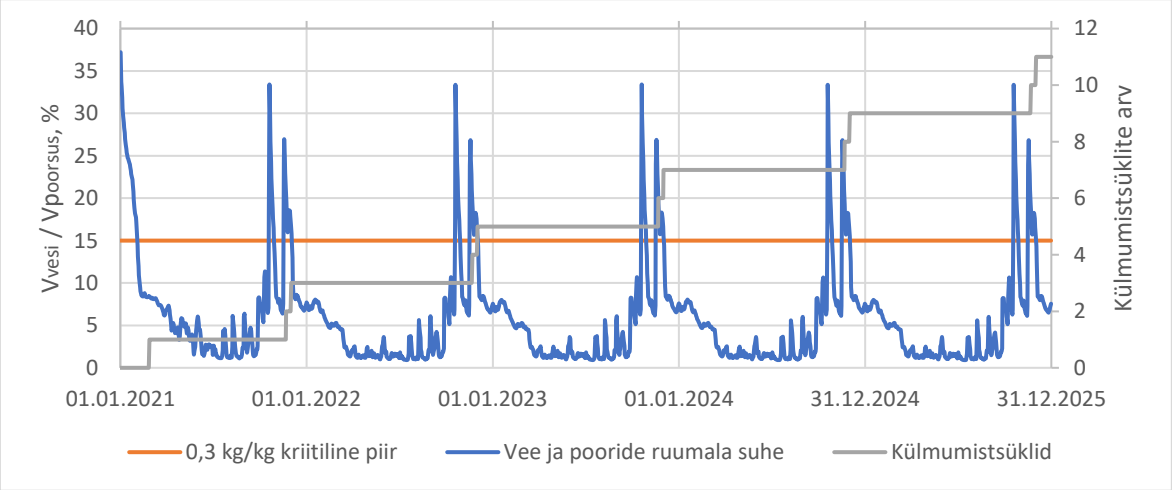
Joonis 48. Jää ja poori ruumala maksimaalne suhe erinevatel sügavustel 4 erineva algusajaga 35% algniiskuse korral.



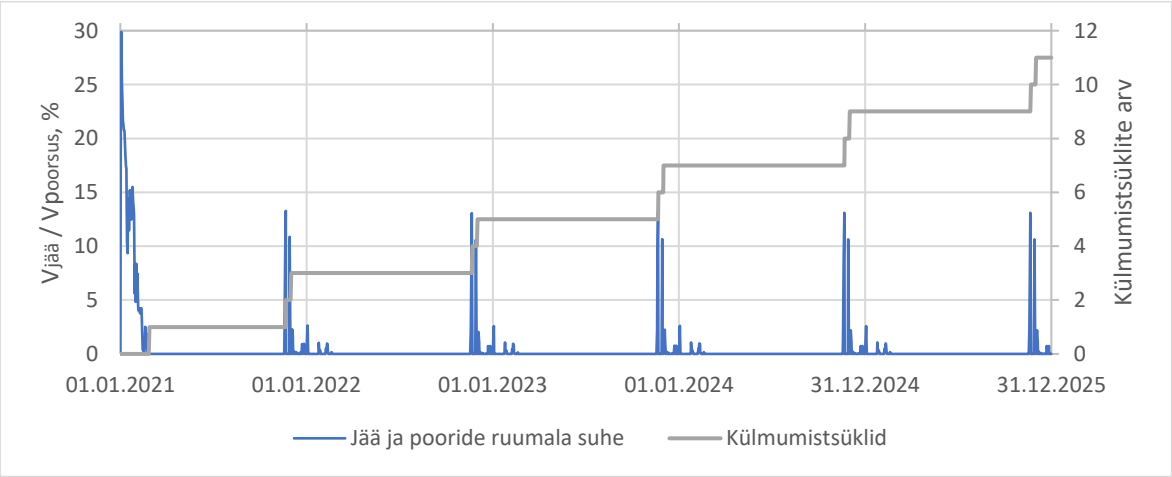
Joonis 49. Jää ja poori ruumala maksimaalne suhe erinevatel sügavustel 4 erineva algniiskuse korral algusajaga jaanuar.

Jää ja poori ruumala suhet võrreldes ei ole võimalik eristada ühte kõige kriitilisemat arvutuskihti. Selgelt kõrgemate jääküllastustasemetega eristuvad jaanuari kuu algusajaga simulatsioonid madalate välisõhu temperatuuride tõttu. Monteerimisel on paneelis palju niiskust ning koheselt saab see ära külmuda. Algniiskuse 35% joonise peal (joonis 48) tuleb selgemalt välja, et rohkem purustavat jääd tekib sügavusel 20-30 mm. Kõige kriitilisema algusajaga (jaanuar) erinevaid algniiskusi võrreldes on näha, et kui 70% algniiskuse korral tekivad kõrged jää küllastustasemed kõigis arvutuskihtides üle terve poorbetoonist väliskooriku, siis madalamate algniiskuste korral on kõige kriitilisem välispinna lähedal olev tsoon ehk madalama algniiskuse korral saab määravaks vaid välisniiskuse ja kaldvihma mõju.
Kokkuvõtvalt on kõige kriitilisem simulatsiooni algusaeg jaanuar. Mudeli üheks kõige kriitilisemaks arvutuskihiks võib pidada 26,5 mm sügavusel olevat kihti, kus esineb kõige rohkem külmumis-sulamistsükleid. Lisaks jääb see kõige suuremaid maksimaalseid jää ja poori ruumala küllastussisaldusi kannatavasse alasse. Enne arvutusmudelite koostamist prooviti läbi ka erinevaid väliskrohve ning lisaks korrigeeriti valitud väliskrohvi veeimavust suuremaks, et see oleks sarnane Eestis laialdaselt kasutatavatele krohvidele. Proovisimulatsioonidest oli selgelt näha, et väliskrohvi valikul on poorbetoonist väliskooriku arvutustulemustele väga suur mõju. Väliskrohvi veeimavuse A_w suurendamine vähendas külmumis-sulamistsükleid üle terve krohvi ja poorbetoonist väliskooriku. Jää ja poori ruumala suhted vähenesid peamiselt krohvikihis, samas poorbetoonis jäid need samale tasemele. Põhjuseks võib pidada suurenenud veejuhtivust (seotud A_w-ga), mis aitab väliskoorikul kiiremini välja kuivada. Veeimavust muudeti 0,093 kg/(m^2·s^{0,5}) pealt 0,0258 kg/(m^2·s^{0,5}) peale. Korrigeeritud väliskrohvi difusioonitakistus μ, mida muudeti 12 pealt 25 peale, märgatavat mõju tulemustele ei avaldanud.

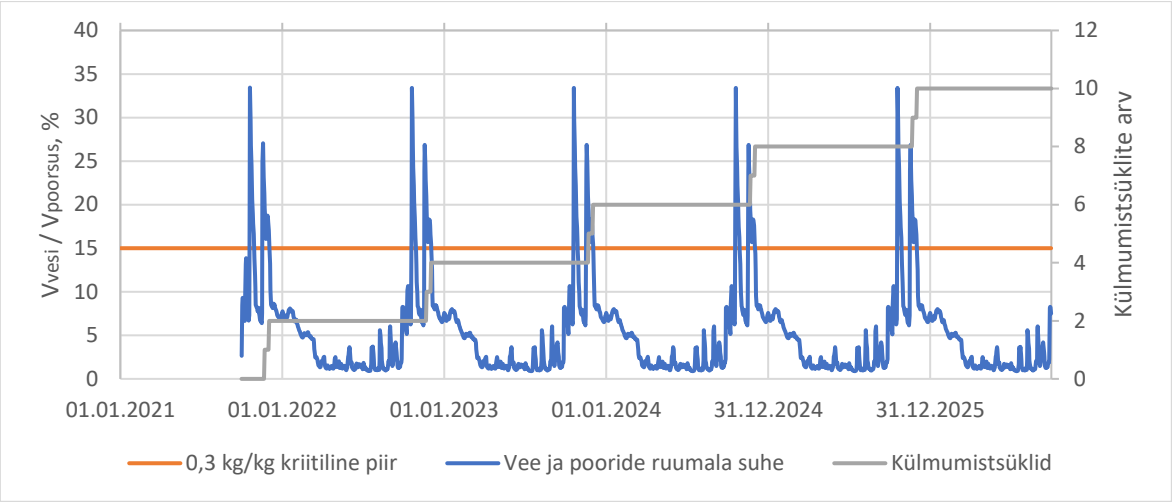
Valides üheks kriitiliseks arvutuskihiks sügavuse välispinnast 26,5 mm, saab täpsemalt vaadelda selles arvutuskihis esinevat vee ja pooride ning jää ja pooride ruumala suhet ja külmumistsükleid. Järgnevalt on toodud graafikud, mis kirjeldavad neid seoseid kahe erineva algniiskuse ja simulatsiooni algusaja korral. Kriteeriumiks, mil poorides jäätuv vesi põhjustab külmakahjustusi, on peatükis 1.2.3 kirjeldatud teadusartiklis peetud 0,3 kg/kg kaalulist niiskussisaldust. (Zapotoczna-Sytek, 2018). Lisaks on teisegi teadusartikli kohaselt piiriks 0,1 m^3/m^3 mahulist niiskussisaldust 304 kg/m^3 materjali puhul, millele samuti vastab kaaluline niiskussisalus 0,3 kg/kg. Simulatsioonis kasutatava poorbetooni tihedus on 415 kg/m^3 ja selle tiheduse korral vastab 0,3 kg/kg niiskussisaldusele 15% vee küllastussisaldus. Joonisele on lisaks toodud külmumis-sulamistsüklite arv, mille abil saab hinnata, millal esineb samaaegselt kõrge vee küllastussisaldus ja negatiivsete temperatuurideni ulatuvad temperatuurimuutused.



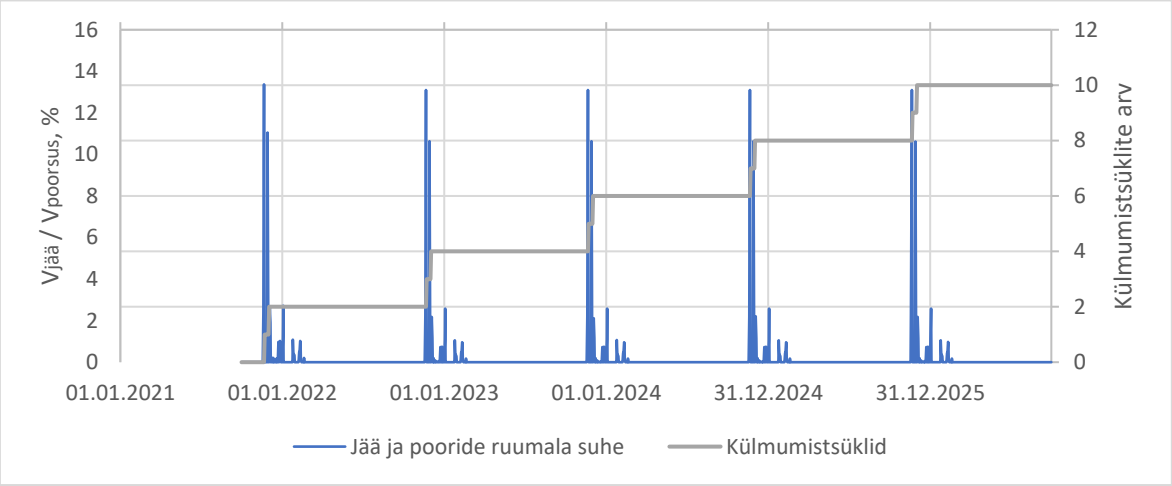
Joonis 50. Vee ja poori ruumala suhe ning külmumistsüklid 26,5 mm sügavusel arvutuskihis 70% algniiskuse ja jaanuari algusaja korral.



Joonis 51. Jää ja poori ruumala suhe ning külmumistsüklid 26,5 mm sügavusel arvutuskihis 70% algniiskuse ja jaanuari algusaja korral. Vertikaaltelje skaalat on taotluslikult muudetud.

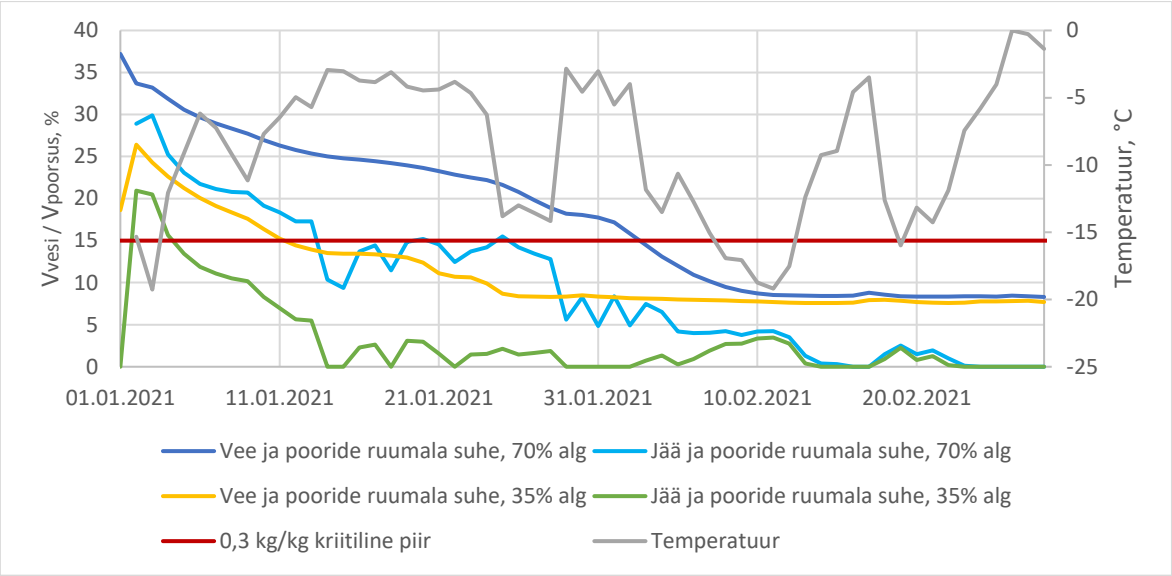


Joonis 51. Vee ja poori ruumala suhe ning külmumistsüklid 26,5 mm sügavusel arvutuskihis 5% algniiskuse ja oktoobri algusaja korral.



Joonis 52. Jää ja poori ruumala suhe ning külmumistsüklid 26,5 mm sügavusel arvutuskihis 5% algniiskuse ja oktoobri algusaja korral.

