



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu Kolledž

**SOOLDUMISE JA KAHJUSTAVATE SOOLADE
EEMALDAMISE UURIMINE E HITUSTELLISTES
EXPLORING OF SALTING AND REMOVAL OF DAMAGING
SALTS IN CONSTRUCTION BRICKS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Triinu Tarma

Üliõpilaskood: 182327EAEI

Juhendaja: Mihkel Kiviste

Konsultant: Karin Mihkelsoo

Tartu 2024

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.

11.01.2024

Autor: Triinu Tarma
/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

11.01.2024

Juhendaja: Mihkel Kiviste
/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

11.01.2024

Kaitsmiskomisjoni esimees: Mihkel Kiviste
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Triinu Tarma,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Sooldumise ja kahjustavate soolade eemaldamise uurimine ehitustellistes,**

mille juhendaja on Mihkel Kiviste,

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

11.01.2024

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

TalTech Tartu Kolledž
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Triinu Tarma, 182327EAEI
Õppekava, peeriala: EAEI02/17 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, projekteerimise ja arhitektuuri peeriala
Juhendaja: Mihkel Kiviste, vanemteadur, mihkel.kiviste@taltech.ee
Konsultant: Karin Mihkelsoo, karin.kirts@gmail.com

Lõputöö teema:

Sooldumise ja kahjustavate soolade eemaldamise uurimine ehitustellistes
Exploring of salting and removal of damaging salts in construction bricks

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Vee ja soolade liikumise uurimine ehitustellistes laboritingimustel
2. Erinevate ohverkrohvide võrdlus soolade eemaldamisel ehitustellistest laboritingimustel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Telliste tiheduse, veeimavuse ja kapillaartõusu uurimine laboris	16.12.2022
2.	Telliste soolamahutatavuse, survetugevuse ja paindetugevuse määramine	25.08.2023
3.	Telliste soolasisalduse laboratoorne analüüs peale soolalahusega immutamist	20.10.2023
4.	Telliste soolasisalduse laboratoorne analüüs peale ohverkrohvimist	30.11.2023
5.	Kirjanduse analüüsi esitamine	03.01.2024
6.	Katsetulemuste ja analüüsi esitamine	03.01.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 11.01.2024

Üliõpilane: Triinu Tarma 11.01.2024

/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Mihkel Kiviste 11.01.2024

/ allkirjastatud digitaalselt /

Konsultant: Karin Mihkelsoo 11.01.2024

/ allkirjastatud digitaalselt /

Programmijuht: Mihkel Kiviste 11.01.2024

/ allkirjastatud digitaalselt /

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1. VEE JA SOOLADE LIIKUMINE KIVIMÜÜRITISES	9
1.1 Kivimüüritised	9
1.1.1 Keraamilised tellised	9
1.1.2 Silikaattellised	10
1.1.3 Mördid	11
1.2 Millistel mehhanismidel vesi ja soolad müüritises liiguvad	12
1.2.1 Difusioon.....	14
1.2.2 Kapillaarsus.....	14
1.2.3 Osmoos	15
1.2.4 Tsükliline niisutamine ja kuivatamine.....	16
2. SOOLAKAHJUSTUSED JA SELLE ENNETAMINE NING SOOLADE EEMADAMINE MÜÜRITISEST	17
2.1 Kahjustuste teke müüritises	17
2.1.1 Soolade kahjustav mõju ja millal materjal sooladest küllastub	18
2.1.2 Müüritist kahjustavad soolad ja selle kahjulikud kontsentratsioonid	19
2.2 Ohverkrohvide toime soolade eemaldamisel	23
2.2.1 Lubikrohv	23
2.2.2 Savikrohv.....	24
2.2.3 Termokrohv	24
3. SOOLDUMISE JA SOOLADE EEMALDAMISE LABORATOORSED UURINGUD	26
3.1 Vee kapillaartõus tellistes	27
3.1.1 Metoodika	27
3.1.2 Tulemused	28
3.2 Veeimavus tellistes	29
3.2.1 Metoodika	29
3.2.2 Tulemused	29
3.3 Telliste soolamahtuvus ja tihedus	31
3.3.1 Metoodika	31
3.3.2 Tulemused ja järeldus.....	32
3.4 Telliste survetugevuse ja paindetugevuse määramine	38
3.4.1 Metoodika	38
3.4.2 Tulemused	40
3.5 Telliste soolamahtuvus NaCl, NH ₄ NO ₃ ja Na ₂ SO ₄ -ga	41
3.5.1 Metoodika	41
3.5.2 Tulemused ja järeldus.....	42

3.6 Soolade kontsentratsiooni vähendamine krohvide abil	47
3.6.1 Metoodika	47
3.6.2 Tulemused ja järelalus.....	50
KOKKUVÕTE	54
SUMMARY.....	56
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	58

SISSEJUHATUS

Ehitustelliste kasutamine ehitusmaterjalina on aastasadu olnud oluline osa arhitektuurist ja ehituspraktikast. Tellised on tuntud oma vastupidavuse ja esteetilise väärtuse poolest, kuid nad on vastuvõtlikud sooladele ja niiskusele, mis võivad mõjutada nende pikaajalist terviklikkust ja välimust. Telliste tugevuse vähenedes hakkab müüritis ja hoone konstruktsioon lagunema. Ehituses on oluline, et konstruktsioonid oleksid projekteeritud ja ehitatud nii, et need suudaksid ettenähtud kasutusea jooksul olla võimalikult säästlikud, taluda võimalikke koormusi ja mõjutegureid ning olla ettenähtud otstarbeks kasutuskõlblikud [1].

Soolad satuvad müüritistesse ainult vees lahustununa ehk soolad vajavad liikumiseks niiskust. Enamasti liigub niiskus müüritisse läbi pinnase või sademete, näiteks kui hoonel vundamendil puudub piisav hüdroisolatsioon või kui katus ja seinad lasevad sademeid läbi. Kui soolad on jõudnud müüritise pooridesse, hakkab niiskus aurustuma ja hakkavad tekkima soolakristallid. Kristallide moodustumine tekitab müüritise poorides rõhku, mis olenevalt soola keemilistest omadustest võib hakata poore lõhkuma. Selline olukord vähendab materjali tugevust ja müüritise töökindlust [2].

Müüritises kõige tüüpilisemad kahjustavad soolad on sulfaadid, kloriidid ja nitraadid [3]. Soolakristallide moodustumine ja omadused sõltuvad soolalahuse koostisest, ümbritsevast keskkonnast ja poorse materjali omadustest. Soolad võivad pärineda mitmest allikast, näiteks merest, pinnasest, jääsulatusmaterjalidest või ehitusmaterjalidest. [4] Müüritise kuivades liigub sool aurustumisfronti, kus see kristalliseerub ja hakkab kogunema. Sooladest tekivad poorsesse müüritisse kahjustused, kui soolade kristalliseerumisest tingitud surve ületab materjali mehaanilise tugevuse [2]. Tavaliselt asub aurustumisfront seina pinnale lähedal ning seetõttu hakkab soolade mõjul esimesena lagunema seina viimistlus [2, 4].

Soolade eemaldamiseks müüritisest on mitmeid meetodeid, kuid peamiselt kasutatakse seina pinnal ohverkrohve. Eelistatakse ohverkrohve, millel oleks pikk kasutusiga ja suur mõju soolade eemaldamisel. Need krohvid peavad olema väga poorsed, et imada efektiivselt müüritise seest soolasid. Krohvidega saab soolasid eemaldada suurtelt ja tasastelt müüridelt või lihtsamatelt arhitektuursetelt detailidelt. [4]

Magistritöö eesmärgiks on uurida vee ja soolade liikumist laboritingimustel nii keraamilistes kui ka silikaattellistes. Keskendutakse veeimavuse, soolalahuse kapillaartõusu uurimisele ja soolade mahutatavusele tellistes ning võrreldakse ohverkrohve soolade eemaldamisel. Soolade eemaldamise võimalusi on varasemalt

uurinud emeriitprofessor Karl Õiger ning Kaarel Kuslap enda magistritöös, kes mõlemad viisid uurimuse läbi Tallinna Patarei merekindluse näitel. Samuti on sarnast teemat käsitlenud professor Christoph Ziegerti ja Eesti Maaülikoolis Helari Sirelpuu poolt, kes uurisid Mooste töllakuuri müüritisest soolade eemaldamist. Kuna varasemalt läbi viidud uuringutes ja magistritöödes ei ole päris täpselt selgunud konkreetsete Eestis kasutatavate ehitustelliste soolade mahutatavus ja kapillaartõusuga seonduvad küsimused, siis sellega seonduvalt kavandati käesolev magistritöö.

Magistritöö sisu jaguneb kaheks osaks – kirjanduse analüüsiks ja laboratoorseteks uuringuteks. Kirjanduse analüüsis uuriti, kuidas niiskus ja soolad saavad müüritisest liikuda, millised kahjustusi need tekitavad ning kuidas saab krohvide toimel soolasid müüritisest eemaldada. Laboratoorses osas mõõdeti silikaat-, šamott- ning keraamiliste telliste vee kapillaartõusu, veeimavust ja tihedust. Samuti uuriti naatriumkloriidiga silikaattelliste ja keraamiliste telliste soolade mahutatavust ning määrati katsemasina abil telliste surve- ja paindetugevus.

Antud magistritöö viimases mahukaimas uuringus kasutati keraamilistest tellistest ja silikaattellistest soolade eemaldamiseks lubikrohvi, savikrohvi (Saviukumaja OÜ) ja termokrohvi (Resthunt Ekspert OÜ toel). Eelnevalt leotati telliseid 5 kuu jooksul agressiivset keskkonda imiteerivas (0,5 moolises NaCl, NH₄NO₃, Na₂SO) soolalahuses ning seejärel võeti nendest proovid soolasisalduse määramiseks. Pärast proovide võtmist kanti telliste peale 6 nädalaks ohverkrohvid. Krohvide mõju järel võeti tellistest uued proovid. Laborist saadud kahe proovi tulemusi võrreldi omavahel, et hinnata kasutatud ohverkrohvide mõju kloriidide, nitraatide ja sulfaatide vähendamisel keraamilistest tellistest ja silikaattellistest.

1. VEE JA SOOLADE LIIKUMINE KIVIMÜÜRITISES

Tellismüüritisi mõjuvad ilmastikuolud ja niiskus [5]. Põhiliselt kahjustavad müüritisi maapinnast tõusev niiskus ja soolad [6, 7]. Niiskus liigub enamasti müüritistesse kapillaarjõudude toimel, kus hoone sein imab pinnasest niiskust endasse vastu gravitatsioonijõudu [7]. Seetõttu tekib seinte alumises osas pinnase lähedal niiske keskkond [6]. Enamasti liiguvad koos niiskusega maapinnast müüritisse ka mullas olevad soolad, mis on vees lahustunud [6].

Paljudel vanaaegsetel hoonetel esineb kapillaartõusu probleem, mille vähendamiseks ehitati vundament väiksema poorsusega tihedast kivist alusele, et vähendada niiskuse ülespoole liikumist. Uuematel ehitistel ennetatakse pinnasest tõusvat niiskust hüdroisolatsioonidega, et ei tekiks tõusva niiskuse probleemi maast müüritisse. [7]

Maapinnas olevad soolad võivad pärineda happelistest vihmadest või merekeskkonnast, mis tõusva niiskuse mõjul liiguvad kivimüüritistesse. Pideva niiskumise ja aurustumise tulemusena hakkavad soolad müüritises ladestuma ja kristalliseeruma. Kui soolad telliste poorides kristalliseeruvad, tekitavad need kivis lisarõhku ehk kristalliseerumisrõhku, mis hakkab lõhkuma kiviseina poore. [6]

1.1 Kivimüüritised

Kivimüüritise või kivikonstruktsiooni all mõeldakse looduskivist või tehiskivist ehitatud tarindit. Tehiskivideks peetakse keraamilisi telliseid, silikaattelliseid ja betoonkive, looduskivideks graniiti, moonekivimeid, lubjakive ja liivakivimeid. [8] Kivimüüritis on liitmaterjal, kus komponentideks on mört, tehis- või looduskivid, vajadusel ka täitebetoon ja armatuur [9]. Mörte jagatakse nende koostise järgi kolmeks järgnevaks grupiks: põhimört, peenmört ja kergmört [10].

1.1.1 Keraamilised tellised

Keraamilised tellised on müürikivid, mis on toodetud savist, liivast, põletusainest ja vajadusel ka muudest lisanditest. Eelmainitud koostisosade põletamisel kõrgel temperatuuril moodustub keraamiline tehskivi. Keraamilisi telliseid kasutatakse välis- ja sisemüüritistes, mis võivad olla nii kandvad kui mittekanvad. Standardi EVS-EN 771-1 järgi jaotatakse keraamilisi müürikive P-kivideks ja U-kivideks. P-kivid on müürikivid, mida kasutatakse kaitstud müüritises ehk sellel müüritisel ei tohi olla kokkupuudet niiskusega läbi pinnase või põhjavee. U-kive kasutatakse kaitsmata müüritises ja need on avatud ilmastiku mõjudele ning võivad olla kokkupuutes pinnasega. [11] Magistritöös

kasutati katsete tegemisel keraamilise tellise täiskivi, mis on standardi EVS-EN 771-1 järgi U-kivi üks kujudest.