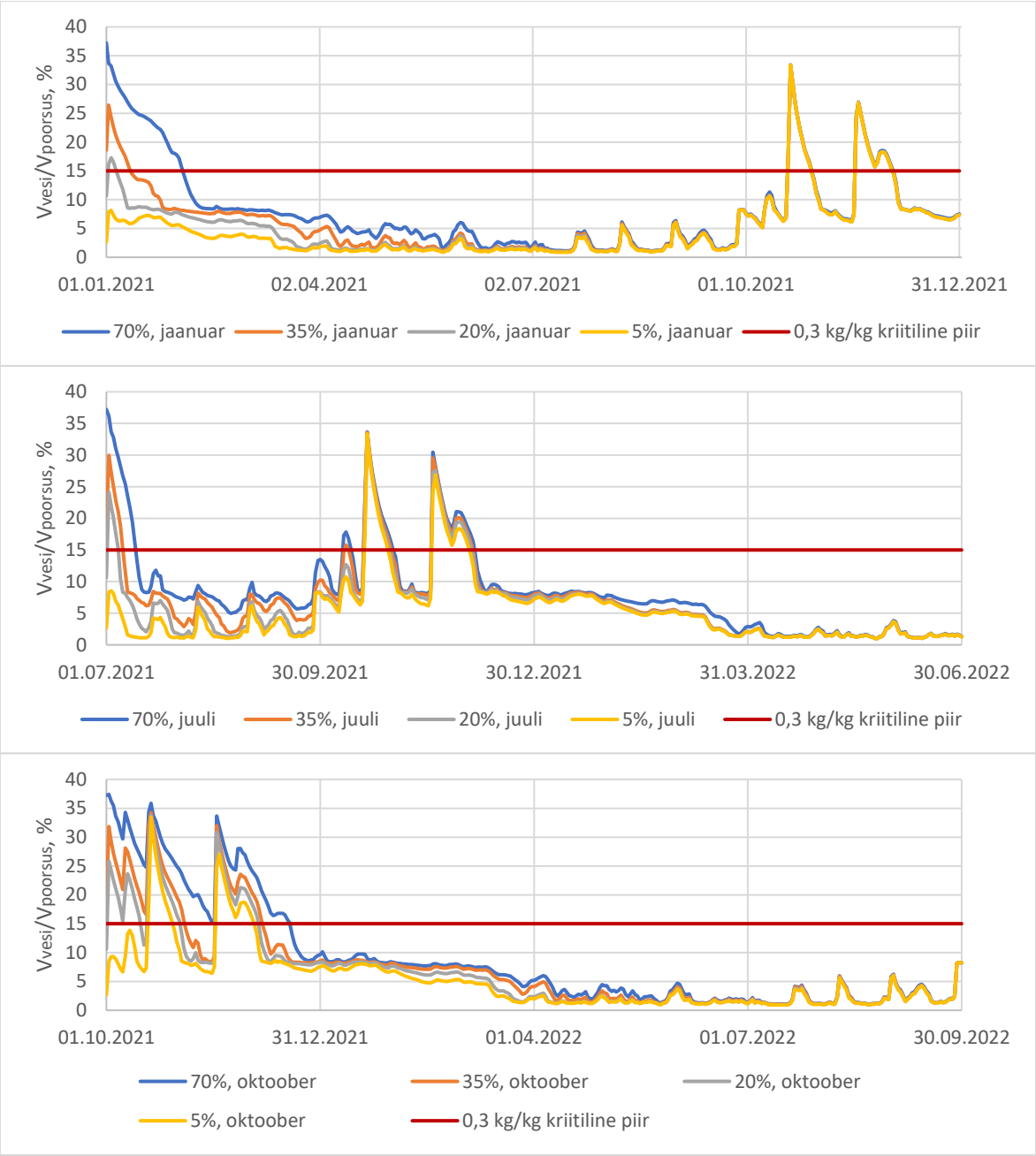
Maksimaalse niiskusisaldusega 70% simulatsioon algusega jaanuar jõuab alla kriitilise piiri 3. veebruaril. Edasi on vee küllastuse maksimumid 20. oktoobril, kui sügisniiskus ja vihm väliskooriku niiskussisaldust oluliselt tõstab. Jääküllastuse maksimum esineb peale väljakuivamist 21. novembril, mil välistemperatuur on -5°C juures. 13% pooride mahust on siis jääga täidetud. Ka 5% algniiskuse korral tõusevad hiljem vee küllastussisaldused liiga kõrgele ning esinevad samaaegselt jää tekkega, mistõttu väliskooriku madalam algniiskus külmakindluse parandamisele oluliselt kaasa ei aita. Koos külmumis-sulamistsüklite joonega vee küllatusisaldust peale väljakuivamist vaadetes on näha, et tsükleid esineb peamiselt detsembris, kui maksimaalne vee küllastussisaldus ulatub 33%. Ka jää ja poori ruumala küllastussisaldused tõusevad just sel ajal kuni 13%. Maksimaalne jää küllastussisaldus on 1. jaanuaril 30%.



Joonis 53. Vee ja jää küllastussisaldus ühel graafikul 3 kuu arvutusperioodi jooksul 31,4 mm sügavusel arvutuskihis algusajaga jaanuar. Kriitiline piir kehtib vee ja pooride ruumala suhte graafikutele.

Lühiajaliselt 2 esimese kuu perioodil kõige ekstreemsemate vee ja jää küllastussisaldustega joonist 53 vaadates on näha, et negatiivset temperatuuri ja jää teket esineb kogu perioodi jooksul. -20°C temperatuuri korral on 70% algniiskusega 30% pooridest ja 35% algniiskusega 20% pooridest jääga täidetud. Vee ja poori ruumala suhe võtab arvesse nii vedelat vett, jääd kui veeauru. Seega kui esineb 30% jää küllastus, siis on pooris veel 3% vedelal kujul vett. Veeauru osa on tühine. Joonise järgi ei tohiks jaaunaris monteerida ka 35% algniiskusega paneeli.

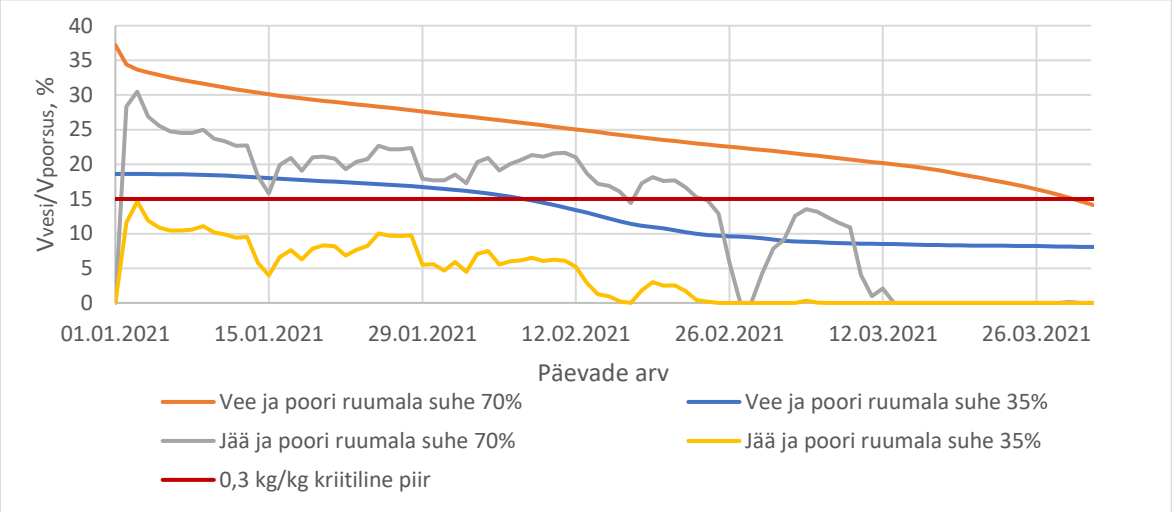
Aasta pikkuse perioodi joonistelt (joonis 54) on näha, et erinevate algniiskuste korral toimub vee küllastussisalduse ühtlustumine 4-6 kuu jooksul. Kõige pikemalt kõrge vee küllastussisalduse juures püsivad graafikud algusajaga oktoober, sest neid mõjutab lisaks sügisniiskus. Juuli algusajaga arvutustulemustelt on kõige paremini näha, et väliskoorik kuivab väga kiiresti. Juba juuli keskpaigas langeb see alla 15% küllastussisaldust. Samas tõusevad ka väljakuivanud väliskooriku puhul näitajad taas oktoobris kõrgele. Seega eelnevate jooniste põhjal oli näha, et jaanuari algusega simulatsioonides esines kõige rohkem jäätuvat vett, sest algniiskus sai koheselt külmuda. Peale algniiskuse väljakuivamist on kõige kõrgem vee küllastussisaldus oktoobris ja novembris, samas kui jaanuaris jääb see väljakuivanud väliskoorikul allapoole kriitilist piiri. Sõltuvalt välistemperatuurist võivad hilisemas ekspluatatsioonis kõige ohtlikumateks kuudeks osutuda oktoober ja november.



Joonis 54. Vee ja poori ruumala suhted 26,5 mm sügavusel arvutuskihis erinevate algniiskuste korral algusaegade jaanuar, juuli ja oktoober kohta.

Paneelide monteerimiseks jaanuaris, mille algusajaga simulatsioonides on kõige kõrgemaid jääküllastustasemeid, tuleks joonise 54 põhjal poorbetooni algniiskus kuivatada vähemalt 20% peale. Algniiskusega 20% on väliskooriku veeküllastus vaid mõned päevad üle kriitilise piiri.

Kui paneeli mõlemale poolele määrata väliskliima, imiteerib see olukorda, kus paneel on monteeritud, aga hoone ei ole veel küttesse lülitatud. Kuna ekstreemsemad jää küllastussisalduse näitajad esinevad endiselt õhemas 80 mm poorbetoonkoorikus, on joonisel 55 käsitletud selle kooriku näitajaid.

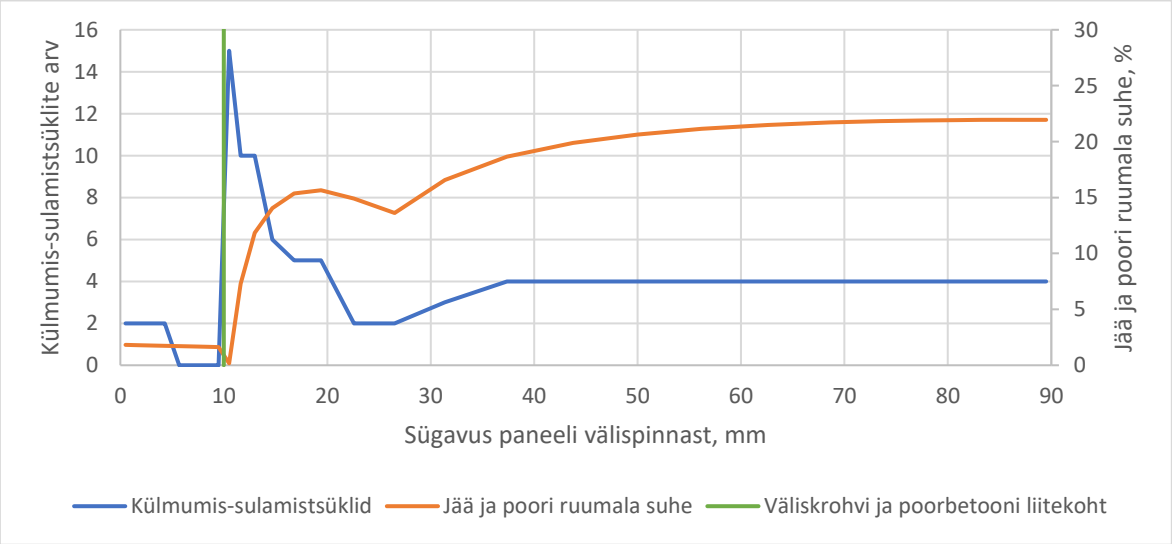


Joonis 55. Vee ja jää küllastus mõlemalt poolt väliskliimaga paneeli väliskoorikus 26,5 mm sügavusel.

Kui võrrelda 70% algniiskusega ja jaanuari algusajaga simulatsioone (joonised 53 ja 55), siis sisemise kütte korral on esimese kuu lõpus (28 jaanuar) maksimaalne jää küllastus 12% juures, ilma kütteta tingimustes aga 22% juures. Ka vee küllastussisaldus on mõlema algniiskuse korral ligikaudu kaks korda kauem üle kriitilise piiri, kui seestpoolt köetud paneeli simulatsioonides.

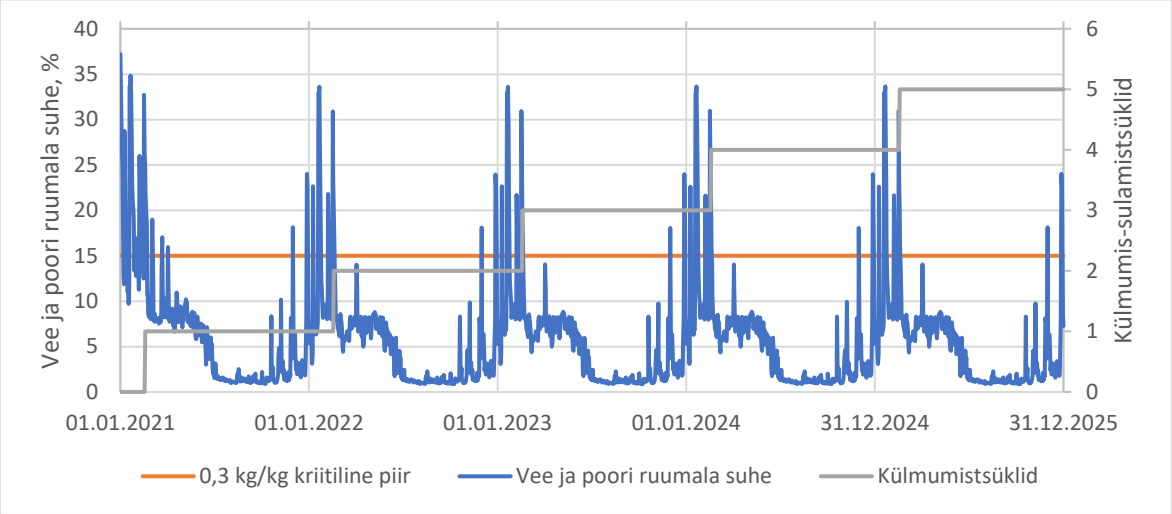
3.5.2 Väliskooriku külmakindlus hallituse testaastaga

Lisaks koostati simulatsioonid ka hallituse testaastale. Kõige suuremaid jää ja poori ruumala suhteid esines taas jaanuaris.