Standardi EVS-EN 771-1 järgi on määratud U-kivide aktiivsete lahustuvate soolade lubatud sisaldus. Standardis toodud tabel 1.1 järgi on massiprotsendi alusel jagatud lahustuvate soola kationide sisaldus kolme klassi. S0 klassi kuuluvad müürikivid, kus soolade sisalduse ülempiir puudub. S1 klassis on naatriumsoolade ja kaltsiumsoolade ülempiir 0,17% massi kohta ja magneesiumsooladel 0,08% massi kohta. S2 klassi kuuluvad müürikivid, mis võivad sisaldada kõige vähem lahustuvaid soolasid. [11]

Tabel 1.1 Aktiivsete lahustuvate soolade lubatud sisaldus keraamiliste telliste U-kivides [11]

Klass	Üldine massiprotsent ei ületa: Na⁺ + K⁺	Üldine massiprotsent ei ületa: Mg²⁺
S0	Nõue puudub	Nõue puudub
S1	0,17	0,08
S2	0,06	0,03

Keraamilise tellise veemavus on kuni 15%, kuid varasemalt on see olnud kõrgem, näiteks aastatel 1945-1955 oli telliste keskmine veemavus 15-17%. Seetõttu ei sobi see kasutamiseks niisketes ruumides, vundamentides ja sokli hüdroisolatsioonist allpool. Keraamilise tellise kogupoorsus on 25 kuni 38%, kuid kinnine poorsus moodustab sellest maksimaalselt 15% ehk võib eeldada, et üle poolte telliste pooride on avatud ning saavad veega täituda. [12]

Eestisse jõudis keraamiline tellis 13. sajandi alguses koos risticõdijatega. Põhiliselt on Eestis valmistatud punaseid telliseid, mille standardmõõdud on sajandite jooksul muutunud väiksemaks. Alates 1941. aastast on keraamilise tellise klassikalised mõõtmed olnud 25x12x6,5 cm. Nõukogude perioodil suurenes telliste nõudlus ja nende tootmist hakati kiirendama. Seoses telliste põletamisprotsessi kiirendamisega tekkis kvaliteedi langus ning tellised hakkasid ilmastikuolude käes kiirelt lagunema. [13] Ebapiisava põletamise tõttu võisid tellised sisaldada materjali kahjustavaid aineid, näiteks naatriumsulfaate ja väävlit [5].

1.1.2 Silikaattellised

Silikaattellised on müürikivid, mille koostisosad on lubi ja looduslikud silikaatsed materjalid, mis kivistatakse kõrge rõhu all oleva auru keskkonnas. Silikaatsete materjalidena kasutatakse tavaliselt liiva, purustatud või purustamata kruusa ja

kivimeid. [14] Telliste külmakindlus on maksimaalselt 50 tsüklit ning nende veeimavuse kiirus on aeglasem kui keraamilisel tellisel, silikaadi veeimavus on 10 kuni 15%. Suure veeimavuse tõttu ei saa neid kasutada vundamentides ja soklites. [12] See on tulekindel ja heliisoleeriv materjal ning oma omaduste ja väljanägemise poolest on silikaattelliseid kasutatud põhiliselt fassaadidel puhasvuukmüüritisena. [15]

Eestis hakati silikaattelliseid tootma 1910. aastal AS Silikaadi poolt [16]. 1941. aastast on silikaattellise klassikalised mõõtmed olnud samasugused keraamilise tellisega ehk 25x12x6,5 cm. 1930. aastatel tulid laiemalt moodi puhasvuuk-silikaatmüüritised ning juba 1960. aastatel olid see Eestis enim kasutatav seinahitusmaterjal. [17] Lisaks on silikaati kasutatud korstnaotsade ehituses, sest see on külmakindlam kui varasemalt kasutuses olnud šamott-tellis, mis hakkas külma tõttu murenema [18].

1.1.3 Mördid

Müürimörtide ülesanne on siduda müüritisel tellised ühtseks toimivaks konstruktsiooni osaks. Mörtide koostisosadeks on täitematerjalina liiv, sideaine ja vesi. Koostise järgi jagatakse mörte kolme järgnevasse klassi: põhimört, peenmört ja kergmört. Kergmördi mahumass on alla 1600 kg/m³ ning täitematerjaliks tavaliselt perliit, pimss, tuhk või muud kerged teramaterjalid. Põhimördi mahumass on 1600 kuni 2200 kg/m³ ning selle täitematerjaliks kasutatakse üldiselt kvartsiiva. Mörte klassifitseeritakse ka survetugevuse järgi ning tähistatakse tähega M, millele järgneb mördi tugevus MPa. Mörte võib tähistata samuti kaalusuhte järgi, näiteks 1:1:5 tähendab, et mördi koostiseks on 1 osa tsementi, 1 osa lupja ja 5 osa täitematerjali. [9]

Mörte saab eristada sideaine järgi, milleks võib olla õhk-sideaine või hüdrauliline sideaine. Tuntuim õhk-sideaine on õhklubi, mida kasutatakse lubimördis. Tsementmördis kasutatakse tsementi ehk hüdraulilist sideainet. Segamördis kasutatakse mõlemat sideainet ja segatakse omavahel kokku tsement- ning lubimört. Lubimördi omadusteks on väike tugevus, aga hea nake tellistega ning lihtne töödeldavus. Lubi hakkab kivistuma, kui see saab reageerida õhus oleva süsihappegaasiga suhtelisel õhuniiskusel 65 kuni 75% juures. Mördi kivistumine võib aeglustuda või peatuda, kui süsihappegaasi juurdepääs lubjale on takistatud, mis võib juhtuda näiteks paksus müüritisel. Tsementmördi omadusteks on suur tugevus, kuid halb nake tellistega ja vähene plastsus. See mört kivistub nii õhu käes kui ka vee all, põhiline oleks jälgida, et tsementmördis oleks esimestel kivistumiste päevadel piisavalt vett. Kui kivistumine toimub algusfaasis liiga kiiresti, jääb mördi nake tellistega puudulikuks ning selle tugevus väikeseks. [9]

Soolade olemasolul müüritises on mõistlik kasutada konstruktsioonis tellistest nõrgemaid mörte näiteks lubimörte, sest sellisel juhul toimub aurustumine pigem läbi mördi ning võimalikud soola ja niiskuskahjustused tekivad mördis. Seda on lihtsam ja odavam hiljem parandada. Tsementmörte kasutades hakkab aurustumine toimuma läbi telliste, sest antud mört on üsna tihe ning vähem vedelike ja õhuauru läbilaskvam. Sellise mördi kasutamisel tekivad kahjustused tsementmördist nõrgemates tellistesse. [7]

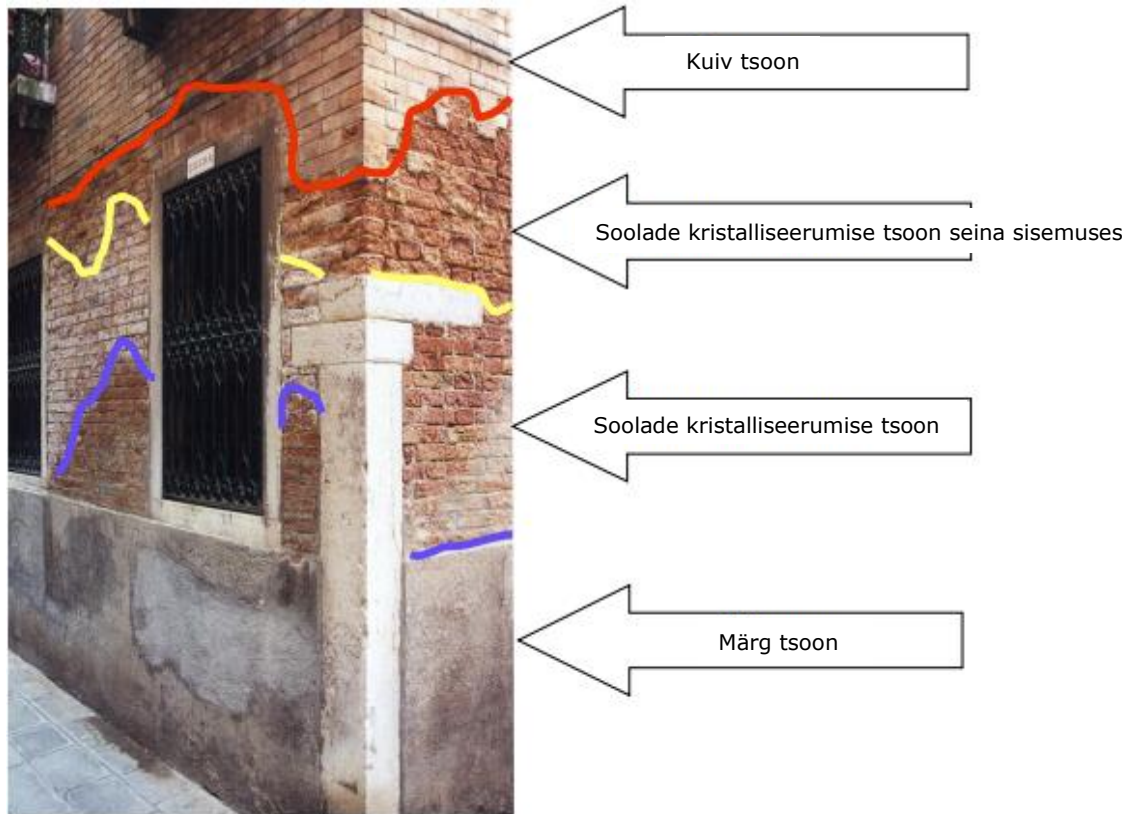
1.2 Millistel mehhanismidel vesi ja soolad müüritises liiguvad

Kõik kivimaterjalid on teatud määral poorsed. Poorsust mõõdetakse materjali mahust protsendina ja tavaliselt jääb see levinud ehitusmaterjalidel nagu lubjakivi või tellised 10-30% vahemikku. Tihedamatel materjalidel nagu näiteks graniit, kilt või marmor on poorsus 0,1 kuni 5%. Poorsus on oluline termin, sest sellega saab ligikaudselt hinnata materjali vastupidavust: mida väiksem on poorsus, seda vastupidavam on materjal. [7] Poorsus saab olla kinnine või lahtine. Immutamisel täituvad lahtise poorsusega materjalide poorid veega, samas kui kinnise poorsusega materjalide puhul jäävad poorid veeta. Materjali püsivuse ja külmakindluse seisukohalt on oluline, et materjalis poleks palju lahtisi poore. Kinnised poorid annavad materjalile paremad soojaisolatsiooni omadused ning materjal imab väiksemal määral vett. [12]

Soolad hakkavad eelistatult sadestuma väiksemates telliskivide poorides, sest seal toimub vedeliku aurustumine efektiivsemalt. Samuti on väiksemates poorides suurem kristalliseerumisrõhk. Soolade kuhjumist ja kristalliseerumist mõjutavad materjali pooride mõõtmed - mida suuremad on poorid, seda vähem soolasid sinna koguneb. Mida väiksemad on soolade anioonid, seda kõrgemale need müüritistes koos veega suudavad liikuda. Suuremate anioonidega soolad nagu näiteks sulfaadid hakkavad kogunema madalamatesse müüritise kihtidesse. Väiksema anioonidega soolad nagu kloriidid suudavad liikuda müüritises kõrgemale. Soolad hakkavad müüritises kogunema vabade pindade lähedale, mis on kontaktis õhuga. Kuna müüritise välispinnal toimub pidev vedeliku aurustumine jäävad pinna lähedale müüritisse alles soolad. [6]

Üldiselt võib müüritises soolade ja niiskuse kapillaartõusul eristada nelja tsooni, nagu on näha joonisel 1.1. Esimeses madalas tsoonis püsib sein alati niiske, soolad on lahustunud ja ei tekita kahjustusi. Teises tsoonis, eelmisest veidi kõrgemal, toimub soolade kristalliseerumine ainult müüritise pinnal ja seina sisemine pind on niiske. Kõige suuremad kahjustused tekivad kolmandas tsoonis, kus toimub soolade

kristalliseerumine seina sisemuses, sest kõrgemas osas jõuab niiskus aurustuda difusiooni teel seina sisemises osas. Neljandasse tsooni enam kapillaartõusuga vesi ja soolad ei jõua, sest niiskus aurustub madalamates seina osades ära ja seetõttu ei teki seal ka kahjustusi. [19]



Joonis 1.1 Neli erinevat tsooni müüritisel vedelike ja soolade kapillaartõusul [19]

Vesi võib müüritisse sattuda kokkupuutel pinnasega, lekkivatest ehituskonstruktsioonidest, hingeõhust ja ruumides olevast niiskusest [20]. Soolad võivad sattuda müüritisse järgmistel võimalikel meetoditel: pinnaseveega ja põhjaveega, merepriismetega, õhusaasteainetena, aiaväetistega, bioloogiliste allikatega (loomade ja lindude väljaheited, lekkivad kanalisatsioonid), ehitusmaterjalides sisalduvate sooladega, talvel teehooldustega ja puhastusainetega [7].