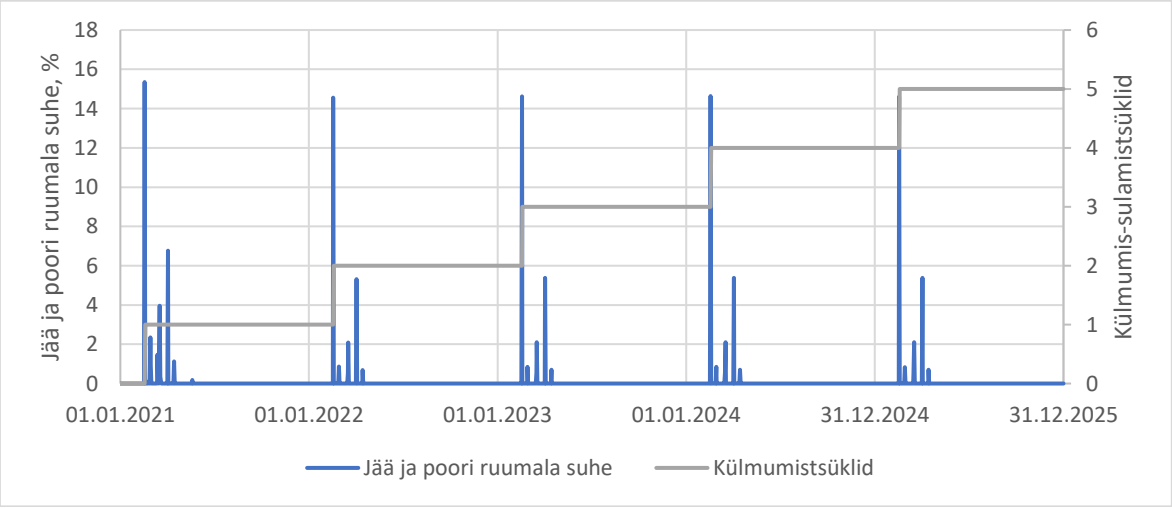


Joonis 56. Külmumis-sulamistsüklite arv ning jää ja poori ruumala maksimaalne suhe erinevatel sügavustel algusajaga jaanuar algniiskusega 70% hallituse testaasta korral.

Eelnevalt graafikult on näha, et kõige suuremat külmumis-sulamistsüklite koormust saab arvutuskiht väliskrohvi lähedal. Samas jää küllastussisaldus on oluliselt kõrgem 15-20 mm sügavusel välispinnast. Kahte kriteeriumit koos vaadates võib kriitiliseks arvutuskihiks nimetada 16,8 mm sügavusel oleva, mis on 10 mm väljapool kui kondensaadi testaasta puhul. Järgnevalt selle kihi kohta vee ja poori ruumala ning jää ja poori ruumala suhte graafikud 5 aasta jooksul.



Joonis 57. Vee ja poori ruumala suhe 5 aasta jooksul 16,8 mm sügavusel asuvas arvutuskihis 70% algniiskuse korral algusega jaanuar.

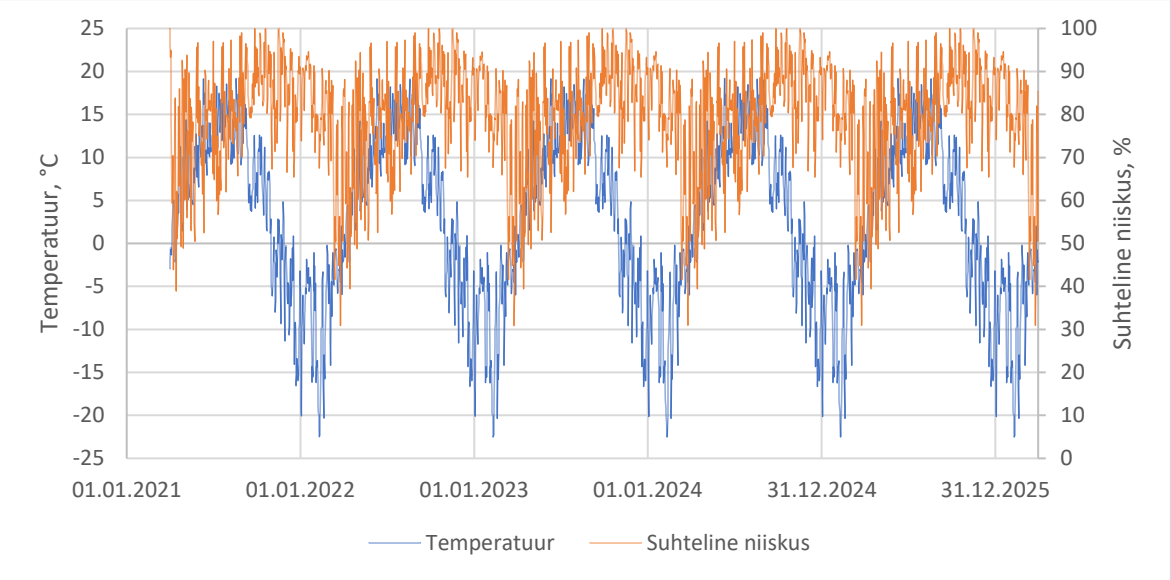


Joonis 58. Jää ja poori ruumala suhe 5 aasta jooksul 16,8 mm sügavusel asuvas arvutuskihis 70% algniiskuse korral algusega jaanuar.

Hallituse testaasta korral esineb kõrget vee küllastussisaldust oluliselt rohkem kui kondensaadi testaasta puhul ja seda eelkõige aastavahetuse ajal. Siis esineb ka külmumis-sulamistsükleid ja jää teket. Külmumis-sulamistsükleid esineb poole vähem kui kondensaadi testaastal, maksimaalne jää küllastustase on 15% juures ehk poole väiksem kui kondensaadi testaastal.

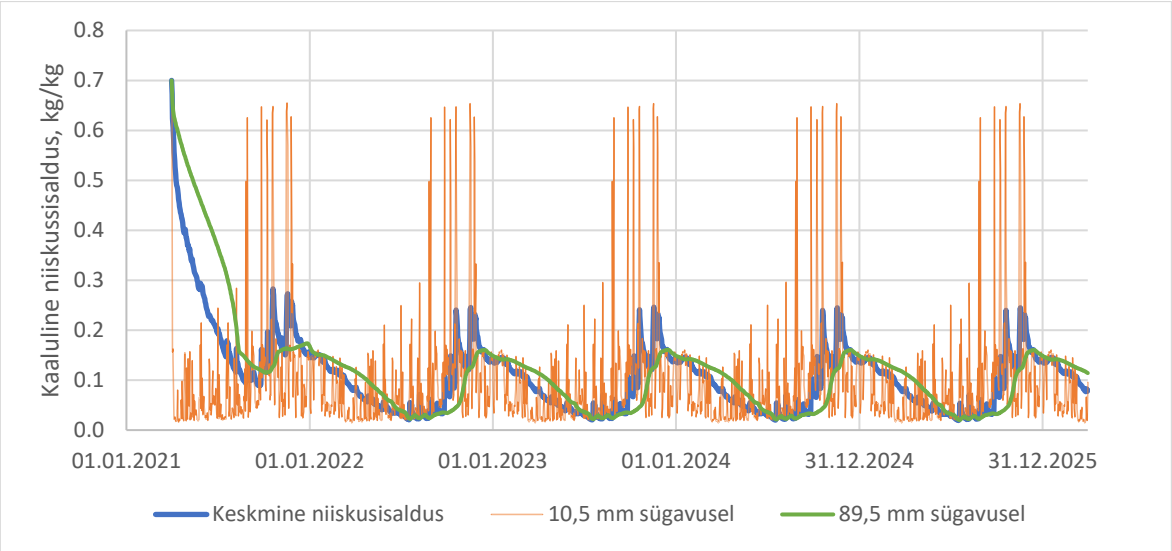
3.5.3 Väliskooriku pinnaniiskus

Välimise poorbetoonkooriku kõige väliskrohvile lähemal paikneva arvutuskihi temperatuur ja suhteline niiskus on esitatud joonisel 59. Lisaks on joonisel 60 võrdlemiseks toodud väliskooriku keskmine ja äärmiste kihtide niiskussisaldus.



Joonis 59. 70% algniiskus, algusaeg aprill, 10,5 mm sügavusel välispinnast poorbetooni arvutuskihi temperatuur ja suhteline niiskus (24h keskmised näidud)

5 aasta kõige madalam temperatuur vaadeldaval sügavusel esineb 21. detsembril, kui temperatuur on -22,8°C. Arvutuskihi keskmine temperatuur on 2,9°C. Negatiivseid temperatuure esineb 40% päevadest. Negatiivsete temperatuuride keskmine on -7,1°C. Suhtelise niiskuse tase on sel hetkel 68%, mis vastab kaalulisele niiskusele 2,7%. Proovides samaaegselt madala temperatuuri ja kõrge suhtelise niiskuse taseme järgi võimalikult kriitilist ajahetke määrata võib nimetada esimese arvutusaasta 27. detsembrit. Siis on arvutuskihi temperatuur -15,9°C ja suhtelise niiskuse tase 90,2%. Sel ajal on poorbetooni kõige välimises arvutuskihis niiskus 0,14 kg/kg ja soojustuse lähedal 0,17 kg/kg ehk allpool kriitilist piiri. Samas esinevad sellest kõrgemad suhtelise niiskuse tasemed ka novembris samaaegselt negatiivsete temperatuuridega.

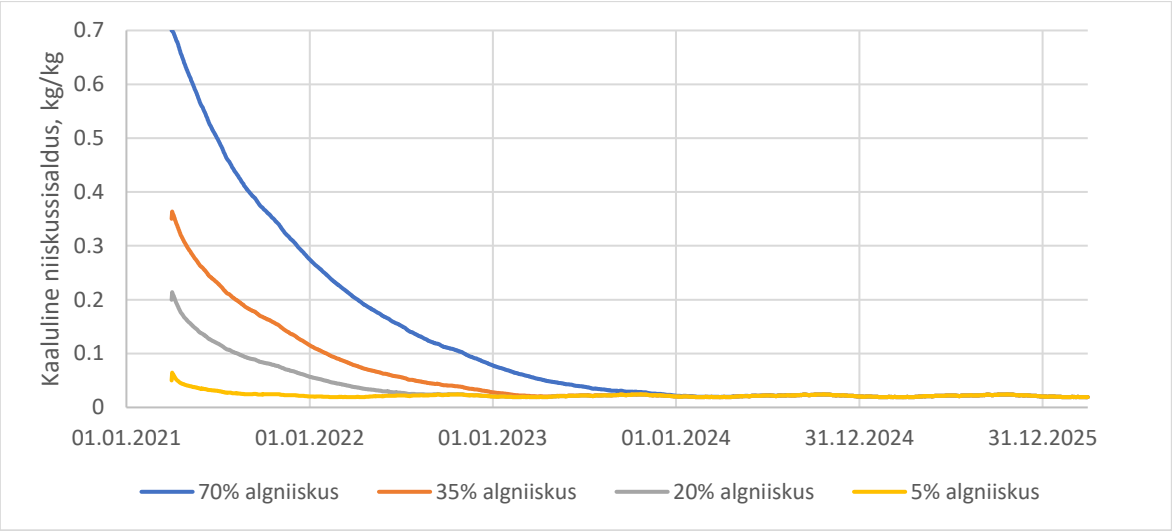


Joonis 60. Väliskooriku keskmine ja kahe äärmise arvutuskihi niiskussisaldus 5 aasta jooksul 70% algniiskuse korral algusajaga aprill.

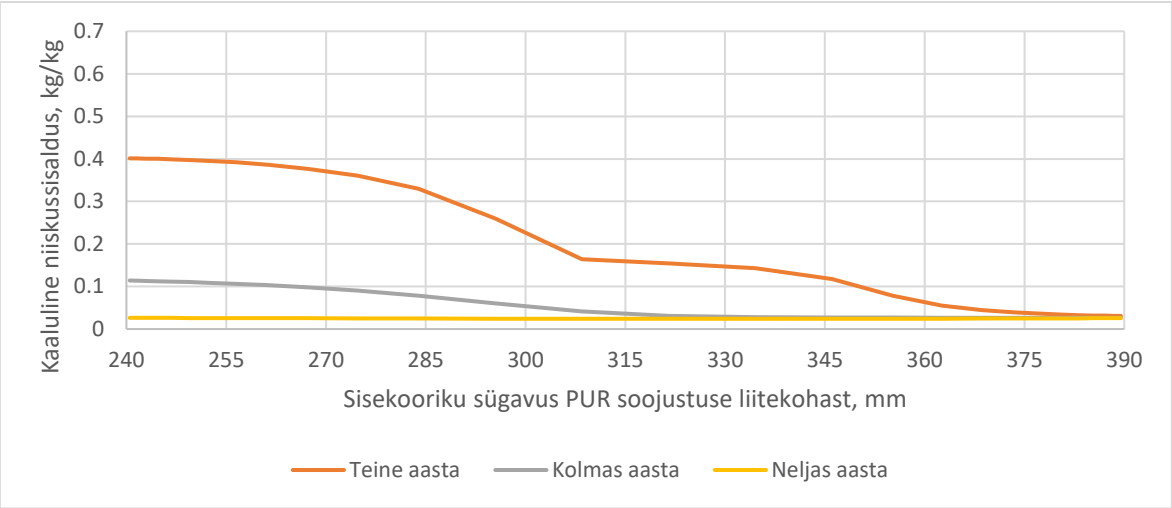
Kaaluline niiskus tõuseb oluliselt sügiskuudel oktoobris ja novembris. Joonist 59 vaadates on sel ajal välimise arvutuskihi temperatuur 0°C ja 10°C vahel. Peale algniiskuse väljakuivamist ei tõuse väliskooriku keskmine ja kõige soojustuse lähedasema kihi kaaluline niiskus üle kriitilise piiri 0,3 kg/kg. Väliskooriku välispinna lähedal olevates kihtides tõuseb näitaja aga oktoobri algusest kuni detsembri keskpaigani kaks korda kõrgemale kriitilisest piirist ja sel ajal esineb arvutuskihis ka negatiivseid temperatuure.

3.5.4 Sisekooriku väljakuivamine, soojusläbivus ja niiskusvoog

Sisekooriku väljakuivamise kestus on näha joonisel 61. Simulatsioon on tehtud olukorrale, kus sisekoorik on kaetud 3 mm sisepahtliga, mille difusioonitakistus on 25 ja veeimavus 0,052 kg/(m^2·s^{0,5}). Kuigi simulatsioonis kuivab poorbetoon umbes 2% kaalulise niiskussisalduseni, siis peatükis 3.2 toodud katsetulemuste järgi võib väljakuivanuks lugeda juba 5-6% kaalulise niiskussisaldusega poorbetooni.



Joonis 61. Sisekooriku keskmine kaaluline niiskussisaldus erinevate algniiskuste korral. Sisekoorik on simulatsioonis kaetud 3 mm sisepahtliga. Algusaeg on aprill.