Soolad lahustuvad veega kokkupuutel. Kui soolamolekuli ümber on piisavalt palju veemolekule tekib soolalahus. Poorsetes materjalides piisab hügrokoopsest seotud veest, et soolad hakkaksid lahustuma. Hügrokoopne vesi on niiskus, mida soolad imavad ümbritsevat õhust. Soolade lahustumist mõjutavad müüritisel suhteline õhuniiskus ja vabalt kättesaadav vesi, näiteks pinnasevesi. [5]

1.2.1 Difusioon

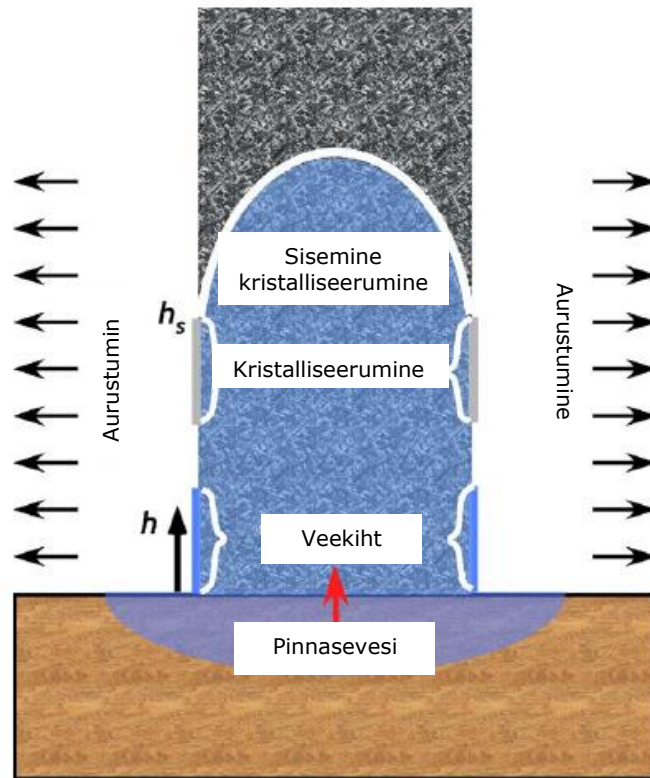
Vesi ja niiskus võivad tungida konstruktsioonidesse hoone seest väljapoole liikuva veeauru difusioonina [21]. Ka vees lahustunud soolad saavad liikuda läbi müüritise pooride difusiooni teel. Difusioon põhjustab aatomite ja molekulide termilist liikumist kõrgemast kontsentratsioonist madalama kontsentratsiooni poole. Helsingi Tehnikaülikoolis 2003. aastal läbi viidud uurimuses katsetati soolade difusiooni erinevates keraamilistes tellistes ja leiti, et suurema poorsusega tellistes toimub soolade difusioon intensiivsemalt kui väiksema poorsusega tellistes. Sealses uurimuses kasutati katsete tegemisel naatriumkloriidi ehk keemilise valmina NaCl. Tulemustest võis järeldada, et soolade difusiooni mõjutavad materjali poorsus, pooride kuju ja pooride omavahelised ühendused, kas need on avatud või suletud poorid. [22] Veeauru difusiooni mõju on uuritud ka ajalooliste tellismüüritiste peal ja leitud, et see põhjustab aeglaselt mitmete sajandite vältel müüritises mikropurunemisi ning see omakorda pingete ümberjaotumist müüritise südamikust välimistele kihtidele [23]. Müüritises toimuva difusiooni ennetamiseks on vajalik paigaldada seina sisemine aurutõke [21].

1.2.2 Kapillaarsus

Müüritises tõusva niiskuse põhjustajaks on vedeliku kapillaartõus [7]. Kapillaartõusu põhjustab seina kapillaarrõhk, mis sõltub omakorda seinas oleva materjali pooride suurusest, jaotusest ja materjali märgumisest [20]. Neid poore, kus vesi liigub kapillaarjõudude toimel nimetatakse kapillaarideks ja on läbimõõduga 0,1 kuni 10 μm [12]. Mida väiksemad on materjali poorid, seda kõrgemale võib vesi seinas liikuda. Vesi tõuseb seinas senikaua kuni ülespoolne tõmbejõud tasakaalustub gravitatsiooni allatõmbejõuga või kui seina aurustumise määr on kõrge ning vedelik aurustub. Vedeliku aurustumise määra seinas mõjutab müüritise materjali struktuur, pindkate, kliima ja asukoht. Jahedamas ja niiskes kliimas võib niiskus tõusta seinas mitmeid meetreid, enne kui aurustub. Keskmiselt on aurustumisala vahemikus 0,5 kuni 1,2 meetrit maapinnast. [7]

Poorne materjal hakkab kokkupuutes pinnasega endasse imama pinnasevett ning koos sellega liiguvad müüritisse ka pinnases lahustunud soolad. Eriti ohtlik on see kõnniteega külgnevatele seinadele, mis on avatud jää sulatamiseks kasutatavatele sooladele. [20] Jooniselt 1.2 on näha, kuidas niiske mullaga kontaktis olev sein imab pinnasevett. Seinast kõrguse suurenedes vee tõus aeglustub ja seina pinnalt hakkab toimuma ühtlane aurustumine. Maapinna lähedal seina alumises osas tekib välispinnale vedelikukiht, sest selles osas on vedeliku kapillaartõusu kiirus suurem kui aurustumine. Seinast ülemises osas on vedeliku tõusukiirus väiksem, kuid aurustumiskiirus kogu seinast konstantne.

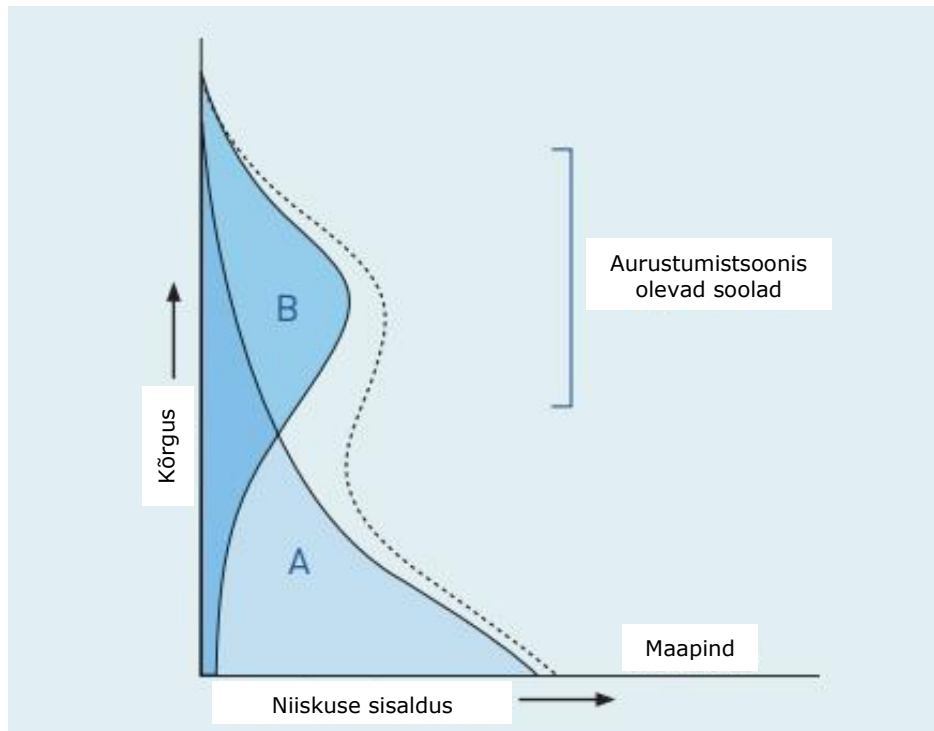
Seinas olev vesi ei tõuse enam kõrgemale, kui aurustumise kiirus on suurem kui kapillaartõusu kiirus. [20]



Joonis 1.2 Kapillaarselt müüritisel liikuv pinnasevesi [20]

1.2.3 Osmoos

Kui kapillaarselt tõusva niiskuse tõttu on sein imendunud piisavalt soola, nii et soola kontsentratsioon müüritis on suurem kui mullas, siis hakkavad seinas olevad soolad soodustama niiskuse imavust õhust ja pinnaseveest. Selline nähtus tuleneb paljude soolade hügrooskoopsusest ehk olemusest niiskust endasse imada ja seejärel lahustuda. Hügrooskoopsus on omadus, mis hoiab soolaseinad märjana niiskes kliimas, sest soolalahuse osmootne rõhk tõmbab rohkem vett kõrgema soolakontsentratsiooni suunas. Selle tõttu suureneb kapillaarne vedeliku ja soolade liikumine ning tagajärjeks on niiske müüritis ning soolade kontsentratsiooni suurenemine seinas. Alloleval joonisel 1.3 on näha, kuidas niiskus liigub müüritisel alguses läbi kapillaartõusu (joonisel tähisega A) ja hiljem soolade hügrooskoopsete omaduse tõttu (tähisega B). Punktiirjoonena on näidatud seinaga kogu niiskuse sisaldus (A ja B summa), mis on tekkinud kapillaartõusu ja soolade hügrooskoopsuse tõttu. [7]



Joonis 1.3 Niiskusesisaldus müüritises tulenevalt vedeliku kapillaarjõududest (tähisega A) ja soolade hügroskoopsusest (tähisega B) [7]

1.2.4 Tsükliline niisutamine ja kuivatamine

Vesi ja soolad võivad poorsetesse materjalidesse liikuda vihma või merepriitmete kaudu. Sellisel juhul on soolade kristalliseerumismuster teistsugune võrreldes näiteks kapillaartõusuga. Rannikuäärsed ehituskonstruktsioonid puutuvad sageli kokku soolaste merevee priitmetega, kuid ka paari kilomeetri raadiuses merest asuvad hooned on merevees sisalduvatest sooladest mõjutatud. Merevees sisalduvad soolad kuivavad peeneteks soolateradeks ning need peened soolakristallid võivad tuule abil liikuda mitmeid kilomeetreid sisemaale, enne kui sadestuvad koos vihmaga hoonete seinte poorsetesse materjalidesse välispinna lähedale. [20]

Niiskusekahjustused tekivad samuti katkiste ehituskonstruktsioonide või valede töövõtete tõttu, kui hoone pole piisavalt tihendatud ja vihmavesi tungib müüritistesse ning imbub ülalt allapoole. Allapoole liikuva niiskuse kahjustus on enamasti lokaalne ning kahjustus tekib üldiselt sinna, kust kõige suuremal määral niiskust aurustub. Kui õhk või sademed sisaldavad soola, siis üldiselt koguneb ka enamus soola aktiivsesse aurustumise punkti. [7]

2. SOOLAKAHJUSTUSED JA SELLE ENNETAMINE NING SOOLADE EEMADAMINE MÜÜRITISEST

Kahjustused tekivad mitme teguri koosmõjul ning soolakahjustuste ennetamiseks piisab vähemalt ühe järgneva teguri eemaldamisest: niiskust imav müürimaterjal, niiskus, lahustuvad soolad ja aurustumine [7]. Soolakahjustuste ennetamiseks peaks seina välispind olema võimalikult ilmastikukindel, et pidada vastu tuulele ja vihmale. Samuti peaks olema hüdroisolatsiooniga takistatud niiskuse imbumine seina sisse läbi vundamendi. Kui niiskuse jõudmine seina on takistatud, siis ei saa kapillaarjõu mõjul liikuda seina ka pinnasevees lahustunud soolad. [8] Parim tava on takistada või minimeerida kapillaarselt tõusvat niiskust ning kui soolad on juba müüritisse sattunud, siis nende õigeaegne eemaldamine [7].

2.1 Kahjustuste teke müüritisel

Kuna müüritisel on mõjutatud ilmastikust ja keskkonnast, siis nende põhilisteks kahjustuste tekitajateks on niiskus, soolad, tuul, temperatuur, bioloogilised mõjurid (näiteks vetikad, sammal) ja päikese UV-kiirgus [8]. Soolakahjustuste tõttu müüritise lagunemine on aja jooksul eksponentsiaalne ning seetõttu on soolad eriti ohtlikud kahjustuste põhjustajad. Müüritisel võib olla pikk periood, kus silmaga nähtavat lagunemist ei toimu ja sool koguneb aeglaselt müüritise pooridesse. Kui paarikümne aastaga on müüritise poorid soolaga täitunud, hakkab peale kiire lagunemine, mis võib mõjuda juba paari aastaga müüritise jaoks laastavalt. [7]

Soolakahjustused tekivad järgnevalt loetletud kõikide tegurite koosmõjul: [7]

- Vett ja niiskust imavad müürimaterjalid;
- Niiskus;
- Lahustuvad soolad;
- Aurustumine.