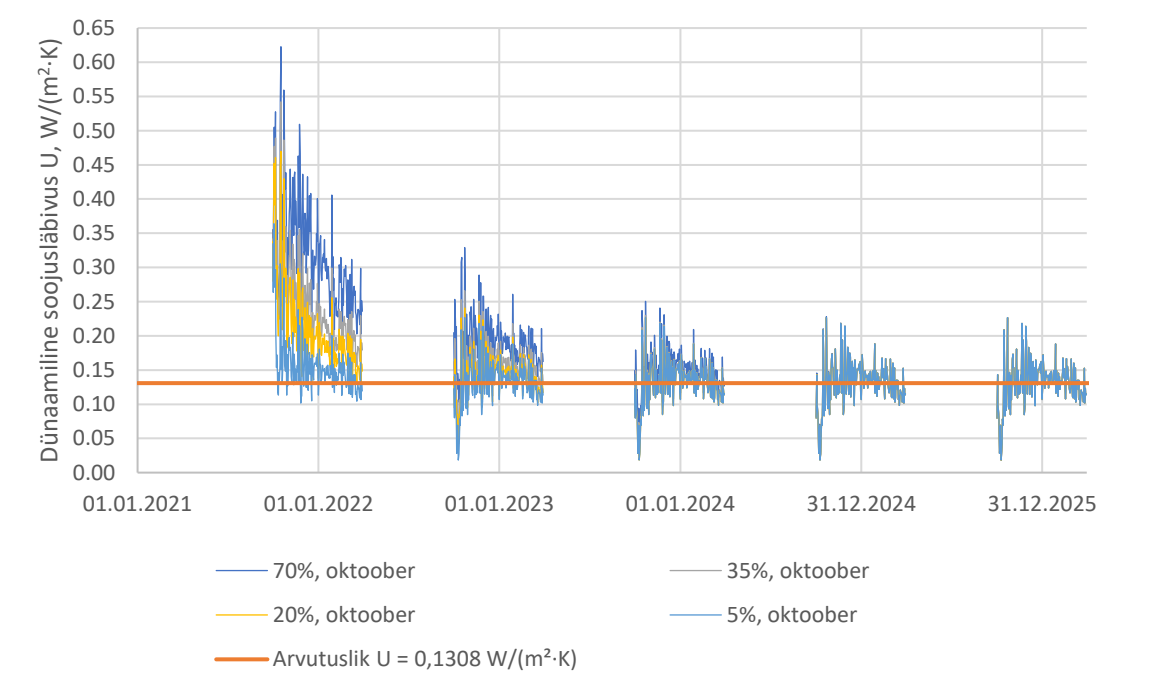


Joonis 62. Sisekooriku erinevate sügavuste maksimaalsed niiskussisaldused teisel, kolmandal ja neljandal aastal 70% algniiskuse korral algusajaga aprill.

70% algniiskusega poorbetoonpaneeli sisekoorik kuivab peale kütte sisselülitamist tasakaaluniiskuseni vähemalt 2,5 aastat, 35% algniiskusega paneel 1,5 aastat ja 20% algniikusega paneel 1 aasta. Kuivamine algab sisepinna lähedalt difusiooni teel ja siis toimub PUR soojustuse kihi lähedal oleva niiskuse peamiselt kapillaarsel teel ümberjaotumine. Joonisel 62 on toodud sisekooriku kaaluline niiskussisaldus erinevatel sügavustel. Näidatud on väljakuivava sisekooriku teise, kolmanda ja neljanda aasta maksimaalsed niiskussisaldused (esimesel aastal oleks maksimaalne niiskussisaldus algniiskus). Esimese aasta järel on sisepinnast kuni 30 mm sügavuseni jõudnud sisekoorik difusiooni teel toa poole välja kuivada, kuid PUR soojustuse lähedal on niiskussisaldus veel 40% juures.

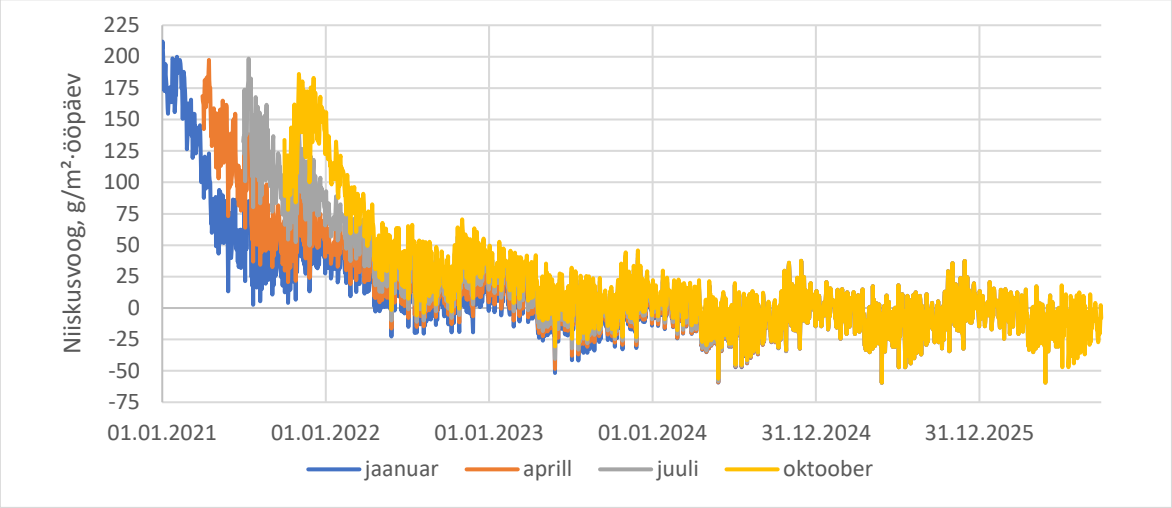
Sisekooriku algusaastatel suuremast niiskussisaldusest tingitud suurenenud soojusläbivuse ja küttevajaduse hindamiseks koostati soojusvoo graafikud ja jagati tulemused läbi temperatuurierinevusega kahel poole paneeli pinda. Kui poorbetoon on välja kuivanud oma tasakaaluniiskuse juurde, muutub paneeli soojusvoog vahemikus 6 kuni -2 W/m^2. Kõrgeim soojusvoog on 12 W/m^2 jaanuari algusajaga simulatsiooni puhul. Küttevajadus (kui soojusvoog on positiivne) on septembrist mai kuuni. Erinevate aastate soojusvooge võrreldes selgub, et esimese aasta küttevajadus on umbes 2,7 korda ning teise aasta küttevajadus umbes 1,6 korda suurem kui viienda arvutusaasta küttevajadus, mil paneel on välja kuivanud.

Soojusvoo ja temperatuurierinevusena saadud dünaamilist soojusläbivust saab vaadelda kütteperioodil, kui soojusvoog siseruumist välja on positiivne. Esimesel kahel aastal ulatub paneeli dünaamiline soojusläbivus kuni 0,6 W/(m^2·K). Arvutustes on poorbetooni soojuserijuhtivusena kasutatud Delphini kataloogis olnud materjali Cellular Concrete λ = 0,1 W/(m·K). Arvestades, et suurema tihedusega või suurema niiskussisaldusega poorbetoonidel on see näitaja ca 0,13...0,16, on soojusläbivus algul veelgi suurem. Kui soojuserijuhtivus oleks λ = 0,13 W/(m·K), siis arvutuslik soojusläbivus on U = 0,14 W/(m^2·K). Arvutustulemused algavad 1. oktoobrist ja näitavad soojusläbivuse muutust kütteperioodil 1. oktoober kuni 1. aprill. Neljandal kütteperioodil on kõikide algniiskuste soojusläbivused ühtlustunud. 35% algniiskuse korral on neljanda kütteperioodi keskmine soojusläbivus 0,131 W/(m^2·K), mis on väga lähedane arvutuslikule soojusläbivusele 0,131 W/(m^2·K). Dünaamiline soojusläbivus on toodud joonisel 63.



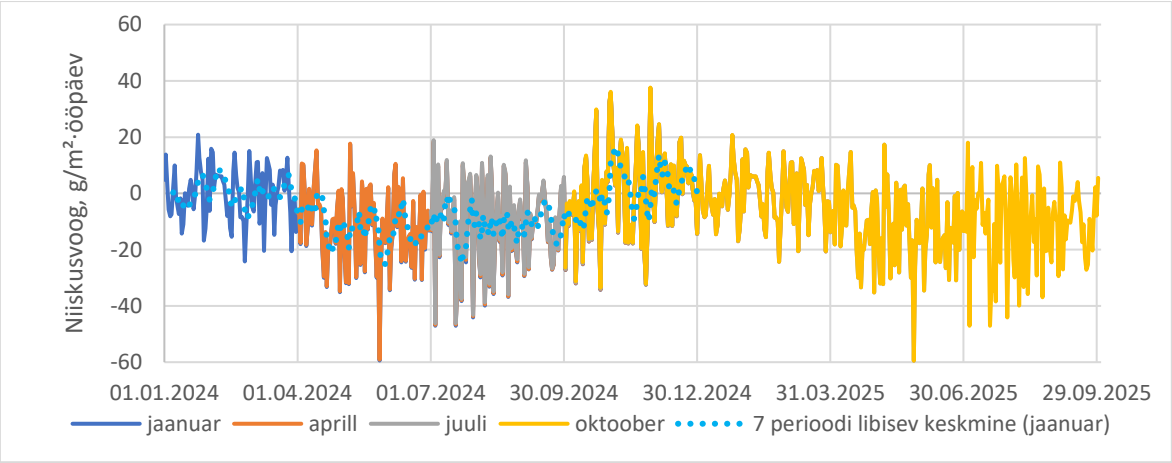
Joonis 63. Dünaamiline soojusläbivus 5 aasta jooksul.

Järgnevad 2 joonist kirjeldavad niiskusvoo muutumist, mille järgi saab hinnata, millal paneel kuivab sisekeskkonda ja väliskeskkonda.



Joonis 64. Paneeli 5 aasta niiskusvoog erinevate algusaegade korral 70% algniiskusega.

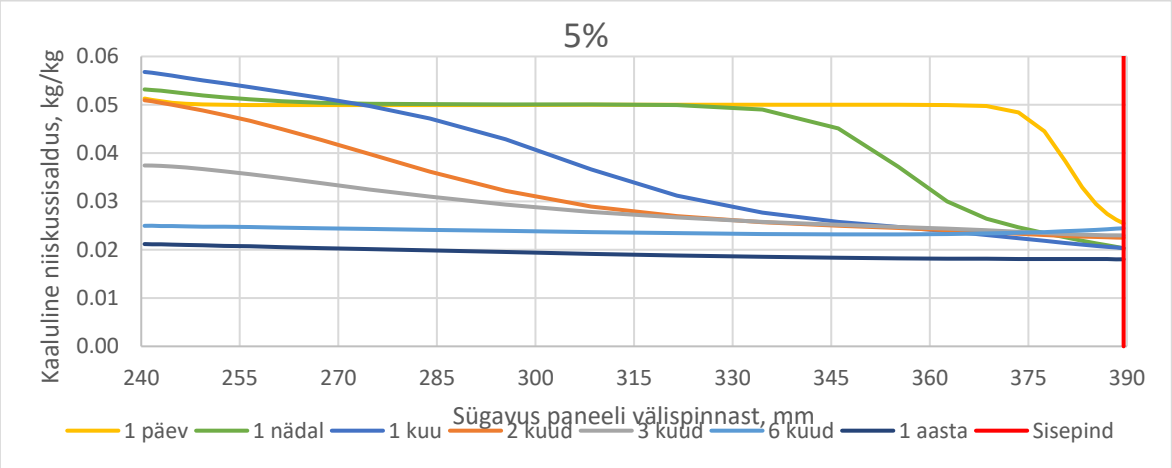
Nii 70% kui 35% algniiskuse korral muutub niiskusvoog esmakordselt negatiivseks teise arvutusaasta aprillis, kui paneeli sisekooriku niiskus väliskeskkonda vähesel määral kuivama hakkab. Oluliselt mõjutab tulemusi valitud sisekeskkonna temperatuur, suhtelise niiskuse tase ja niiskuslisa, mis vaadeldaval juhul on kondensaadi testaasta välitingimuste järgi arvutatud niiskusklassile 3 vastav. Erinevate algusaegade niiskusvoo tulemused ühtlustuvad 3 aasta jooksul. Joonisel 65 olev 7 perioodi keskmine moodustab päevadest 1-7 graafikule esimese punkti, päevadest 2-8 teise punkti jne. Keskmistatud väärtuste järgi on selgemalt näha, et aprillist septembrini on niiskusvoog pigem negatiivne ehk sisepind saab kuivada välikeskkonna poole. Selle põhjus võib olla väljakuivanud poorbetooni madalam suhteline niiskus sisekeskkonnas oleva õhu suhtelisest niiskusest. Talvel on niiskusvoog pigem nullilähedane.



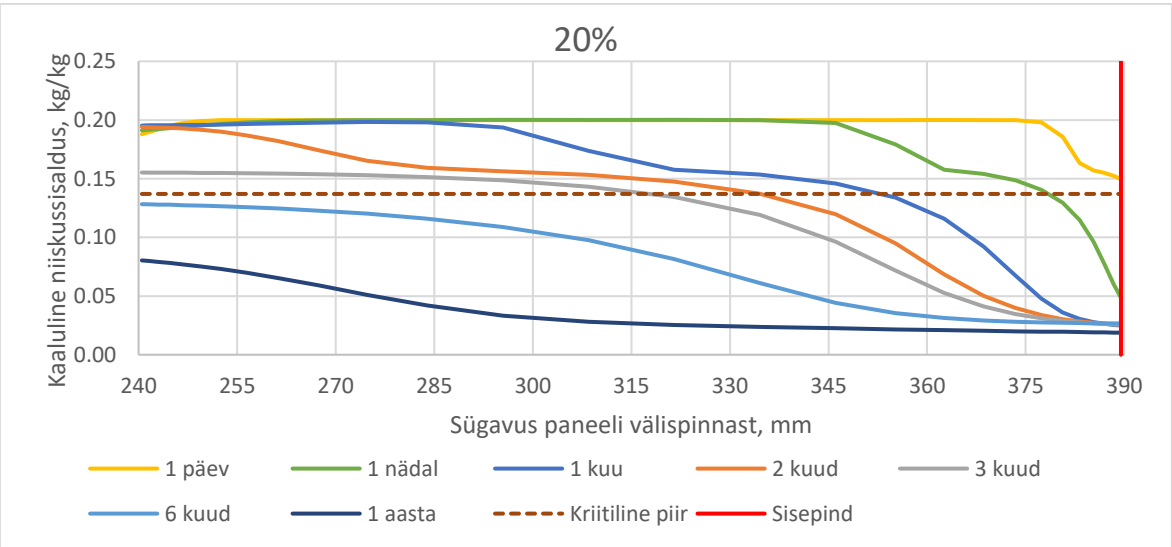
Joonis 65. Paneeli niiskusvoog väljakuivanud olukorrale 1 aastase arvutusperioodi jooksul erinevate algusaegade kohta 70% algniiskusega.

3.5.5 Sisekooriku katmine viimistlusega

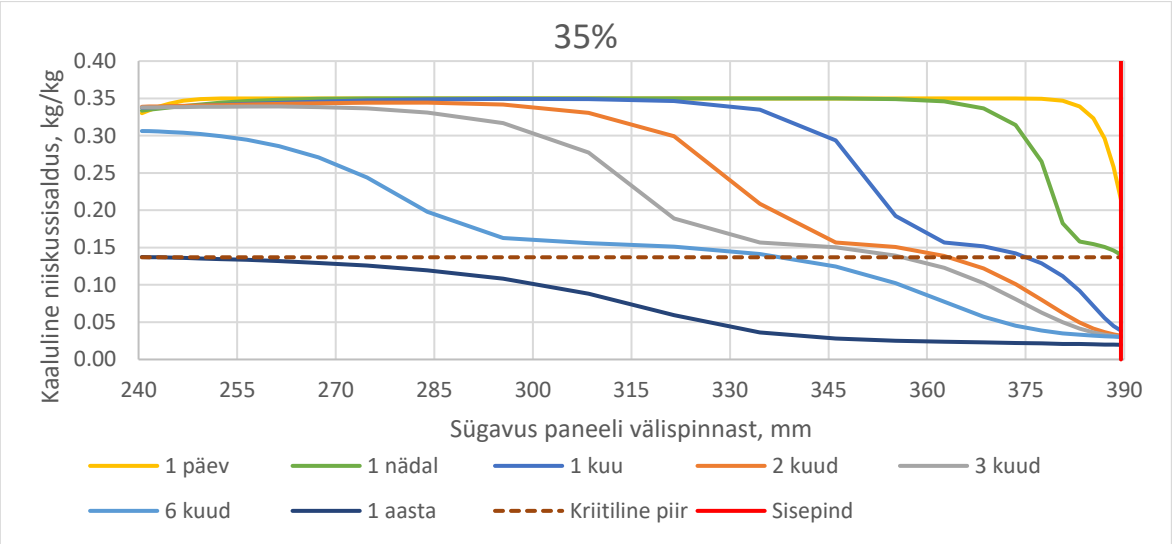
Sisekooriku pinnaniiskuse hindamiseks tehti esmalt ilma sisemise pahtlikihita väljakuivamise mudelid. See imiteerib monteerimisjärgset olukorda, mil paneeli pole seest viimistletud. Ajaks, mil paneel on seestpoolt viimistlemata, on valitud 1 päev, 1 nädal, 1 kuu, 2 kuud, 3 kuud, 6 kuud ja 1 aasta. Seejärel kasutati vastava aja kuivanud sisekooriku keskmist niiskussisaldust uues mudelis algniiskusena. Uues mudelis oli sisekoorik kaetud hüdroisolatsiooni ja keraamilise plaadiga. Fiiberkummist hüdroisolatsiooni paigaldamiseks peab aluspinna suhteline niiskus olema alla 90%. (*Kiilto Fibergum Tooteleht*, n.d.). Valitud poorbetooni puhul vastab sellele kaaluline niiskussisaldus 0,137 kg/kg. Järgnevad graafikud näitavad, kuidas jaotub niiskus ilma siseviimistluseta paneeli sisekoorikus erinevate arvutusperioodide järgselt.



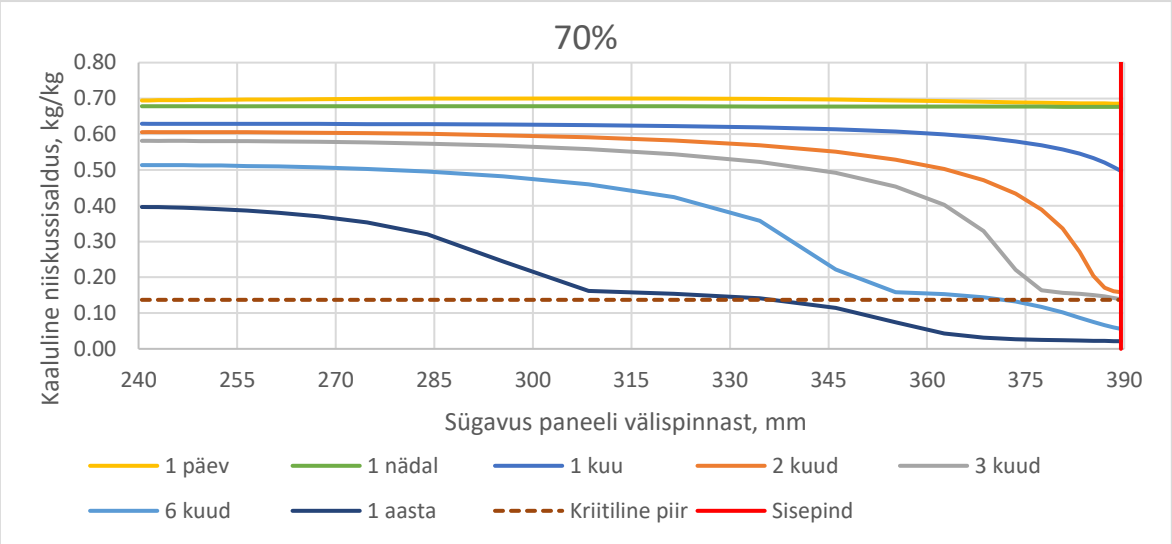
Joonis 66. Ilma siseviimistluseta sisekooriku väljakuivamine erinevate ajaperioodide jooksul 5% algniiskuse korral.



Joonis 67. Ilma siseviimistluseta sisekooriku väljakuivamine erinevate ajaperioodide jooksul 20% algniiskuse korral.



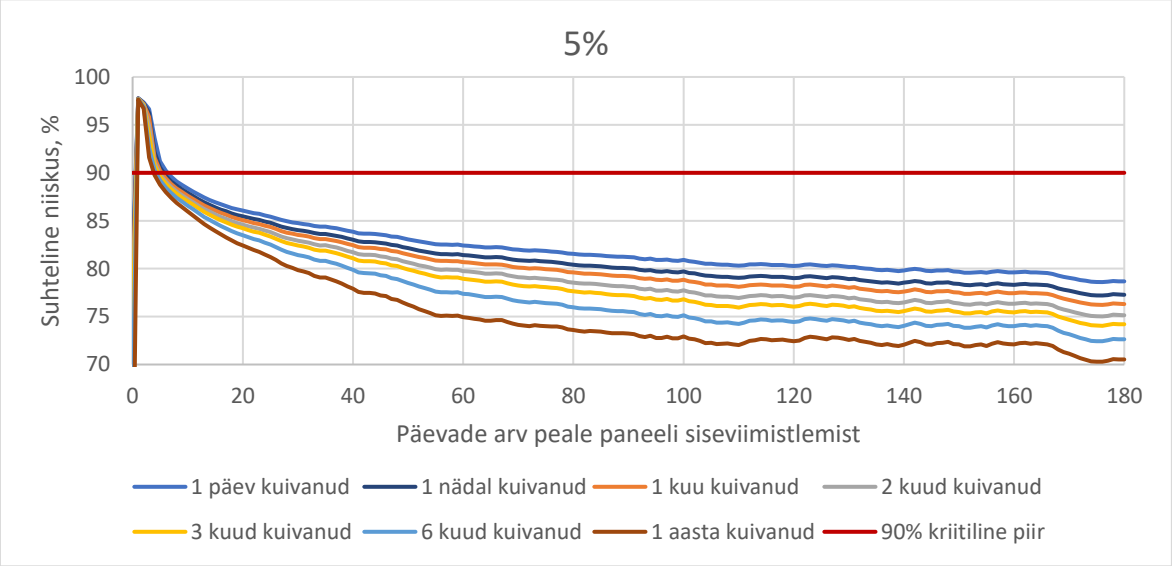
Joonis 68. Ilma siseviimistluseta sisekooriku väljakuivamine erinevate ajaperioodide jooksul 35% algniiskuse korral.



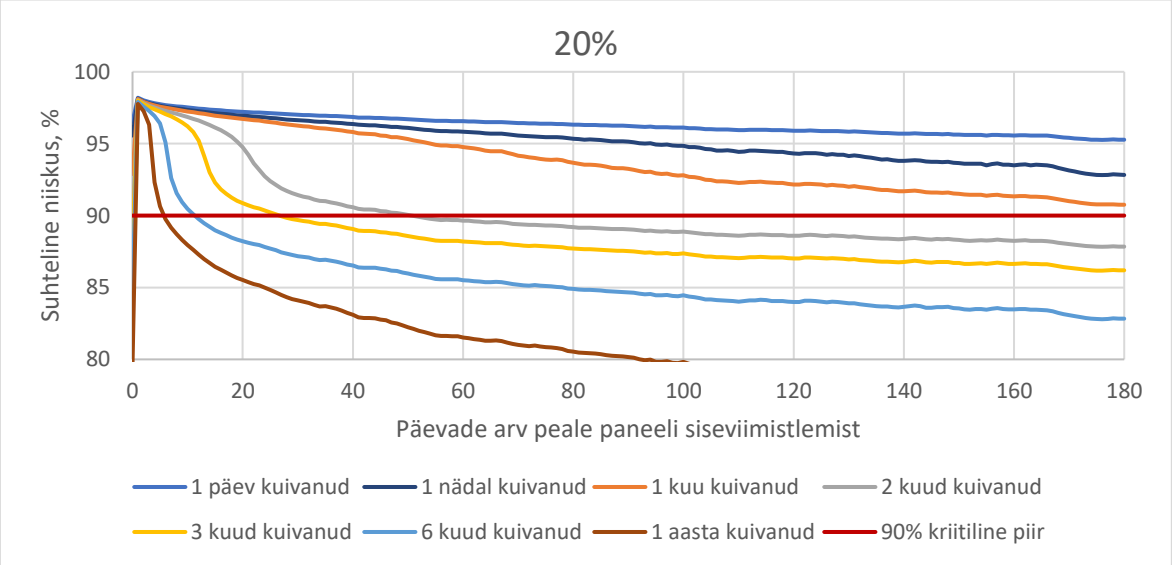
Joonis 69. Ilma siseviimistluseta sisekooriku väljakuivamine erinevate ajaperioodide jooksul 70% algniiskuse korral.

Joonistel 66-69 on punasega tähistatud sisepind, mille läheduses pinna viimistlusvalmidust vaadata. 70% algniiskuse korral on sisepind alla 90% suhtelise niiskusega vähemalt 2 kuud ilma viimistluseta kuivades. 35% algniiskuse korral on vaja kuivada 1 nädal. 20% algniiskuse korral mõned päevad. 5% algniiskus on alla kriitilist piiri. Samas on taoline olukord vaid sisepinnast 10 mm sügavusel ja sellest sügavamal on oluliselt kõrgemad niiskustasemed, mis sisepinna hüdroisolatsiooniga katmise korral ümber jaotuvad ja hüdroisolatsiooni taga lubatud kriitilist piiri ületavad. Selle olukorra kirjeldamiseks tehti edasised simulatsioonid kaetud sisepinnaga.

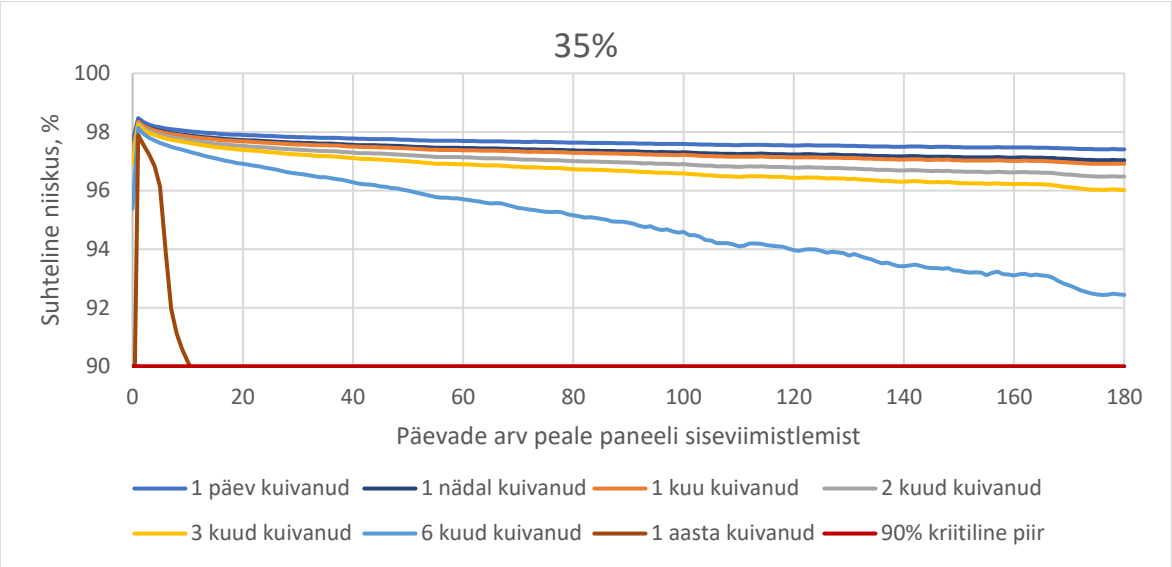
Järgnevad graafikud näitavad suhtelise niiskuse taset poorbetoonist sisekooriku kõige sisekeskkonna poolsemas arvutuskihis siseviimistluse liitekoha lähedal. Poorbetoonile on algniiskusena rakendatud eelnevatel joonistel 66-69 toodud vastava aja kuivanud sisekooriku keskmine niiskussisaldus. Joonistel on näidatud vastava aja kuivanud arvutuskihi tulemused. Sisekoorik on kaetud 3 mm pahtlikihiga, mille peal on fiiberkummist hüdroisolatsioon veeaurutakistusega S_d = 1,8 m (*Kiilto Fibergum Tooteleht*, n.d.) ja keraamilise plaadiga S_d = 1 m (*Construction Materials Manual - Manfred Hegger, Volker Auch-Schwelk, Matthias Fuchs, Thorsten Rosenkranz - Google Books*, n.d.), kokku veeaurutakistus S_d = 2,8 m.



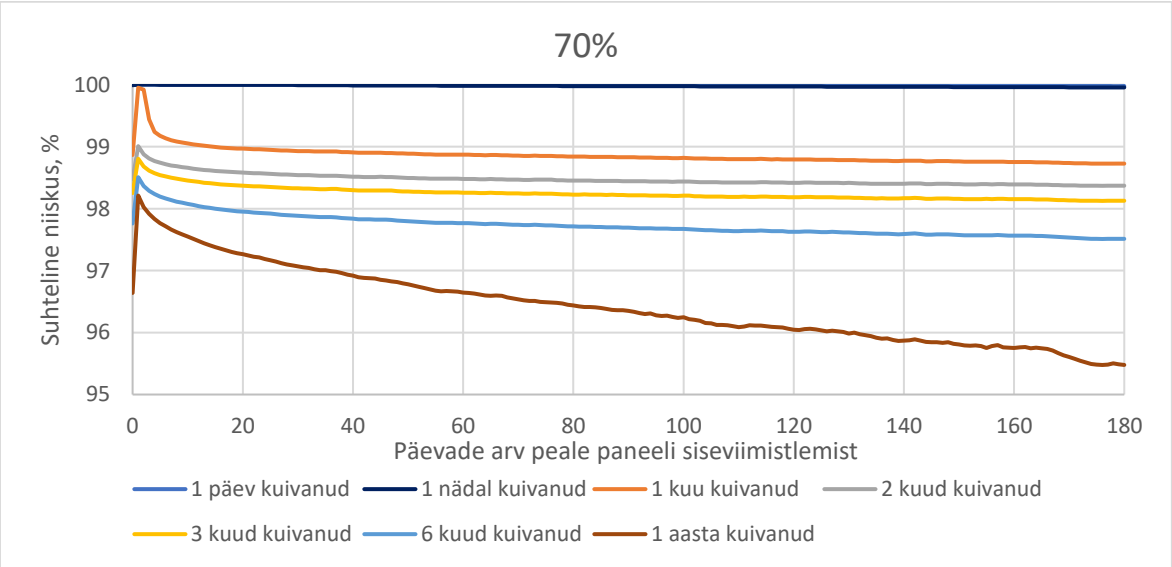
Joonis 70. Poorbetoonist sisekooriku sisepinna lähedal asuva arvutuskihi suhteline niiskus 6 kuu jooksul 5% algniiskuse korral.