Kui üks tingimus eelnevalt loetletud nelja hulgast eemaldada, siis sel juhul müüritise lagunemist soolade mõjul ei toimu. Müüritise lagunemise ennetamiseks on oluline vähemalt üks tingimus kõrvaldada. [7]

2.1.1 Soolade kahjustav mõju ja millal materjal sooladest küllastub

Varasemalt on palju tähelepanu pööratud materjalide mehaanilisele lagunemisele soolade mõjul. Samas on palju vähem uuritud soolade ja niiskuse koosmõju müüritisele. Soolad muudavad müüritiste poorsust, vähendades väiksemate pooride osakaalu ehk väikesed poorid lõhutakse suuremateks soolade kristalliseerumise käigus [6]. Soolad võivad sattuda poorsetesse tellistesse mitmel järgneval viisil: läbi tsementmaterjali või telliste ja läbi pinnasevee või sademete [8]. Samuti ka tuule abil läbi atmosfääri saasteainetena [20]. Kui palju soolakristallid kahjustusi tekitavad, sõltub materjali pooride struktuurist ja soola enda keemilistest omadustest [20].

Soolad võivad tekitavad järgnevaid iseloomulike kahjustusi: [8]

- Müüritise pinnakihtide kestendamine ja koorumine;
- Pragunemine;
- Krohvides liiva täitematerjali väljapudenemine;
- Mörtide või telliste struktuuri purunemine.

Kui sein on koos veega sattunud soolad ja aurustumine toimub seinapinna lähedal, siis selle tulemusel suureneb soolade kontsentratsioon ja seinas olev lahus võib muutuda üleküllastunuks [7]. Üleküllastumise tulemusena tekivad aurustumisfrondi juurde sein välispinnale vee kapillaartõusu piiri lähedale soolakristallid [20]. Selline protsess võib müüritisest kesta aastaid ja seda kutsutakse välimiseks eflorestsentsiks [8]. Sel juhul kasvavad soolakristallid sein pinnalt välja pikkade õhukeste nõeltena, mida nimetatakse ka „õitsemiseks“ [7]. Sein pinnale tekkivate soolakristallide kahju ulatus sõltub soola keemilisest koostisest ja sein materjalist [8]. Enamasti selline nähtus endas otsest ohtu ei kujuta, vaid rikub sein välisilmet [20].

Sarnane soolade kristalliseerumine kapillaartõusu piiril toimub ka sein sisemistes poorides [20]. Kui sein aurustumise määr on suur ja enamus aurustumist toimub sein sees, siis soolad kristalliseeruvad sisemistes poorides [7]. Sellist nähtust kutsutakse sisemiseks eflorestsentsiks [8]. Selline soolade kristalliseerumine on müüritisele palju ohtlikum, sest kui sein sisemistes poorides soolade kristalliseerumisrõhk ületab poorse materjali tõmbetugevuse, hakkab sool poore lõhkuma ja sein tugevus väheneb [20]. Samuti võib selle tagajärjel sein krohvikihht lahti lüüa [8]. Soola lagundav toime müüritisest põhjustab pooride teket, suurendades seeläbi sein poorsust. See omakorda muudab müüritise haavatavamaks nii niiskusele kui ka suurema hulga soolade suhtes [24].

Kui soolalahus kuivab oma kriitilisest suhtelisest õhuniiskusest allapoole tekivad soolakristallid. Suurimad soolakristallid tekivad kriitilise suhtelise õhuniiskuse juures ehk näiteks naatriumkloriidil toimub kristalliseerumine ~75% ja sellest väiksema suhtelise õhuniiskuse korral (tabel 1.2). Soolade kristalliseerumine avaldab müüritisele kristalliseerumisrõhku, mis võib ulatuda äärmuslikel juhtudel 30 kuni 60 MPa. Kuna tellise tõmbetugevus on umbes 2,8 MPa ja lubimördil 2,1 MPa, siis seetõttu on oluline kaitsta müüritist selle eest, et soolad ei kristalliseeruks telliste ja mörtide poorides. [5]

2.1.2 Müüritist kahjustavad soolad ja selle kahjulikud kontsentratsioonid

Vees lahustunud soolade esinemine müüritistes on levinud nähtus, mis võib ilmneda kivimaterjalide pinnal vee aurustumisel valge, kollase või muu värvilise kristalliseerunud kihina [25]. Soolad on keemilised ained, mis koosnevad positiivselt ja negatiivselt laetud ionide kombinatsioonist, mida nimetatakse kationideks ja anioonideks. Põhilised ioonid, mida seinad võivad sisaldada, on toodud all tabelis 2.1. Soolad võivad koosneda tabelis toodud ionide kombinatsioonist, tingimusel, et on olemas positiivsete ja negatiivsete laengute tasakaal. [7]

Tabel 2.1 Seinades esinevate soolade ioonid [7]

Katioonid +	Anioonid -
Naatrium Na^+	Kloor Cl^-
Kaalium K^+	Sulfaat SO_4^{2-}
Magneesium Mg^{2+}	Nitraat NO_3^-
Kaltsium Ca^{2+}	Karbonaat CO_3^{2-}

Peamised soolad, mis kivimüürides vee mõjul liiguvad on järgmised: NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄, Na₂CO₃, CaSO₄, CuSO₄, Ca(OH)₂, CaCO₃ ja MgSO₄ [25]. Need soolad võivad sattuda müüritisse näiteks mördi koostisosadega, õhusaasteainetega või pinnaseveega, mis sisaldab soolasid [25]. Põhilised soolakahjustuste põhjustajad on naatriumkloriid (NaCl), naatriumsulfaat (NaSO₄) ja kaltsiumsulfaat (CaSO₄). Osad soolad sisaldavad oma kristallstruktuuris vett (H₂O) ja võivad esineda mitmes erinevas hüdratsiooniseisundis. Näiteks naatriumsulfaat võib esineda nii Na₂SO₄ kujul või ka veel kahjulikumana Na₂SO₄·10H₂O. Samuti on ohtlikud soolad, mis tõmbavad niiskust endasse juurde veeaurust õhus, selle tulemusel tekib soolade lahustumine ning kristalliseerumine pidevate tsüklitena. Üheks selliseks soolaks on MgCl₂·6H₂O. [7]

Erinevate soolade käitumise tõttu on neid sageli võimalik tuvastada selle põhjal, kuidas nad ladestuvad, millist kahju nad on põhjustanud ning kuidas nad kristalliseeruvad. Osade soolade kristallid on välimuselt väga iseloomulikud ning neid on nii mikroskoobi abil kui ka silmaga lihtne tuvastada. Soolasid on võimalik tuvastada ka selle järgi, kuidas nad temperatuuri ja niiskuse mõjul reageerivad. Igal soolal on olemas oma kriitiline suhteline niiskus kristalliseerumiseks. Tabelis 2.2 on toodud välja müüritises levinud soolade kriitiline õhuniiskus kristalliseerumiseks. Näiteks naatriumkloriid (NaCl) ja naatriumsulfaat (Na_2SO_4) hakkavad kristalliseeruma juba väiksema suhtelise õhuniiskuse juures. Soolad, mis hakkavad kristalliseeruma 100% RH juures, näiteks kaltsiit (CaCO_3), vajavad kristallide moodustamiseks pikka aega juurdepääsu veele, et soolad hakkaksid reageerima. [5]

Tabel 2.2 Levinud soolad müüritises ja nende kristalliseerumiseks vajalik suhteline õhuniiskus [5]

Nimetus	Keemiline valem	Kriitiline suhteline õhuniiskus (RH) kristalliseerumiseks 20 °C [%]	Lahustuvus [g/L]	Molaarmass [g/mol]
Haliit	NaCl	75	360	58,5
Tenardiit	Na_2SO_4	82	162	142
Mirabiliit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	91	900	322
Kips / ettringiit	$\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	~ 100	2,4	172
Lubi / kaltsiit	CaCO_3	~ 100	$14 \cdot 10^{-3}$	100

Müüritises kahju tekitamiseks vajaliku soola kogus varieerub ja sõltub soola tüübist, mõõtmetest ja seisundist [7]. Mida suurem on soola molaarmaht, seda suuremaid kahjustusi see tekitab [8]. Selliste soolade üleküllastumisel müüritises tekib suur kristalliseerumisrõhk, mis omakorda tekitab sisemisi kahjustusi [8]. Üldine reegel on, et kui müüritise mass sisaldab rohkem kui 0,5% soola, siis peaks hakkama soolasid eemaldama [7].

Tellismüüritisi kahjustavad nitraatide ja kloriidide kontsentratsioon on välja toodud Austria standardis ÖNORM B 3355-1, kus kontsentratsioonid on jaotatud kolme järgnevasse kategooriasse. [26]

Nitraatid: [26]

- Alla 0,05% müüritise kaalust ($< 0,5 \text{ g / kg}$) – soolakahjustuste risk puudub;
- 0,05 kuni 0,15% müüritise kaalust (0,5 kuni 1,5 g / kg) – vajalik individuaalne müüritise hindamine;
- 0,15% müüritise kaalust ($>1,5 \text{ g / kg}$) – soovitatav on aktiivne soola eemaldamine.

Kloriidid: [26]

- Alla 0,03 müüritise kaalust ($< 0,3 \text{ g / kg}$) – soolakahjustuste risk puudub;
- 0,03 kuni 0,10% müüritise kaalust (0,3 kuni 1,0 g / kg) – vajalik individuaalne müüritise hindamine;
- Üle 0,10 protsendi kaalust ($>1,0 \text{ g / kg}$) – soovitatav on aktiivne soola eemaldamine.

Sulfaadid

Sulfaadid on kõige kahjulikumad soolad, sest nende kristalliseerumine tekitab materjalis suuri kahjustusi. Need soolad võivad põhjustada krohvi ja telliste lagunemist ning lubja lahustumist happelistes-aluselistes reaktsioonides. Samuti võivad sulfaadid esineda mitmes hüdratsiooniseisundis muutes enda kuju kahe faasi vahel, näiteks Na_2SO_4 ja $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. See tähendab, et need soolad suudavad siduda soolakristallis ka veemolekule, mis suurendab soolakristalli mahtu ja tekitab paisumist. Näiteks magistritöö katses kasutatud Na_2SO_4 võib kristalliseerudes laieneda 320%. [5]

Sulfaadid reageerivad keemilises reaktsioonis portlandtsemendis sisalduva trikaltsiumaluminaadi ja veega. Selle reaktsiooni käigus tekib ühend nimega kaltsiumsulfoaluminaat ehk lühemalt ettringiit. Ettringiidi kristallid põhjustavad poorsetes tehiskivides paisumisi, mis toob kaasa telliste lagunemise ning müüri deformatsioonid. Peamiselt tekib selline kahjustus parapetiga seintele, tugiseintele ja korstendele. Selle kahjustuse esimeseks tunnuseks on enamasti müüritise horisontaalvuukides pikisuunalised praod, mis tekivad mördi paisumisel. Samuti võib see mõju avaldada müüritise väljanägemisele ning seinte peale võivad tekkida plekid. [8]

Sulfaadid võivad jõuda müüritisse koos vihmaga või pinnaseveega. Samuti võivad sulfaadid müüritisse sattuda läbi portlandtsemendi. Müüritises sulfaatide vältimiseks on võimalus ladumisel kasutada sulfaadikindlaid tsemente, kus trikaltsiumaluminaadi sisaldus on maksimaalselt 3,5%. [8]

Malaisias läbi viidud mitme ülikooli koostööl valminud uurimustes leiti, et naatriumsulfaadi mõju silikaattelliste survetugevusele ja mahukahanemisele on üsna väike [27, 28]. 2010. aastal tehtud esimeses uurimuses katsetati silikaattelliseid 180 päeva jooksul 5%, 10% ja 15% Na₂SO₄ lahustega ning tulemustes selgus, et silikaattellised on üsna vastupidavad naatriumsulfaatide keskkonnas [27]. Telliste tugevus ning mahukahanemine oli katses üsna väike ka kõrge 15% soolalahuse kontsentratsioonide juures [27]. Teises uurimuses katsetati naatriumsulfaatide mõju silikaattelistest müüritisele ning leiti, et juba 10% ja 15% Na₂SO₄ soolalahus mõjub 6 kuuga müüritisesele olevale tsementmördile hävitavalt ja põhjustab mördi lagunemist ning tugevuse kaotust. [28].

Nitraadid

Nitraadid võivad konstruktsioonidesse sattuda põllumajandushoonetes loomade väljaheidete tõttu. Samuti sisaldavad lindude väljaheidet nitraati, mis võivad linnakeskkondades hoonete konstruktsioone reostada. [29] Tuntuimad müüritisese esinevad nitraadid on nitrokaltsiit (Ca(NO₃)₂ · 4 H₂O), nitromagnesiit (Mg(NO₃)₂ · 6 H₂O) ja ammoonium (NH₄NO₃) [8].