Joonis 71. Poorbetoonist sisekooriku sisepinna lähedal asuva arvutuskihi suhteline niiskus 6 kuu jooksul 20% algniiskuse korral. Vertikaaltelje skaalat on taotluslikult muudetud.



Joonis 72. Poorbetoonist sisekooriku kõige sisemise arvutuskihikihi suhteline niiskus 6 kuu jooksul 35% algniiskuse korral.



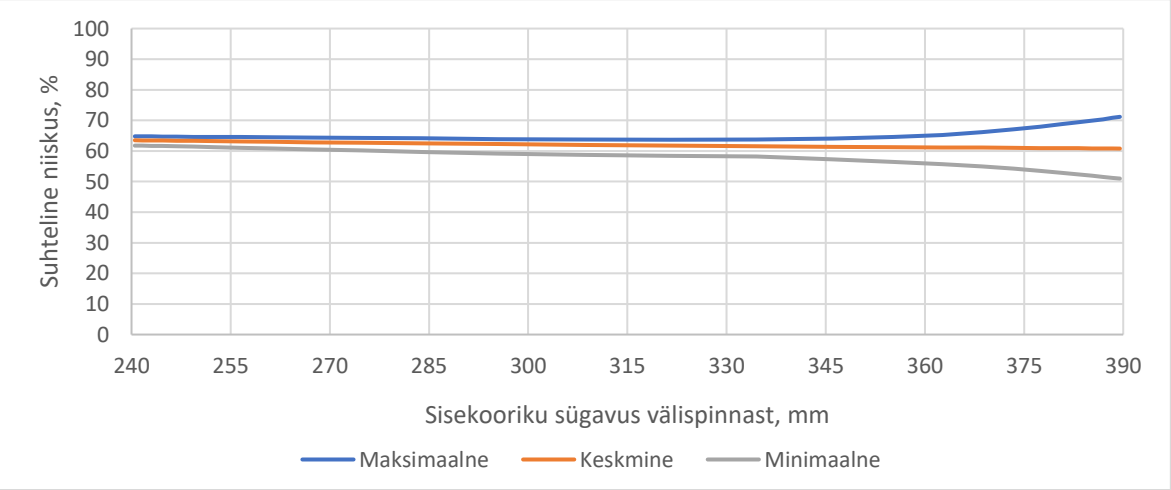
Joonis 73. Poorbetoonist sisekooriku kõige sisemise arvutuskihikihi suhteline niiskus 6 kuu jooksul 70% algniiskuse korral.

5% algniiskuse joonisel 70 algavad simulatsioonid suhtelise niiskuse vahemikus 52-80%, aga 1 päev peale hüdroisolatsiooniga katmist on suhtelise niiskuse tase 97-98%. Algniiskuse tase on aga piisavalt madal, et 6 päeva möödudes oleks suhteline niiskuse taas alla kriitilist piiri. 20% algniiskusega sisekooriku võis pinnaniiskuse taseme poolest katta juba 1 nädalaga. Joonis 71 näitab aga, et sellisel juhul on 1 päev hiljem hüdroisolatsiooni taga 98% suhteline niiskus, mis hiljem ei lange alla 90% ka 6 kuu möödudes. Sama ilmneb ka 35% graafiku puhul. Kui 20% algniiskuse korral lasta paneelil 2 kuud ilma siseviimistluseta kuivada ning siis katta, langeb suhteline niiskus alla kriitilise piir 50 päeva pärast hüdroisolatsiooniga katmist.

35% ja 70% algniiskuse korral peab aga ebamõistlikult kaua sisekoorik kuivama, et kriteerium täidetud oleks.

Poorbetoonil on võime puhverdada ja tasakaalustada siseõhu niiskust. Peatükis 1.1.1 on viidatud, et poorbetooni on sellel põhjusel kasutatud isegi muuseumi hoidlate seinamaterjalina. Joonisel 74 on toodud väljakuivanud olukorras vaadeldava paneeli sisekooriku ja siseõhu suhtelise niiskuse erinevused. Sisepinna lähedal on erinevus kõrgem siseõhust kaasatud niiskuse tõttu ning sügavamale liikudes erinevus järjest väheneb kuni hakkab taas tõusma sisekooriku enda niiskussisalduse tõttu. Joonise 74 põhjal võib öelda, et siseõhu niiskuspuhverdamisele aitab kaasa ligikaudu 60 mm poorbetooni. Seda kinnitab ka väljakuivanud sisekooriku suhteline niiskus suvel (joonis 75). Maksimaalse, keskmise ja minimaalse suhtelise niiskuse kõverate lahknemine toimub sisepinnast umbes 60 mm sügavusel. Poorbetooni niiskuspuhverdamise võime põhjalikumal analüüsil tuleks aga arvestada nii sisekeskkonna mõju välisseinale kui välisseina mõju sisekeskkonnale ehk nn whole building modelling põhimõtteid.

Joonis 74. Siseõhu ja poorbetooni arvutuskihtide keskmise suhtelise niiskuse erinevus väljakuivanud poorbetoonile viiendal arvutusaastal. Võrreldud iga arvutuskihi ja siseõhu aasta keskmist väärtust. Simulatsiooni algusaeg oli aprill, algniiskus 70%.



Joonis 75. Sisekooriku maksimaalne, keskmine ja minimaalne suhteline niiskus väljakuivanud olukorras 5. arvutusaasta suvel 3 kuu jooksul.

4 JÄRELDUSED

- Hoone on tänu poorbetooni madalale soojuserijuhtivusele sõlmelahendustes arvutuslikult hästi toimiv. Temperatuuriindeksid on vahemikus 0,84…0,96, aknasõlmel 0,76…0,77 ja külmasilla joonsoojusläbivused 0,01…0,08 W/(m·K). Kui hoone monteerida täpselt ja pöörata tähelepanu liitekohtade tihendamisele, on kondenseerumisrisk sõlmedes väga väike. Betoonist lintvundamendi korral ei pruugi toimivus olla piisav. Välisseinte välisnurga sõlmes soojustuse kokkuviimine oluliselt toimivust ei muuda, sõlm on toimiv ka poorbetoonist katkestuse korral.
- Väliskooriku maksimaalne veeküllastus jäätumise perioodil on 37%, mis ületab kriitilist piiri 15%.
- Kõige kriitilisem arvutussügavus külmakahjustuste seisukohalt asub väliskrohvi ja väliskooriku liitekohast 5…15 mm sügavusel.
- Hallituse testaastaga on veega küllastus pikemat aega kõrgem kui kondensaadi testaastal korral.
- Sisekooriku kõrge algniiskus võib esimese aasta küttevajadust tõsta umbes 2,7 korda.
- Kõige halvem aeg monteerimiseks on jaanuar, kuna kõrge algniiskusega paneel satub miinuskraadide kätte, mille tõttu poorides olev vesi saab koheselt külmuda. Paneeli külmakindlus on probleem ja väliskoorik satub tõenäoliselt tingimustesse, kus ta teaduskirjanduse kohaselt ületab kriitilist piiri. Seega tuleb materjaliarenduses ja paneelide monteerimisel ette näha täiendavad abinõud, eriti juhul kui monteerimine peaks toimuma talvekuudel.
- Paneeli väliskooriku eelkuivatamine on abiks eelkõige juhul, kui monteerimine toimub jaanuaris. Algniiskus võiks siis olla alla 20%.
- Hilisemal ekspluatatsioonil on väliskooriku kõrgeim niiskussisaldus oktoobrist detsembrini. Simulatsioonides ületas ka väljakuivanud poorbetoonkoorik sel ajal kriitilist piiri 15% veeküllastust ja välistemperatuur oli sel ajal alla 0°C.
- Väliskrohvi veeimavuse parameetril on külmakindluse hindamise arvutustulemustele väga suur mõju.
- Korterelamu välisseina deformatsioonivuukide laius nende 10 meetrise sammu korral võiks olla 10…15 mm, kuid see sõltub vuugimastiksi elastsusest.
- Sisekooriku võib 70% algniiskuse korral katta hüdroisolatsiooniga 2 kuu möödudes, 35% algniiskuse korral 1 nädala ja 20% algniiskuse korral mõne päeva möödudes, et hüdroisolatsioonile esitatav nõue pinnaniiskus alla 90% oleks täidetud. Samas tõuseb hüdroisolatsiooniga katmise korral suhtelise niiskuse tase poorbetoonis juba järgmisel päeval 97…98% juurde.

5 KASUTATUD KIRJANDUS

bauroc Eesti. (n.d.). *Autoklaavitud poorbetoonist bauroc (AEROC) sillused avade sildamiseks bauroc plokkseintes*. Retrieved March 29, 2021, from https://bauroc.ee/projekteerijale/tehnilised-naitajad/

bauroc Eesti. (2017a). *2. bauroc POORBETOONI TEHNILISED JA EHITUSFÜÜSIKALISED OMADUSED 2.1.*

bauroc Eesti. (2017b). *Tehnilised näitajad*. https://bauroc.ee/projekteerijale/tehnilised-naitajad/

Boggelen, W. Van. (2014). History of Autoclaved Aerated Concrete The short story of a long lasting building material. *Personal Publication*, *April*, 1–8. www.aircrete-europe.com

CO2 Emissions - Production. (n.d.). Retrieved February 14, 2021, from https://www.sustainableconcrete.org.uk/Sustainable-Concrete/Performance-Indicators/CO2-Emissions-Production.aspx

Concrete, A. A. (2011). *" Securing Bydgoszcz to celebrate of AAC experience in Poland*. 14–17.

Construction Materials Manual - Manfred Hegger, Volker Auch-Schwelk, Matthias Fuchs, Thorsten Rosenkranz - Google Books. (n.d.). Retrieved November 1, 2021, from https://books.google.ee/books?id=4c3TAAAAQBAJ&pg=PA277&lpg=PA277&dq=ceramic+tile+diffusion+resistance&source=bl&ots=W8_6ZoSPaV&sig=ACfU3U1d9E3UebPygSf2w31135M9VI2Prg&hl=et&sa=X&ved=2ahUKEwjTiaaJ-vXzAhU6i8MKHY6BBQkQ6AF6BAgQEAM#v=onepage&q=ceramic tile diffusion resistance&f=false

Copyright, & Ashrae. (2007). *Experimental Methods to Derive Hygrothermal Material Functions for Numerical Simulation Tools*.

Delphin 5 Help _ Manualzz.pdf. (n.d.).

Eesti Rahva Muuseum - bauroc Eesti. (n.d.). Retrieved February 14, 2021, from https://bauroc.ee/reference/eesti-rahva-muuseum/

Eskusson, K. (2001). *Autoklaavitud gaassilikaat*.

EVS-EN 12602:2016. (n.d.). Retrieved November 20, 2021, from https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=64349&language=EnglishLanguage

EVS-EN 13788:2012. (n.d.). Retrieved December 17, 2021, from https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=29776&language=EstonianLanguage

EVS-EN 13914-1:2016. (n.d.). Retrieved December 20, 2021, from https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=58205&language=EstonianLanguage

EVS-EN 15304:2010. (n.d.). Retrieved November 20, 2021, from https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=57110&language=EnglishLanguage

EVS-EN ISO 10456:2008. (n.d.). Retrieved December 19, 2021, from https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=115585&language=EstonianLanguage

Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations. (1993). Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/PIR). *Http://Www.Excellence-in-Insulation.Eu/*, *1*(October 06), 1–33.

Feng, C., & Janssen, H. (2021). Hygric properties of porous building materials (VII): Full-range benchmark characterizations of three materials. *Building and Environment*, *195*(Vii), 107727. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107727

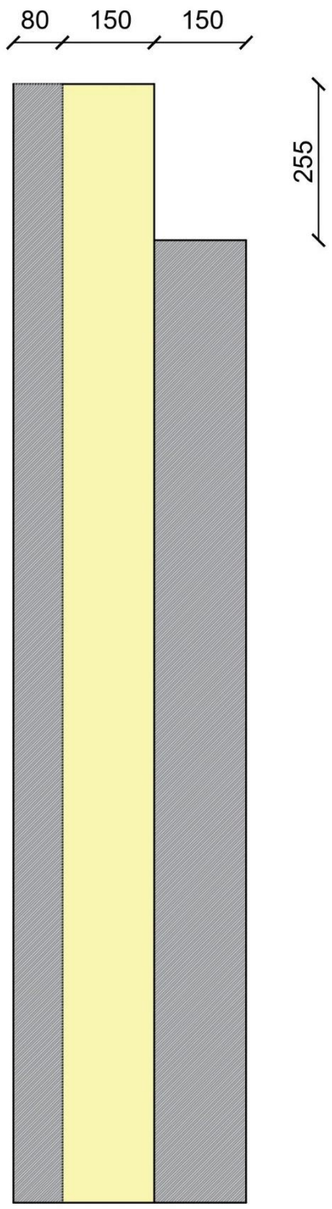
Fouad, F. H., & Schoch, T. (2018). AAC in the USA - A second look. *Ce/Papers*, *2*(4), E1–E6. https://doi.org/10.1002/cepa.902

Heat Transfer in Cook Stoves (Velocity) | Aprovecho. (n.d.). Retrieved October 1, 2021, from http://aprovecho.org/cleaner-burning-technologies/aprovecho-