Kloriidid

Kloriididest tuntum sool naatriumkloriid (NaCl) ladestub tavaliselt müüritisese pinnale moodustades soolakristalle, mida nimetatakse haliidiks. Sool kasvab telliste pinnale piklike valgete kiududena. Naatriumkloriid võib müüritisese pinnale jõuda koos meretuultega ja sellisel juhul see enamasti suuri kahjustusi ei põhjusta. Hüdratsiooni või dehüdratsiooni protsessi käigus võib see tekitada müüritisese pinnal teiste soolade lahustumist, kuna erinevatel temperatuuridel võib see mõjutada ka teisi võimalikke kahjustavaid soolasid. [5]

Karbonaadid

Karbonaatidest üks tuntumaid kaltsiumkarbonaat (CaCO₃) on sideaine lubimördi ja lubjakivi koostises. Sellest moodustunud soolakristalle kutsutakse kaltsiidiks. Enamasti ei põhjusta kaltsiumkarbonaadi kristalliseerumine müüritisese lagunemist, kuid see võib piisava niiskuse korral lahustuda ja happeliste soolade olemasolul uuesti kristalliseeruda. Uuesti kristalliseerumisel moodustuvad väga tugevad ja lahustuvad koorikud nagu näiteks stalaktiidid. [5]

2.2 Ohverkrohvide toime soolade eemaldamisel

Ohverkrohve on olemas mitmeid liike ning nende müüritise pinnal toimimine on erinev. Näiteks on olemas krohvid, mis toovad soolad krohvi pinnale, kus need kristalliseeruvad ja tekib krohvi mitte kahjustav eflorestsents. Samuti on olemas ohverkrohvid, kus soolad kogunevad krohvi sisse ja kristalliseeruvad krohvi poorides. Sellisel viisil soolade eemaldamiseks peab arvestama sellega, et ohverkrohvis oleks piisavalt poore ja ruumi soolade kristalliseerumiseks. [4] Ohverkrohvidega soolade eemaldamiseks on oluline teada müüritisel esinevaid soolasid. Suuremate molaarmassidega soolasid nagu naatriumsulfaati on kõige parem eemaldada ohverkrohvidega, kus on väiksem poorsus, aga suur hulk suuremaid poore [30]. Soolade efektiivseks eemaldamiseks peaksid krohvis olevad poorid olema diameetrilt suuremad kui 1 μm [30, 31].

Ohverkrohvid suudavad eemaldada soolasid, kui seina pinnal või selle lähedal toimub aurustumine. Enamasti suudavad need krohvid eemaldada soolasid müüritise pinna lähedalt ja seetõttu sõltub nende krohvide toimimine suhtelisest õhuniiskusest. Samuti on krohvi tõhusus sõltuv krohvikihi paksusest: mida paksem on krohv, seda rohkem see suudab sooli imada. Õhema krohvikihi puhul võib tekkida müüritise ja krohvikihi vahele soolakiht, mis kahjustab müüritist. [4]

Ohverkrohvide poorsus mõjutab soolade liikumist müüritisest krohvi. Kui ohverkrohvi poorid on väikesed (alla 0,1 μm), siis toimub aeglane aurustumine. Kui niiskus liigub läbi ohverkrohvi aeglaselt, siis toimub ka soolade aeglane liikumine ja müüritisest soolade eemaldamine toimub alles pikas perspektiivis. Kui ohverkrohvi poorid on suuremad, siis toimub kiirem aurustumine ja seetõttu ka soolade liikumine. Sellises olukorras toimub enamasti aurustumine krohvi sees ja seetõttu koguneb enamus sooli ohverkrohvi sisse, mitte selle pinnale. [2]

2.2.1 Lubikrohv

Lubipõhiseid mörte kasutatakse krohvimiseks, vuukide täitmiseks või pragude parandamiseks. Lubikrohve kutsutakse ka ohverkrohvideks, sest see suudab eemaldada müüritisest soolasid. [31] Lubikrohvi koostisosadeks on lubjapasta, täitematerjal ja vesi. Täitematerjalina kasutatakse tavaliselt liiva, mille hulka võib lisada ka purustatud lubjakivi. Lubjapastat ja täitematerjali võetakse lubikrohvi jaoks tavaliselt 1:3 suhtega. Kvaliteetse lubikrohvi jaoks on vajalik, et täitematerjali ja sideaine vahekord oleks õige ning, et täitematerjal oleks puhas ja sobilikus läbimõõdus. [32]

Lubimörti hinnatakse, sest see on lihtsasti töödeldav ja hea nakkuvusega, samas jääb selle tugevus üsna väikeseks [9]. Lubikrohv on hingav materjal, mis laseb niiskust läbi.

Tänu sellele omadusele ennetab see seinakahjustusi ja hoiab ruumides paremat sisekliimat. Lubikrohvi kasutatakse, et kaitsta müüritisi ilmastikuolude eest. Seda kantakse fassaadidele mitmes kihis, kokku 15 kuni 25 mm paksuselt. Krohvi on soovituslik peale kanda õhukeste kihtidena, sest sellisel viisil tekib kihtide vahel hea nake ja lubikrohvi eluiga pikeneb. [32]

Soolade eemaldamiseks sobib kasutada lubikrohvi, kui sest selle enamus poorid on diameetril üle 0,1 μm [31]. Lubikrohvi poorsust saab muuta lisanditega. Poorsuse suurendamiseks kasutatakse lubikrohvis sepioliiti, mis aitab suurendada lubikrohvi imavust, tavaliselt lisatakse seda mineraali krohvi sisse umbes 5% [30]. Soolade veelgi efektiivseks eemaldamiseks võib lubikrohvis vähendada täitematerjali osakaalu. Näiteks Lätis viidi läbi 2009. aastal uurimus, kus avastati, et mida väiksem on täitematerjali sisaldus lubikrohvis, seda paremini imab krohv vett ja sellega koos ka soolasid. Sealses läbiviidud katses kasutati lubikrohve suhtega 1:2, 1:2,5 ja 1:3 ehk 1 osa lubipastat ja 2, 2,5 või 3 osa täitematerjali ning tulemused näitasid, et kõige paremini imas soolasid madalama täitematerjali sisaldusega lubikrohvid. [31]

2.2.2 Savikrohv

Savikrohv on hinnatud ja keskkonnasäästlik ehitusmaterjal, mis koosneb naturaalistest koostisosadest nagu savi, liiv, taimne kiud ja vesi. Taimne kiud annab savikrohville elastsust ja võimaldab väiksemaid aluspinna liikumisi ilma krohvi pragunemiseta. Samuti aitavad krohvis olevad kiud suurendada selle tulepüsivust. Savikrohvi saab kasutada paljude erinevate pindade peal nii lagedel kui seintel. See sobib kasutamiseks näiteks puidu, vana krohvipinna, telliste, looduslike kivide ja betooni peal. Seda soovitatakse kasutada pigem kuivades siseruumides, sest savikrohv ei talu otsest kokkupuudet veega. Samuti on savikrohv väga hea õhu temperatuuri reguleerija ning õhuniiskuse tasakaalustaja, sest hoiab siseruumides niiskust 40-60% juures. Savikrohv imab endasse õhus lenduvaid saasteaineid ning neutraliseerib ebameeldivaid lõhnu. Kuna savikrohvi omadusteks on imada endasse niiskust ja soolasid, siis saab seda kasutada ka ohverkrohvina. [33]

2.2.3 Termokrohv

Termokrohvi põhilisteks koostisosadeks on hüdraatlubi, termiliselt töödeldud vulkaaniline silikaatliiv, metakaoliin ning muud lisandid [34]. See on soojusisolatsioonkrohv, mis on tänu suurele poorsusele soojapidav ja hea heliisolaator. Termokrohv on hingav materjal, mis laseb veeaurul konstruktsioonis liikuda. Kuna antud krohv ei takista niiskuse liikumist, siis seetõttu ei teki konstruktsioonis ka kondenseerumist ega hallitusega seotud probleeme. Termokrohvi on lihtne paigaldada,

sest see on kerge materjal, mida saab kanda isegi ümaratele kui ebatasastele pindadele. Samuti saab vajaduse korral krohvi ülekrohvida või värvida. Selle puuduseks on madal survetugevus ning kõrge kapillaarjuhtivus, mistõttu vajab see viimistluskihina pealiskrohvi ja ei sobi kasutamiseks märgades ruumides või vundamentides. [35] Samas teevad selle krohvi puudused selle väga heaks ohverkrohviks. Mida nõrgem on krohv ja mida parem on selle kapillaarjuhtivus, siis seda efektiivsemalt kogunevad soolad müüritisest krohvi kihti. Kui krohv oleks suure survetugevusega, koguneksid paljud soolad müüritisest tellistesse ja hakkaksid seda nõrgestama. Lihtsam ja odavam on koguda soolasid ohverkrohvi, mida soolakristallid kahjustavad vaid vähesel määral või mida saab kergemini parandada ja välja vahetada.

3. SOOLDUMISE JA SOOLADE EEMALDAMISE LABORATOORSED UURINGUD

Katsete eesmärk oli uurida keraamiliste telliste ja moodul silikaattelliste kapillaartõusu, vee- ja soolade mahutatavust ning lisaks määrati telliste tihedus ja painde- ning survetugevus. Samuti uuriti ohverkrohvide (termo-, savi- ja lubikrohv) kasutamise mõju soolade eemaldamisele ehitustelistest. Telliste sooldumise ja kahjustavate soolade eemaldamise katsete püstitamisel lähtuti varasemast Itaalia teadlaste E. Franzoni ja S. Bandini [36] 2012. aasta uuringu metoodikast ja tulemustest ning varasemate H. Sirelpuu ja K. Kuslapi magistritööde [37, 38] tulemustest. Soolade eemaldamise katsete metoodika ohverkrohvidega kavandati koostöös Mihkel Kiviste ja Karin Mikhelsooga. Magistritöös kasutatud ohverkrohvid toodi laborisse katsetamiseks tänu Karin Mikhelsoole järgnevatest ettevõtetest: RestHunt Ekspert OÜ termokrohv, Saviukumaja OÜ lubikrohv ja savikrohv. Uuringutes kasutati šamott-telliseid, Wienenberger OÜ poolt toodetud keraamilisi telliseid, AS Silikaadist silikaattelliseid. Esimeste katsetega alustati laboris detsembris 2022 ja lõpetati novembris 2023. Katsed toimusid TalTech Tartu Kolledži laboriruumides ja katsemajades ning soolasisalduse laboritulemused saadi TalTechi Keskkonnatehnoloogia Teaduslaborist Tallinnas tänu Priit Tikkerile.

Järgnevad katseplaani etapid koostati koos juhendaja Mihkel Kivistega:

- 1) Tellistes vee kapillaartõusu uurimine
- 2) Telliste veeimavuse uurimine
- 3) Telliste naatriumkloriidi soolalahuse imavuse uurimine
- 4) Telliste tiheduse, surve- ja paindetugevuse määramine
- 5) Telliste soolamahtuvuse uurimine NaCl, NH₄NO₃ ja Na₂SO₄-ga
- 6) Tellistest soolade kontsentratsiooni vähendamine ohverkrohvide abil

3.1 Vee kapillaartõus tellistes

3.1.1 Metoodika

Katse eesmärgiks oli uurida erinevates ehitustellistes vee kapillaartõusu. Kapillaartõusu mõõtmiseks valiti välja kolme tüüpi tellised: keraamilised tellised, silikaattellised ja šamott-tellised. Ehitustelliste valikul lähtuti Eesti ehitusturul viimase sajandi jooksul tuntumatest kasutusel olevatest tellistest.

Kõigist kolmest tüübist tellisest valiti välja kolm telliskivi, mille massid mõõdeti kaaluga Kern EW6200-2NM (Max 6200 g, e=0,1g, Min 1g) ning asetati püstises asendis veevanni, kuhu valati juurde 3 cm kraanivett. Seejärel jälgiti 11 päeva jooksul vee kapillaartõusu tellistes visuaalselt ja mõõdeti, kui palju kivide mass suureneb ja kui kõrgele kivide külgede pinnal nähtav veepiir tõuseb. Kuna kivid hakkasid endasse vett imama, siis tuli jälgida ka veetaset vannis ning vett vajadusel juurde valada. Kuna katse käigus avastati, et keraamiline tellis ja šamott-tellis on alguses üsna kiire kapillaartõusuga, siis otsustati katsed korrata ja mõõta esimesel neljal tunnil telliskivide kapillaartõusu iga tunni möödudes. Teine katse kestis kokku 4 päeva.

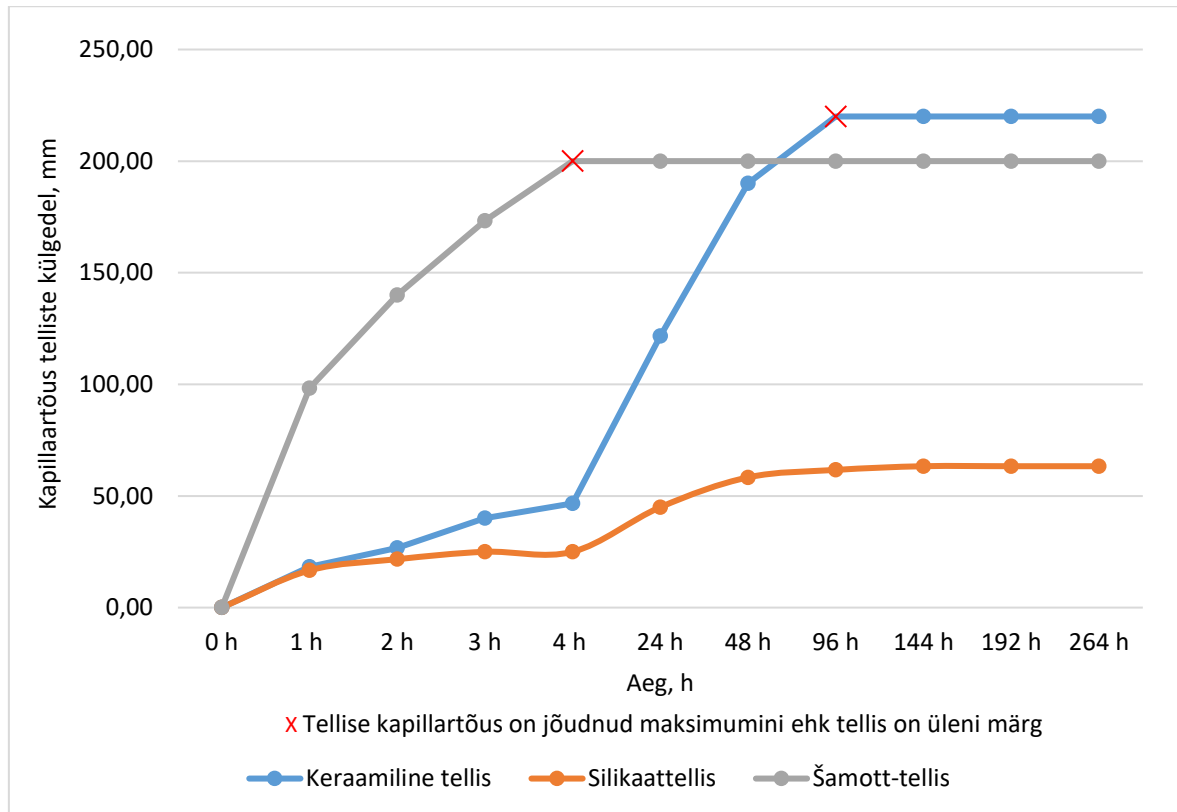
Kapillaartõusu kõrgust mõõdeti joonlauaga millimeetrites tellise alumisest äärest kuni maksimaalse ülemise veepiirini tellise küljel nagu on näha jooniselt 3.1. Saadud tulemusest lahutati maha 30 mm, mis oli vee kõrgus vannis. Vastavalt tellise sordile olid veevanni asetatud telliste kõrgused erinevad: keraamiliste telliste ja silikaattelliste kõrgus oli 250mm, šamott-tellistel 230mm. Kui maha lahutada vedeliku kõrgus vannis 30 mm, siis oleks saanud keraamiliste tellise ja silikaattellise maksimaalne kapillaartõus olla 220mm ja šamott-tellisel 200mm.



Joonis 3.1 Kraanivette kastetud keraamiliste telliste, silikaattelliste ja šamott-tellise kapillaartõusu mõõtmine

3.1.2 Tulemused

Jooniselt 3.2 on näha, et šamott-tellise kapillaartõus saavutas maksimumi 4 tunniga, kus kogu tellise pind oli märgunud ehk kõik materjali kapillaarpoorid olid täitunud veega, samas kui keraamiline tellis jõudis maksimumini 4 päevaga. Silikaattellise kapillaartõus oli märgatavalt väiksem ja tõusis 11 päeva jooksul keskmiselt 63mm veepiirist ülespoole, sealjuures oluliselt märgatavat kapillaartõusu ei olnud näha juba alates teisest päevast.



Joonis 3.2 Keraamiliste telliste, silikaattelliste ja šamott-telliste kapillaartõus 11 päeva jooksul. Iga punkt tähistab kahe katse mõõtmistulemuste aritmeetilist keskmist.

Tulemuste põhjal võib järeldada, et šamott-tellis ja keraamilisel tellisel on lahtine poorsus ning vesi saab kapillaarjõudude toimele liikuda kiiresti läbi materjali. Silikaattellis on väiksem poorsus ja avatud pooride hulk, kui eelnevalt katses kasutatud tellistel, seetõttu liigub vesi kapillaarjõudude toimele aeglaselt materjalist ülespoole. Samuti võib katse tulemuste põhjal oletada, et silikaattellis on kinnine poorsus, mistõttu tellises olevad poorid ei täitu veega immutamisel. Ka kirjanduse analüüsis selgus, et silikaattellis on võrreldes šamott-tellisega palju külmaskindlam. Seda seetõttu, et silikaattellis on pigem kinnine poorsus ja šamotil rohkem lahtine poorsus. Mida lahtisem on poorsus, seda rohkem saab materjal vett pooridesse imada ja mis jäätumisel võib lõhkuda poore ning vähendada materjali tugevust.

3.2 Veeimavus tellistes

3.2.1 Metoodika

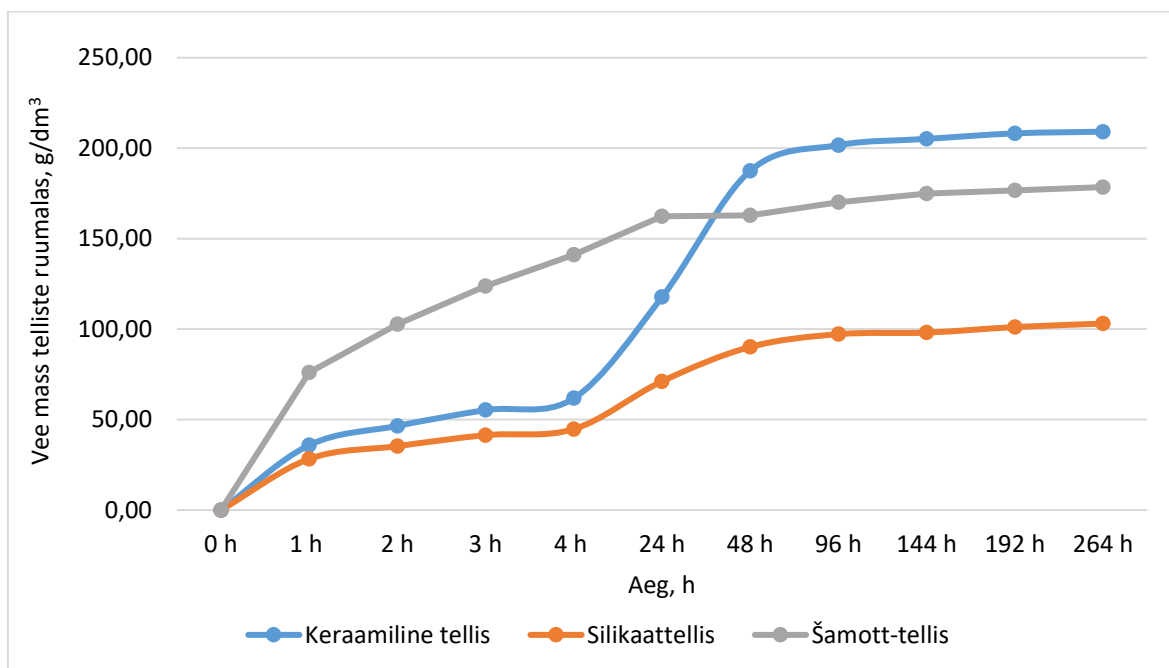
Telliste veeimavuse katsel kasutati esialgu kolme erinevat tellist: keraamilist tellist, silikaattellist ja šamott-tellist. Metoodika veeimavuse katsel oli sarnane vee kapillaartõusu mõõtmisega, aga katse eesmärgiks oli uurida telliste veemahutavust. Selleks mõõdeti katse jooksul pidevalt telliste massi ja selle muutust aja jooksul. Esimesena kaaluti ära 3 keraamilise tellise, 3 silikaattellise ja 3 šamott-tellise esialgne mass kaaluga Kern EW6200-2NM 0,1 g täpsusega ning mõõdeti nihiku ja joonlaua abil iga tellise kolme erineva külje pikkused, kusjuures igat külge mõõdeti kolm korda ning leiti kolme mõõtmistulemuse aritmeetiline keskmine ning tellise ruumala. Seejärel pandi tellised püstises asendis kraaniveega täidetud vanni, kus veetaset hoiti kogu katse jooksul 3 cm juures. Esimene katse kestis kokku 11 päeva ning telliste masse kaaluti paari päeva tagant. Enne kaalumisi lasti katsekehade üleliigselt veel ära nõrguda ja pühiti telliste pinnad üle märja lapiga. Kuna katse käigus selgus, et osade telliste veeimavus on alguses üsna kiire, otsustati katset korrata ja mõõta ka esimesel neljal tunnil iga tunni möödudes telliskivide masse. Kokku kestis teine katse 4 päeva.

3.2.2 Tulemused

Jooniselt 3.3 on näha, et šamott-tellise veeimavus oli katse esimesel 24 tunnil kõige suurem, imades selle aja jooksul tellise sisse keskmiselt $162,3 \text{ g/dm}^3$ vett. Peale ühe päeva möödumist selle veeimavus aeglustus ja jäi üsna stabiilseks kasvades järgneva 11 päeva jooksul $162,3 \text{ g/dm}^3$ ainult $178,5 \text{ g/dm}^3$. Silikaattellise ja keraamilise tellise veeimavus oli üsna sarnane esimese 4 tunni jooksul. Keraamiline tellis imas selle aja jooksul keskmiselt $61,8 \text{ g/dm}^3$ vett enda ruumala kohta ja silikaattellis $44,7 \text{ g/dm}^3$. Peale 2 päeva möödumist veevannis oli kõige rohkem enda ruumala kohta vett imanud keraamiline tellis, keskmiselt $209,1 \text{ g/dm}^3$, sellele järgnes šamott-tellis $178,5 \text{ g/dm}^3$ ja silikaattellis $103,1 \text{ g/dm}^3$.

Peale 48 tunni möödumist hakkas keraamilise tellise ja silikaattellise imavus oluliselt aeglustuma. Võib oletada, et keraamilisel tellisel toimus aeglustumine, sest enamus kapillaarpoorid olid selle aja jooksul veega täitnud. Silikaattellise veeimavus võis aeglustuda, sest üksikud lahtised kapillaarpoorid olid veega täitunud ja suure hulga kinniste pooride tõttu ei saanud vesi enam kapillaarjõudude toimele kiiresti liikuda ja jõudis tellise pinnalt aurustuda. Tulemustest võib järeldada, et keraamilise tellise ja silikaattellise vee imenduvuse kiirus on üsna sarnane, aga keraamilisel tellisel on rohkem kapillaarpoore, kuhu saab sama aja jooksul imenduda rohkem vett. Šamott-

tellise vee imenduvuskiirus on suurem teistest katses kasutatud tellistest ja selle enamused poorid täituvad kapillaarjõul liikuva veega peaaegu esimese 24 tunni jooksul.



Joonis 3.3 Keraamiliste telliste, silikaattelliste ja šamott-telliste veeimavus grammides 11 päeva jooksul. Iga punkt tähistab kahe katse mõõtmistulemuste aritmeetilist keskmist.

Peale kahte esimest katset otsustati šamott-tellis järgnevatest katsetest välja jätta, kuna selle kapillaartõusu kiirus oli teistest katses kasutatud tellistest kordades suurem. Samuti kasutatakse seda tulekindla kivina ahjude ja korstnate valmistamisel ning seetõttu puutub kokku vähemal määral nii vee kui sooladega, mis võivad väliskeskkonnas telliseid ohustada. Edasistes katsetes keskenduti ainult keraamilisele tellisele ja silikaattellisele.

3.3 Telliste soolamahtuvus ja tihedus

3.3.1 Metoodika

Telliste soolamahtuvuse katseid tehti kahte erinevat tüüpi telliskividega. Katses kasutati soolalahuseks erinevate kontsentratsioonidega naatriumkloriidi ehk keemilise valemiga NaCl. Selle katse eesmärgiks oli uurida erinevat tüüpi telliste NaCl soolalahuse imavust ja kapillaartõusu ning seda, kuidas soolade kontsentratsioon antud protsessi mõjutab.

Valiti välja Wienenberger OÜ poolt toodetud 3 keraamilist tellist ja AS Silikaadi poolt toodetud 3 silikaattellist ning kaaluti ära nende esialgne mass Kern EW6200-2NM kaaluga 0,1 grammi täpsusega. Samuti mõõdeti nihiku ja joonlauaga iga tellise kolme erineva külje pikkused, igat külge mõõdeti kolm korda ning leiti kolme mõõtmistulemuse aritmeetiline keskmine ning seejärel leiti alltoodud valemitega tellise ruumala ja tihedus.

$$V = a \times b \times h \times 0,001 \quad (3.1)$$

V – keha ruumala, cm^3 ,

a – pikkus, mm,

b – laius, mm,

h – kõrgus, mm.

$$\rho = \frac{m}{V} \times 1000 \quad (3.2)$$

ρ – materjali tihedus, kg/m^3 ,

m – proovikeha mass õhus, g,

V – proovikeha maht, cm^3 .