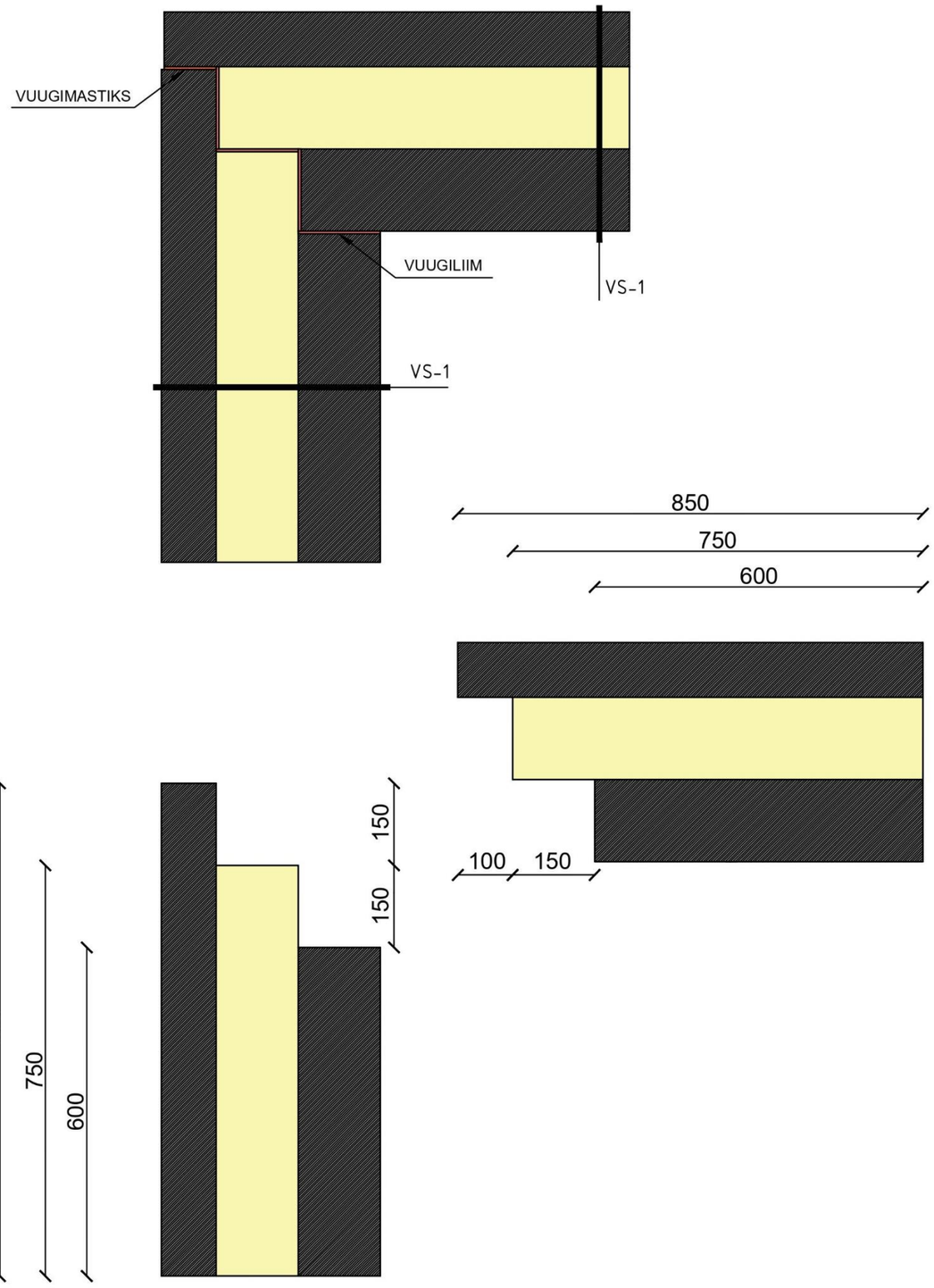
newsletter-august-22nd-2014/
Hebel. (2010). Section 5A : Guide to Designing with AAC. *Hebel Handbook*, 1–20. http://www.hebel-usa.com
Kiilto Fibergum tooteleht. (n.d.). Retrieved August 31, 2021, from http://www.kiilto.ee/ee/tooted/fibergum-hudroisolatsioonimastiks-sisetingimustesse/
Kivits, S.-L. (2018). *Ehituse ja arhitektuuri instituut EESTI KLIIMA MÕJU AUTOKLAAVITUD THE INFLUENCE OF ESTONIAN CLIMATE TO THE VOLUMETRIC CHANGE AND STRENGTH INDICATORS OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE MASONRY*.
Kočí, V., Maděra, J., Jerman, M., & Černý, R. (2018). Experimental Determination of Frost Resistance of Autoclaved Aerated Concrete at Different Levels of Moisture Saturation. *International Journal of Thermophysics*, *39*(6), 1–11. https://doi.org/10.1007/s10765-018-2398-8
Koitmäe, K. (2015). *Ehitustootluse instituut EESTIS KASUTATAVATE AUTOKLAAVITUD OMADUSED Hygric and thermal properties of commonly used autoclaved aerated concrete in Estonia*.
Laukaitis, A., & Fiks, B. (2006). Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Applied Acoustics*, *67*(3), 284–296. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.07.003
Lauri, T. (1967). *Roclite – 55 aastat poorbetooni eestis*. 1967.
Õiger, K. (2015). *Ehitiste renoveerimine*.
Otsmaa, V. (2014). *Betoonkonstruktsioonide arvutamine*.
Pehlivanli, Z., Calin, R., & Uzun, I. (2010). Effect of Moisture and Temperature on Thermal Conductivity of G2/04 Class Autoclaved Aerated Concrete. In *Asian Journal of Chemistry* (Vol. 22, Issue 5).
Qu, X., & Zhao, X. (2017). Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review. *Construction and Building Materials*, *135*, 505–516. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208
Raado, L.-M. (2018). *Ehitusmaterjalid*.
Seinte krohvimise põhitõed - bauroc Eesti. (n.d.). Retrieved December 20, 2021, from https://bauroc.ee/ehitajale/viimistlus/seinte-krohvimise-pohitoed/
Tapp-liitega Fibo standardplokk. (n.d.). Retrieved September 27, 2021, from https://www.ee.weber/fibo-plokitooted-ja-korsten/fibo-plokitooted/tapp-liitega-fibo-standardplokk
THERM Components | Windows and Daylighting. (n.d.). Retrieved November 20, 2021, from https://windows.lbl.gov/tools/knowledge-base/articles/therm-components
Toimivusdeklaratsioon Nr: BAU-998-0001. (2021). *10198948*, 10198948.
Toimivusdeklaratsioon Nr: CAP-998-4670128. (n.d.). Retrieved December 19, 2021, from www.caparol.lv
Toimivusdeklaratsioon Nr. 210CPR2013-07-01. (2021). *2021*(210), 2021. https://bauroc.ee/uploads/sites/2/2021/01/BAUROC-parandussegu-210CPR2013-07-01-2020.pdf
Zapotoczna-Sytek, G. (2018). Durability of autoclaved aerated concrete based on Polish experience. *Ce/Papers*, *2*(4), 53–62. https://doi.org/10.1002/CEPA.850
Zhang, H., Fang, W. Z., Li, Y. M., & Tao, W. Q. (2017). Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams. *Applied Thermal Engineering*, *115*, 528–538. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.057

LISA

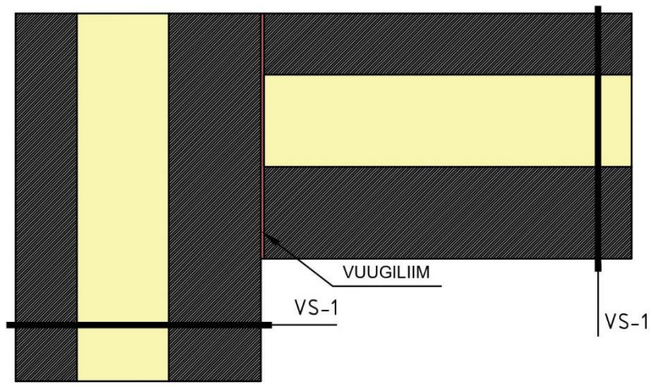
Paneeli külgvaade
M 1:10



Nurgasõlm variant 1
M 1:10



Nurgasõlm variant 2
M 1:10

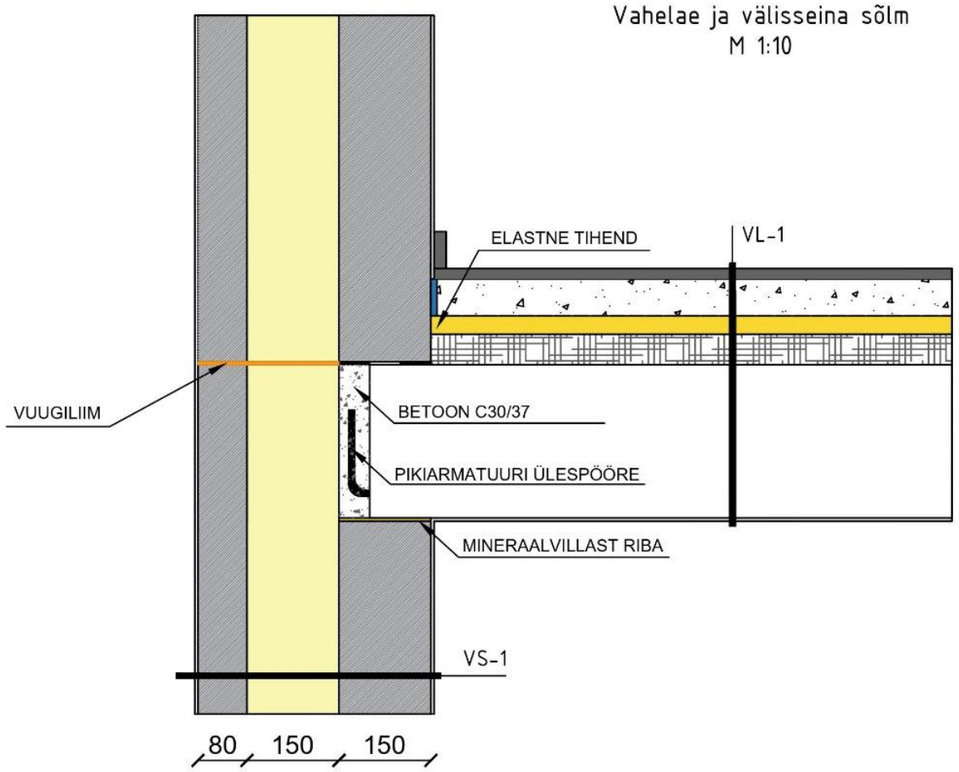


VS-1 U=0,13 W/m²·K

Väliskrohv	2 mm
Armeerimiskrohv	3 mm
Kolmekihiline poorbetoonpaneel polüuretaanist soojustusega	380 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

Nimetus	Paneeli külgvaade; Nurgasõlm	Tallinna Tehnikaülikool	
20.12.2021	Kristo Koppel	Mõõtkava 1:10	Leht 1

Vahelae ja välisseina sõlm
M 1:10



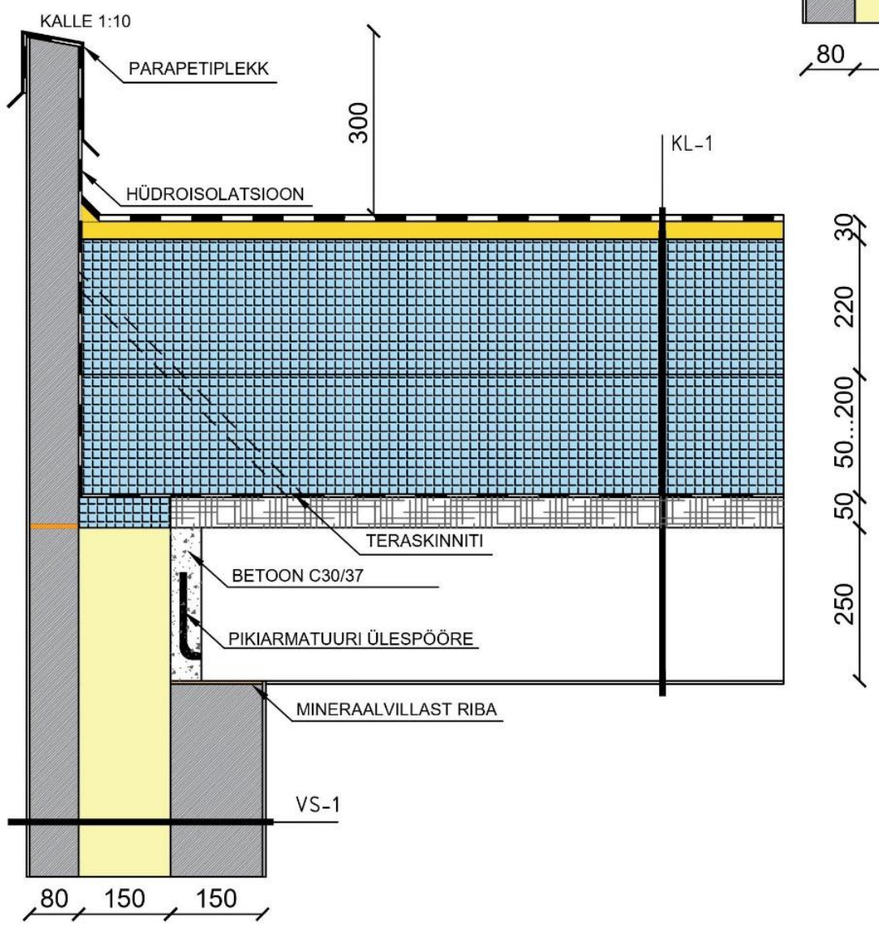
VL-1

Põrandakate	
Raudbetoonplaat	60 mm
PE kile	
Koormusttaluv villaplaat	30 mm
Kiudbetoon	50 mm
Poorbetoonist laepaneel	250 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

VS-1 U=0,13 W/m²·K

Väliskrohv	2 mm
Armeerimiskrohv	3 mm
Kolmekihiline poorbetoonpaneel polüuretaanist soojustusega	380 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

Lamekatuse ja välisseina sõlm
M 1:10



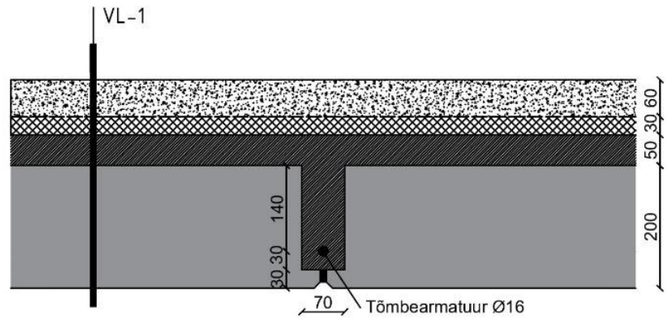
KL-1 U=0,10 W/m²·K

2xSBS kate	
Tuulutussoontega koormusttaluv villaplaat	30 mm
Vahtpolüstüreen EPS (λd ≤ 0,04 W/m·K)	220 mm
Vahtpolüstüreen EPS kaldega 1:60 (λd ≤ 0,04 W/m·K)	50...200 mm
Aurutõke 1xSBS	
Kiudbetoon	50 mm
Poorbetoonist laepaneel	250 mm