Järgmisena asetati tellised püstises asendis kolme kaussi nii, et igas kaussis oli üks keraamiline tellis ja üks silikaattellis. Igasse kaussi valati erineva kontsentratsiooniga NaCl soolalahus. Soolalahuste kontsentratsioonid olid järgmised:

- 0,1 mooli NaCl soolalahus ehk 2,9 g söögisoola lahustati 1 l kraanivees;
- 0,2 mooli NaCl soolalahus ehk 5,8 g söögisoola lahustati 1 l kraanivees;
- 0,5 mooli NaCl soolalahus ehk 14,5 g söögisoola lahustati 1 l kraanivees.



Joonis 3.4 Silikaattelliste ja keraamiliste telliste NaCl soolalahuse imavuse uurimine

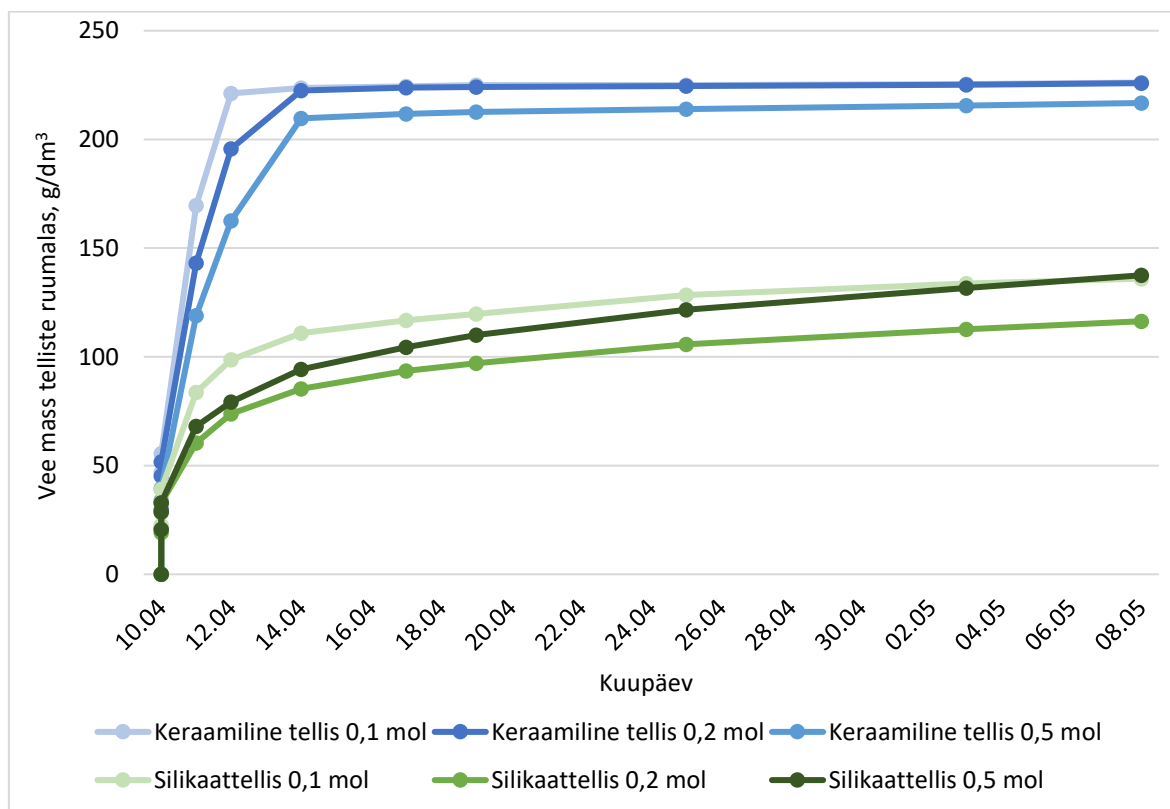
Soolalahuse vedelikutaset hoiti ühtlaselt kogu katse toimumisel 3 cm. Selleks, et visuaalselt paremat aimu saada, kuidas soolade kontsentratsioon mõjutab tellistes vee kapillaartõusu, lisati soolalahusesse värvainena tinti. Kõiki soolalahustes olnud telliseid jälgiti visuaalselt ja mõõdeti masse. Katse toimus kuu aega, kus mõõtmistulemusi pandi kirja esimesel kolmel tunnil iga tunni möödudes ja hiljem paari päeva tagant. Peale kuu möödumist võeti tellised soolalahusest välja ja jäeti õhu kätte kuivama.

3.3.2 Tulemused ja järeldus

Peale esimese kolme tunni möödumist, kui tellised olid soolalahustes seisnud, oli visuaalselt näha erinevust kapillaartõusu mõõtmisel. Väikseima kontsentratsiooniga soolalahuses ehk 0,1 moolises lahuses olnud tellistes vee kapillaartõus oli suurem ja need imasid paremini vedelikku enda sisse. Jooniselt 3.5 on näha, et mida suurem oli soolade kogus vees, seda aeglasemalt keraamiline tellis endasse vett imas. Ka kuu aja möödudes oli näha sarnast mustrit ehk keraamiline tellis, mis oli 0,1 mol soolalahuses, oli imanud kõige rohkem soolalahust ja 0,5 mol soolalahuses olnud tellis kõige vähem.

Katses kasutatud kolm silikaattellist käitusid soolalahustes teistmoodi kui keraamilised tellised. 0,1 ja 0,2 moolises lahuses olnud tellised ootuspäraselt, kus väiksema soolade kontsentratsiooniga lahuses olnud tellis imas soolalahust kiiremini kui 0,2 mol lahuses olnud tellis. 0,5 mol lahuses olnud tellise imamiskiirus oli oodatust suurem ja juba esimestel tundidel imas see rohkem lahust enda sisse kui 0,2 mol olnud tellis. Jooniselt 3.5 on näha, et 08.05 kuupäevaks oli 0,5 mol lahuses olnud silikaattellis imanud endasse rohkem soolalahust kui 0,1 mol olnud tellis. Võib oletada, et 0,5

moolises soolalahuses olnud silikaattellise imavus võis teistest erineda, sest selle poorsus oli teistsugune. Telliste tootmisel võib tulla ette mõningaid kõrvalekaldeid nii toorainetes kui valmistamisprotsessis ning nende omadused võivad lubatud piires erineda.



Joonis 3.5 Silikaattelliste ja keraamiliste telliste 0,1, 0,2 ja 0,5 moolise NaCl soolalahuse imavus kuu aja jooksul

Tabelist 3.2 ja 3.3 on näha, et keraamilise tellise soolalahuse imavus oli parem kui silikaattellisel, sest need imasid kapillaarjõudude toimele juba 48 tunniga soolalahuse enda sisse avatud kapillaarpooridesse ja hilisema kuu aja jooksul enam palju muutusi ei toimunud, sest enamus materjali poorid olid soolalahusega küllastunud. Silikaattellise soolalahuse imavus oli aeglasem ja jätkus sujuvalt terve kuu jooksul, kuna selles materjalis on vähem kapillaarpoore ning vesi liigub aeglasemalt tellise poorides ülespoole. Ka kuu aja pärast oli visuaalsel vaatlusel näha, et soolalahuse kapillaartõus silikaatides polnud jõudnud tellise ülemisse ossa ja tellise pind oli ülemises osas kuiv.

Kui võrrelda tabelis 3.2 ja 3.3 soolakristalle telliste pinnal, siis keraamilisel tellisel tekkisid kristallid soolalahuse vedeliku piirile peale kuu aja möödumist, kus toimub suurim aurustumine ja soolade kogunemine. Peale 2,5 nädalat telliste kuivamist oli soolakristalle tekkinud juurde ainult tellise alumisele äärele, kus on eeldatavalt kõige rohkem soolasid, sest see osa oli varasemalt soolalahuse sees. Silikaattellisil tekkisid esimesed soolakristallid 0,2 ja 0,5 moolises lahuses olnud telliste pinnale peale 4 päeva

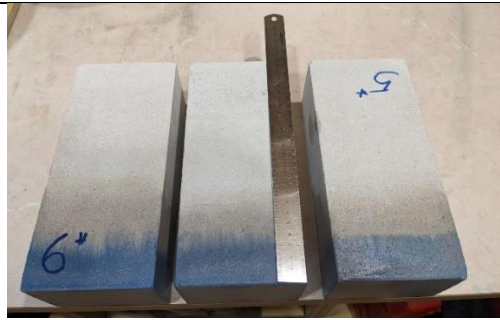
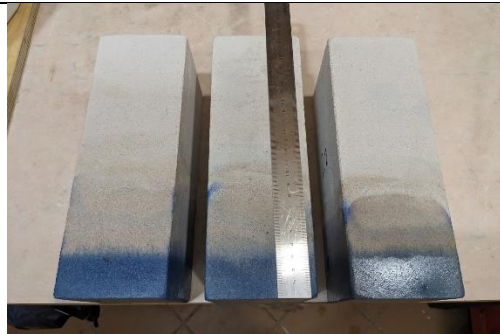
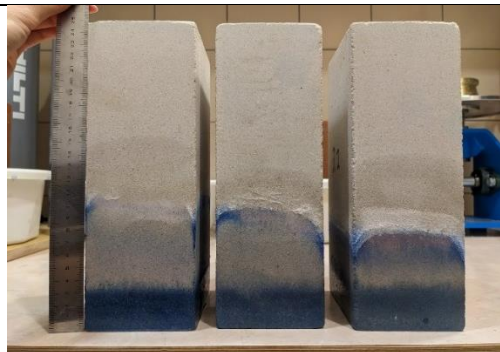
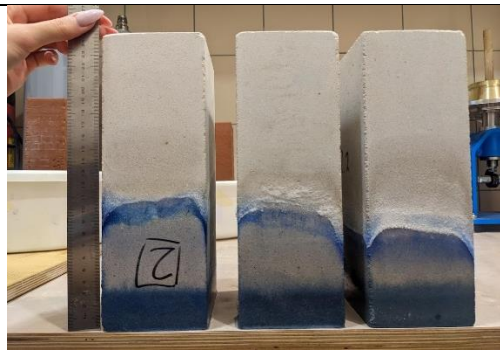
möödumist. Peale 9. päeva möödumist olid tekkinud soolakristallid ka 0,1 mol lahuses olnud silikaattellisega. Tabelist 3.2 on näha, kuidas soolakristallid tekitasid tellise külgedele kumera meniski kuju. Võib järeldada, et silikaattellisete pinnale tekkis rohkem soolakristalle, sest telliste keskosas kapillaartõusu piiril toimus pidev vedeliku aurustumine, mis tõi rohkem soolasid aurustumispunkti lähedale. Kui vedelik oli aurustunud jäid alles soolad, mis kristalliseerusid telliste pinnale. Keraamilistes tellistes toimus aurustumine ühtlaselt kogu tellise ulatuses, kuna need olid üleni niisked. Seetõttu ei tekkinud nii suurt kontsentreeritud aurustumispunkti ja soolad jaotusid tellises ühtlaselt.

Tabelist 3.1 on näha telliste massid enne soolalahuse katset ja peale soolalahusest välja võtmist, kui need olid 3,5 kuud toatemperatuuril kuivanud. Telliste masside vahest on näha, et mida suurema kontsentratsiooniga NaCl lahuses tellis ligunes esimesed kuu aega, siis seda suurem oli selle masside erinevus. Ehk siit võib oletada, et suurema kontsentratsiooniga lahustes olnud tellised imasid rohkem soolasid.