VS-1 U=0,13 W/m²·K

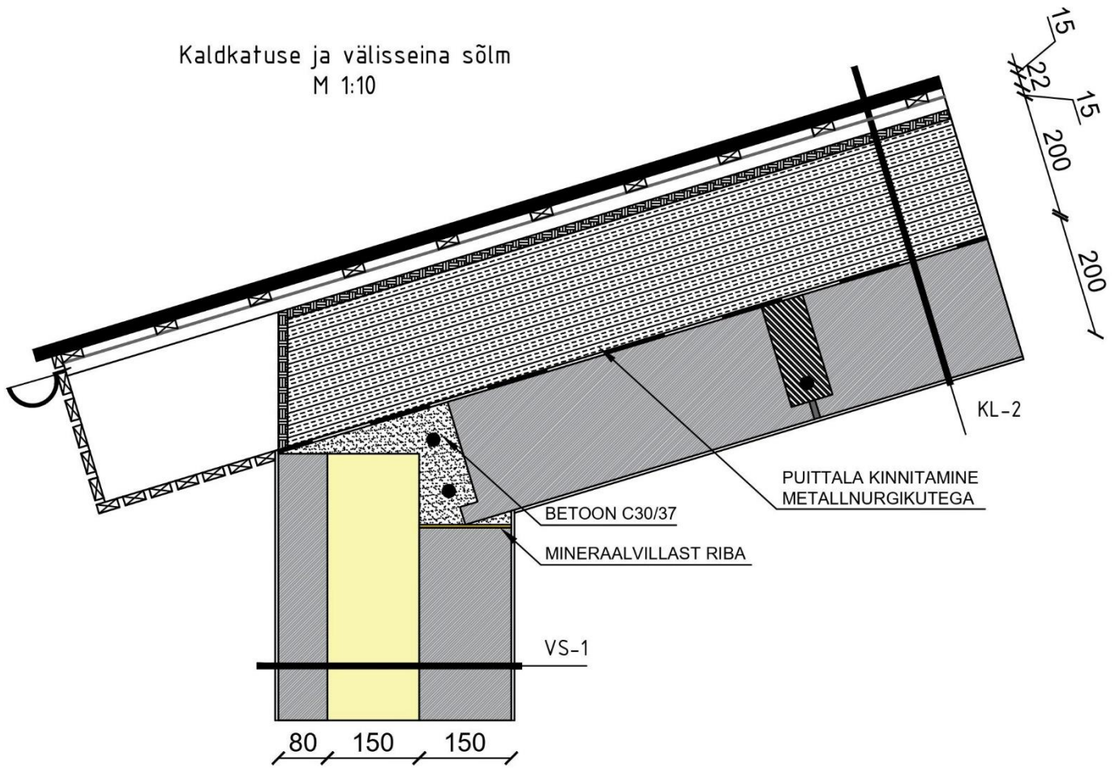
Väliskrohv	2 mm
Armeerimiskrohv	3 mm
Kolmekihiline poorbetoonpaneel polüuretaanist soojustusega	380 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

Laepaneelide liitekoht
M 1:10



Nimetus: Vahelae ja välisseina sõlm; Lamekatuse ja välisseina sõlm; Paneelide liitekoht		Tallinna Tehnikaülikool	
20.12.2021	Kristo Koppel	Mõõtkava 1:10	Leht 2

Kaldkatuse ja välisseina sõlm
M 1:10



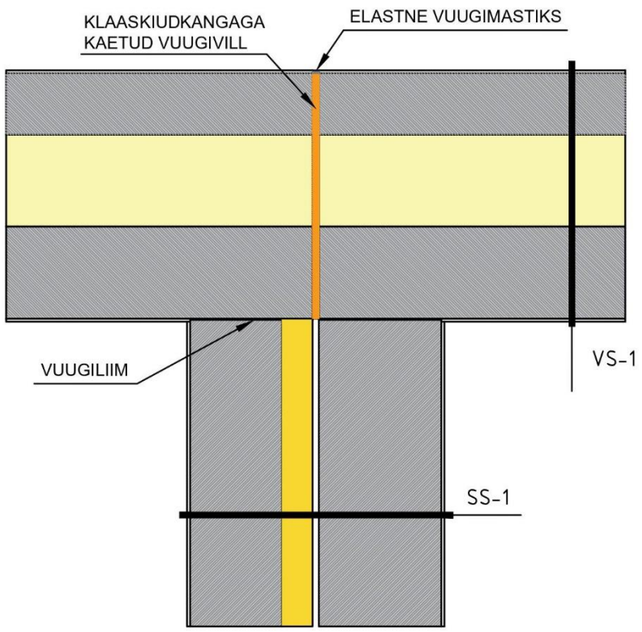
KL-2 U=0,18 W/m²·K

Katuseplekk	
Alusroovitus	15 mm
Aluskate	
Distantsliist	22 mm
Tuuletõkkeplaat	15 mm
Mineraalvill/puittala	200 mm
SBS riba puittala ulatuses	
Poorbetoonist laepaneel	200 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

VS-1 U=0,13 W/m²·K

Väliskrohv	2 mm
Armeerimiskrohv	3 mm
Kolmekihiline poorbetoonpaneel polüuretaanist soojustusega	380 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

Siseseina ja välisseina sõlm
M 1:10



VS-1 U=0,13 W/m²·K

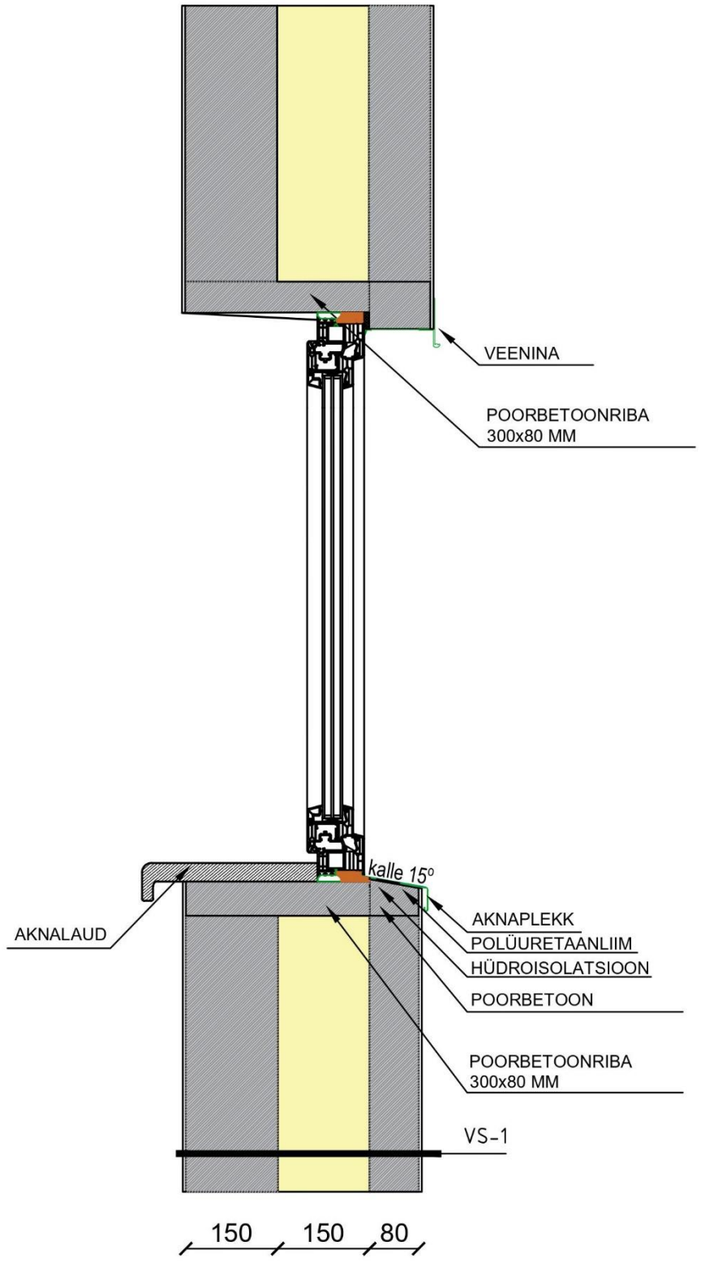
Väliskrohv	2 mm
Armeerimiskrohv	3 mm
Kolmekihiline poorbetoonpaneel polüuretaanist soojustusega	380 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

SS-1

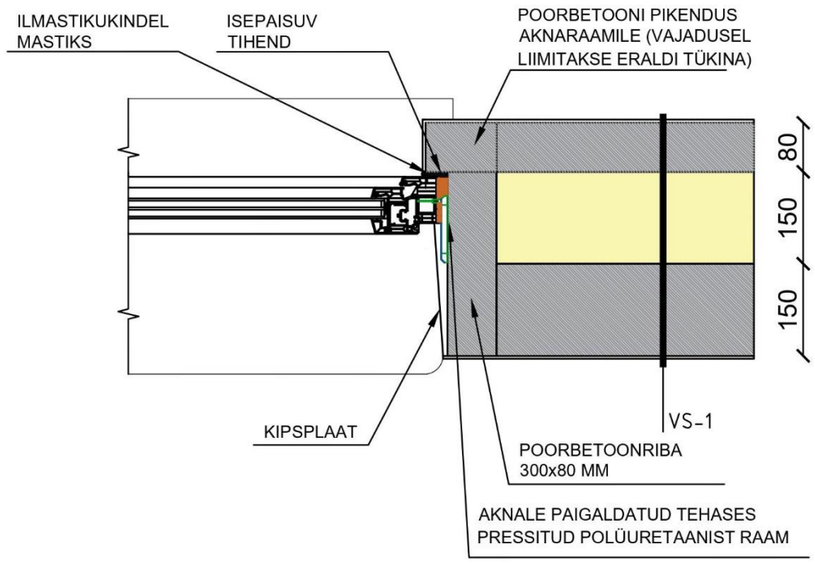
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm
Ühekihiline poorbetoonpaneel	150 mm
Mineraalvill, paigaldus liimiga	50 mm
Õhkvahe	10 mm
Ühekihiline poorbetoonpaneel	200 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

Nimetus	Kaldkatuse ja välisseina sõlm; Siseseina ja välisseina sõlm	Tallinna Tehnikaülikool	
20.12.2021	Kristo Koppel	Mõõtkava 1:10	Leht 3

Aknasõlm (külgvaade)
M 1:10



Aknasõlm (pealtvaade)
M 1:10

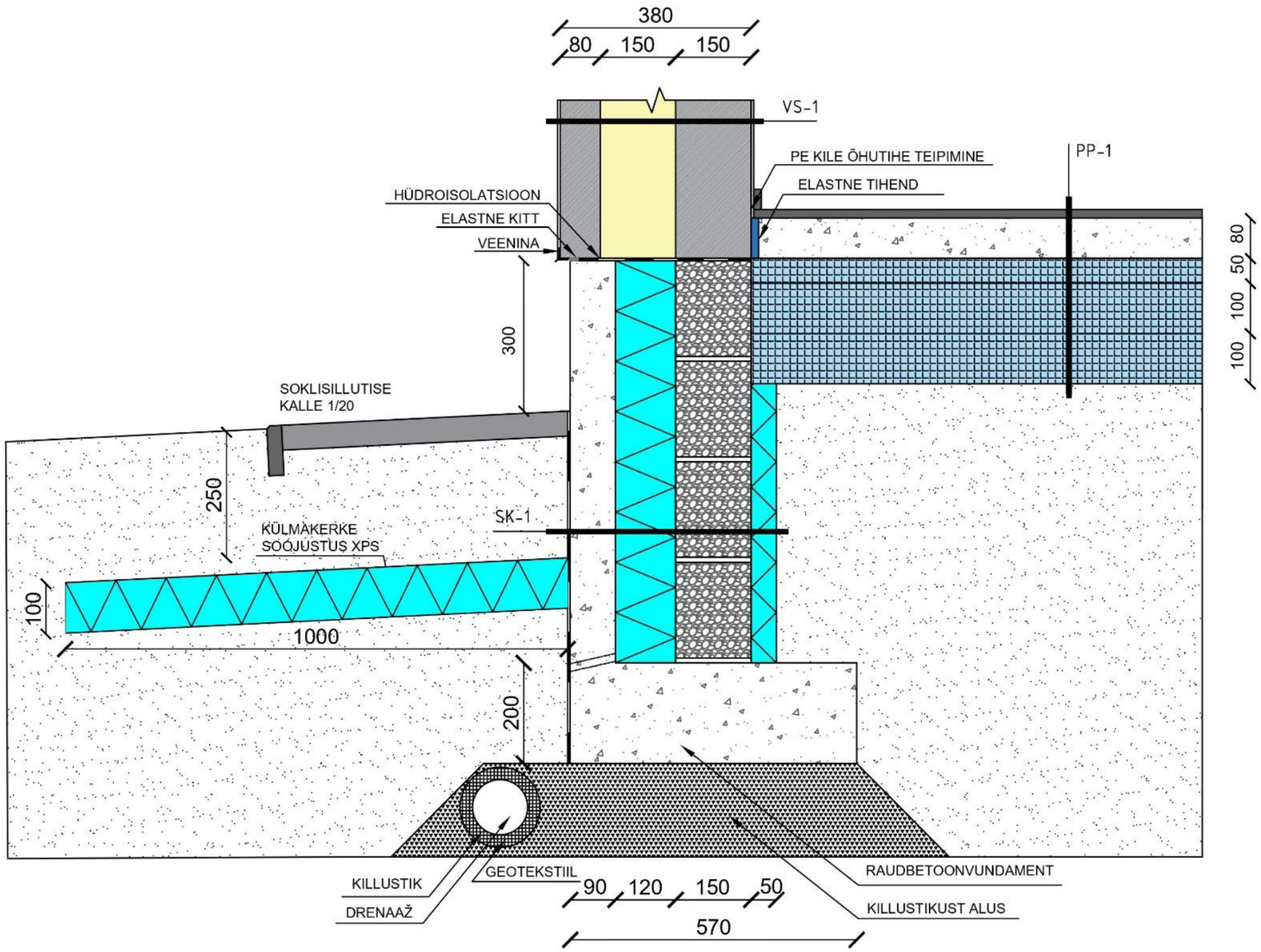


VS-1 U=0,13 W/m²·K

Väliskrohv	2 mm
Armeerimiskrohv	3 mm
Kolmekihiline poorbetoonpaneel polüüretaanist soojustusega	380 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

Nimetus	Aknasõlm (külgvaade); Aknasõlm (pealtvaade)		Tallinna Tehnikaülikool	
	20.12.2021	Kristo Koppel	Mõõtkava 1:10	Leht 4

Vundamendi sõlm
M 1:10



PP-1 U=0,09 W/m²·K

Raudbetoonplaat	80 mm
PE kile	
Vahtpolüstüreen EPS	250 mm
(λd ≤ 0,04 W/m·K, suletud pooridega, veeimavus < 2 %)	
Tihendatud killustik	250 mm
Aluspinnas	

VS-1 U=0,13 W/m²·K

Väliskrohv	2 mm
Armeerimiskrohv	3 mm
Kolmekihiline poorbetoonpaneel polüuretaanist soojustusega	380 mm
Pahtel ja siseviimistlus	5 mm

SK-1 U W/m²·K

Hüdroisolatsioon	
Raudbetoonsokkel	90 mm
Vahtpolüstüreen XPS	120 mm
(λd ≤ 0,04 W/m·K, suletud pooridega, veeimavus < 2 %)	
Keramsiitplokkidest müüritis	150 mm
Vahtpolüstüreen XPS	50 mm
(λd ≤ 0,04 W/m·K, suletud pooridega, veeimavus < 2 %)	

Nimetus		Tallinna Tehnikaülikool	
Vundamendi sõlm			
20.12.2021	Kristo Koppel	Mõõtkava 1:10	Leht 5