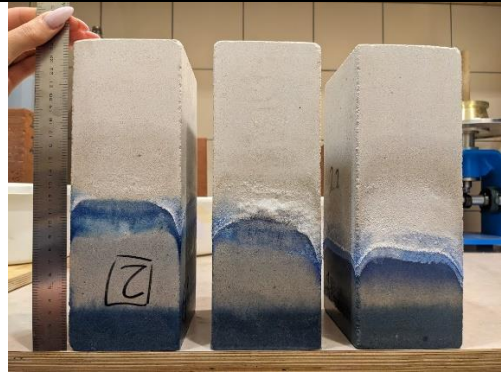
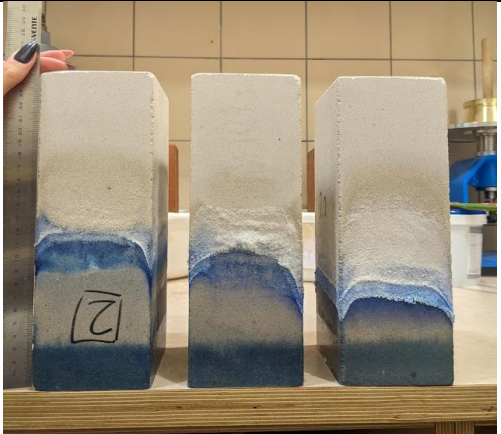

Tabel 3.1 Kuivade silikaattellisete ning keraamiliste telliste tihedus ja masside erinevused võrreldes katse alguse ja peale NaCl soolalahuse katset

Nimetus	Tihedus, kg/m³	Esialgne mass (10.04.2023), g	Katsejärgne mass (25.08.2023), g	Masside vahe, g
Keraamiline tellis 0,1 mol	1975,62	3969,72	3989,74	20,02
Keraamiline tellis 0,2 mol	2001,64	3979,42	4005,41	25,99
Keraamiline tellis 0,5 mol	2056,78	3991,26	4037,06	45,80
Silikaattellis 0,1 mol	1830,17	4773,74	4835,82	62,08
Silikaattellis 0,2 mol	1846,26	4935,38	5003,57	68,19
Silikaattellis 0,5 mol	1835,64	4838,99	4950,09	111,10

Tabel 3.2 Silikaattelliste visuaalsed eristatavad muutused ühe kuu jooksul NaCl soolalahuses (vasakul 0,1 mooli lahuses olnud tellis, keskel 0,2 moolises ja paremal 0,5 moolises)

Pilt	Kuupäev	Visuaalne kirjeldus
	12.04.2023	Peale 2 päeva soolalahustes on silikaattelliste kapillaartõus suhteliselt võrdne. Soolakristallide teket ei ole telliste pindadelt näha.
	14.04.2023	Peale 4 päeva möödumist on silikaattelliste kapillaartõus erinev. Kõrgema soolasisaldusega lahuses olnud tellistel on väiksem kapillaartõus. Soolakristallide teket on näha 0,2 ja 0,5 mol lahustes olnud telliste pindadelt kapillaartõusu piiril.
	19.04.2023	9. päeval on ka 0,1 mol lahuses olnud tellise pinnale tekkinud õrnad soolakristallid. 0,5 mol lahuses olnud tellise soolakristallid joonistuvad pinnal selge paraboolse kujuna välja.
	25.04.2023	15. päeval on kõikide telliste pinnal näha selge paraboolse piirina soolade kristalliseerumist.

Tabel 3.2 järg. Silikaattelliste visuaalsed eristatavad muutused ühe kuu jooksul NaCl soolalahuses (vasakul 0,1 mooli lahuses olnud tellis, keskel 0,2 moolises ja paremal 0,5 moolises)

Pilt	Kuupäev	Visuaalne kirjeldus
	03.05.2023	23. päeval on soolade kristalliseerumine veelgi märgatavam. 0,2 ja 0,5 mol lahustes olnud kivide pindadel hakkavad soolakristallid moodustama suuremaid kogumeid.
	12.05.2023	32. päeval on telliste visuaalne väljanägemine üsna sarnane nagu 9 päeva tagasi. Katse loetakse lõppenuks ja kõik tellised võetakse soolalahustest välja ning jäetakse toatemperatuuril kuivama.
	31.05.2023	Tellised on kuivanud toatemperatuuril 2,5 nädalat. Enamus vett on telliste seest aurustunud ja nende alumisele külgedele on tekkinud sooladest eflorestsents.

Tabel 3.3 Keraamiliste telliste visuaalselt eristatavad muutused ühe kuu jooksul NaCl soolalahuses (vasakul 0,1 mooli lahuses olnud tellis, keskel 0,2 moolises ja paremal 0,5 moolises)

Pilt	Kuupäev	Visuaalne kirjeldus
	11.04.2023	24 tundi peale soolalahustesse asetamist on telliste kapillaartõus erinev. 0,1 mol lahuses olnud tellisel on kapillaartõus suurim ~ 21cm ja mida suurem on olnud soolade kontsentratsioon lahuses, seda aeglasemalt on toimunud kapillaartõus. 0,2 mol lahuses olnud tellise kapillaartõus on ~ 18 cm ja 0,5 mol lahuses ~ 16 cm.
	12.04.2023	Peale 2 päeva möödumist on 0,1 ja 0,2 mol lahuses olnud tellised üleni märjad, 0,5 mol lahuses oleva tellise kapillaartõus on olnud aeglasem ja kivi ülemine osa ~2 cm on veel kuiv.
	12.05.2023	32. päeval on telliste välimus üsna sarnane esialgsega. 0,5 mol lahuses olnud tellise nurkadesse on tekkinud soolakristallide kogumid. Lahusesse lisatud tint on kogunenud lahuse veepiiri äärde. Katse loetakse lõppenuks ja tellised võetakse soolalahustest välja ning jäetakse toatemperatuuril kuivama.
	31.05.2023	Tellised on kuivanud 2,5 nädalat ja enamuse vett on telliste seest aurustunud. Telliste alumised ääred, mis olid soolalahuse sees, on osaliselt kaetud soolakristallidega. 0,5 mol olnud tellisel on kõige rohkem soolakristalle ja selle alumine pind on peaaegu üleni valge. 0,1 mol olnud tellise pinnal on üksikud soolakogumid.

3.4 Telliste survetugevuse ja paindetugevuse määramine

3.4.1 Metoodika

Telliste survetugevuse katse viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 772-1:2011 „Müürikivide katsemeetodid. Osa 1: Survetugevuse määramine“ [39]. Telliste paindetugevuse katse tehti vastavalt standardile EVS-EN 772-6:2005 „Müürikivide katsemeetodid. Osa 6: Betoonmüürikivide paindetõmbetugevuse määramine“ [40]. Surve- ja paindetugevuse eksperimendis otsustati kasutada NaCl soolalahuse katses kasutatud silikaattelliseid ja keraamilisi telliseid. Antud tellised olid erinevate kontsentratsioonidega soolalahustes seisnud 1 kuu ning seejärel 3,5 kuud toatemperatuuril kuivanud.

Surve- ja paindetugevuse mõõtmiseks kasutati Tartu Kolledžis asuvat Form-Test Mega7-2000-100 D katsemasinat. Enne telliste katsemasinasse panemist mõõdeti nihikuga ära katsekehade mõõtmed. Nii pikkuse, laiuse kui kõrguse mõõtmist korrati igal tellisel kolm korda, et saada teada kivi pikkuse, laiuse ja kõrguse mõõtmete keskväärtused. Esimesena kasutati katsemasinat purustava paindejõu leidmiseks, kus tellis asetati lapiti asendis katsemasina kahele toele, mille vahekaugus oli 200mm. Suurimat paindetugevust mõõtes purunes kivi enam-vähem pooleks. Paindetugevuse arvutamiseks leiti eelnevalt saadud mõõtmete keskväärtustest tellise surutav pindala ja paindemasinalt loeti maksimaalne purustav jõud. Iga katsekeha paindetugevus arvutati välja järgneva valemiga:

$$R_p = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3.3)$$

R_p – paindetugevus, N/mm²,

F – purustav jõud, N,

l – tugevaheline kaugus, mm,

b – proovikeha laius, mm,

h – proovikeha kõrgus, mm.



Joonis 3.6 NaCl soolalahuses olnud keraamilise tellise purustava paindejõu määramine Form-Testi katsemasinaga

Seejärel võeti paindekatsel saadud mõlemad poolikud tellise tükid ja mõõdeti nihikuga üle uued katsekehade mõõdud, mõõtmist korrati kolm korda. Mõõtmistulemustest arutati välja pikkuse, laiuse ja kõrguse keskväärtused ja poolikute telliste uus surutav pindala. Poolikud kivid pandi ükshaaval katsemasinasse pressi alumise plaadi keskele, katsekeha peale asetati paar terasketast, et kivi ülemine pind puutuks kokku pressi ülemise terasplaadiga. Katsekeha koormati ühtlaselt kuni kivi pragunemiseni ning siis võeti katsemasina näidikult suurim tellist purustav jõud. Iga pooliku tellise survetugevus arutati välja järgmise valemiga:

$$f_{sc} = \frac{F}{ab} \quad (3.4)$$

f_{sc} – proovikeha survetugevus, N/mm²,

F – purustav jõud, N,

a – proovikeha pikkus, mm,

b – proovikeha laius, mm.

3.4.2 Tulemused

Katses kasutatud Wienerberger OÜ keraamilise tellise toote spetsifikatsioonis on kirjas, et tellise survetugevus peaks olema 45 N/mm² [41]. Magistritöö katses NaCl lahuses olnud telliste survetugevused on kõik suuremad kui 45 N/mm². Ehk soolad ei ole 1 kuu jooksul telliseid kahjustanud nii, et nende tugevus oleks vähenenud alla tootjapoolsete näitajate. Tootja AS Silikaadi spetsifikatsioonis on kirjas, et tellise survetugevus on 25 N/mm² ja paindetugevus 4 kuni 5 N/mm² [21]. Katses saadud silikaattellise survetugevused on sellest tulemusest kõik suuremad ning vastavad tootja andmetele. Sama ei saa öelda silikaattelliste paindetugevuse kohta, kus ühe tellise paindetugevus on veidi alla spetsifikatsioonis toodud näitaja ehk 0,1 moolises lahuses olnud tellise paindetugevus on 3,05 N/mm² < 4 N/mm². Antud katse tulemuste järgi võib öelda, et üldiselt olid silikaattelliste ja keraamiliste telliste spetsifikatsioonis välja toodud näitajad väiksemad kui katses saadud tulemused. Ehk NaCl soolalahus ei ole 1 kuu jooksul keraamilisi ja silikaattelliseid nii palju nõrgestanud, et need ei vastaks enam toote spetsifikatsioonile.

Tabel 3.4 Keraamiliste telliste ja silikaattelliste paindetugevus ja keskmine survetugevus

Nimetus	Paindetugevus, N/mm²	Survetugevus, N/mm²
Keraamiline tellis 0,1 mol	7,63	54,28
Keraamiline tellis 0,2 mol	7,19	66,71
Keraamiline tellis 0,5 mol	9,46	50,00
Silikaattellis 0,1 mol	3,05	27,70
Silikaattellis 0,2 mol	6,20	31,06
Silikaattellis 0,5 mol	5,90	27,41

3.5 Telliste soolamahtuvus NaCl, NH₄NO₃ ja Na₂SO₄-ga

3.5.1 Metoodika

Teises soolamahtuvuse katses kasutati järgmisi puhtaid soolasid, et imiteerida võimalikult agressiivset soolast keskkonda: NaCl, NH₄NO₃, Na₂SO₄. Antud kolme soolaga tehti 0,5 mol lahus, mis sisaldas 14,5g NaCl, 20g NH₄NO₃ ja 35,5g Na₂SO₄, sellele lisati 1 l kraanivett. Saadud lahus segati korralikult läbi, et kõik lisatud soolakristallid lahustuksid. Soolasid kaaluti Kern kaaluga EW6200-2NM (Max 6200 g, e=0,1g, Min 1g).

Soolalahust valati vanni 3 cm ja vedelikutaset hoiti ühtlasel tasemel kogu katse toimumisel. Vanni peale asetati vineer, et vähendada vedeliku aurustumist lahusest. Koos soolalahusega pandi vanni pikali asendis 3 keraamilist tellist ja 3 silikaattellist. Enne telliste vanni asetamist kaeti kõikide telliste küljed Kiilto OY poolt hüdroisolatsiooniga Fibergum (joonis 3.7). Hüdroisolatsiooni kasutati selleks, et tekitada võimalikult autentne olukord müüritisele, kus soolad ei saaks välja kristalliseeruda ja vesi ei saaks välja aurustuda telliste vabadelt külgedelt. Soolalahuses olnud kuue tellise masse mõõdeti katse jooksul korduvalt. Tellised ligunesid soolalahuses 09.05.2023 kuni 04.10.2023 ehk kokku 5 kuud.



Joonis 3.7 Silikaattelliste ja keraamiliste telliste katmine hüdroisolatsiooniga

Peale 5 kuu möödumist võeti hetkeks kõik tellised vannist välja, et neist võtta proovid soolasisalduse määramiseks. Enne katse algust puhastati mehaaniliselt Hilti SDS Plus puuri (TE-CX 20/22, tööpikkus 150 mm), et saada tellistest võimalikult puhas proov. Soolasisalduse usaldusväärseks määramiseks oli vaja puurida vähemalt 10 g tellisepuru. Igasse tellisesse puuriti 04.10.2023 Hilti (TE 4-A22) lööktrelliga auk ja puurimisel

saadud kivipuru koguti igast tellisest eraldi kilekottidesse, mis kaaluti ära (joonis 3.8). Seejärel uhmerdati uhmriga saadud puru veelgi peenemateks osadeks ja kaaluti välja 5 g, millele lisati 100 ml destilleeritud vett. Saadud lahusest võeti proov ja saadeti 50 ml anumates TalTechi Keskkonnatehnoloogia teaduslaborisse (juht prof. Sergei Preis) teadur Priit Tikkerile, et määrata ionkromatograafilise seadmega (ECO IC eluendi juhtivuse keemilise pärssimisega Metrohm Ltd, kolonn METROSEP A Supp 5 250 mm x 4,0 mm) nitraatide, sulfaatide ja kloriidide kontsentratsioon tellistes. Analüüsi ettevalmistamiseks filtreeriti proovid läbi 0,45 µm tselluloos-atsetaat (CA) membraanfiltrit (tootja Whatman) ja lahjendati 10 korda. Tabelis 3.5 esitatud tulemuste saamiseks korrutati ionkromatograafis saadud kontsentratsiooni tulemused 10-ga.

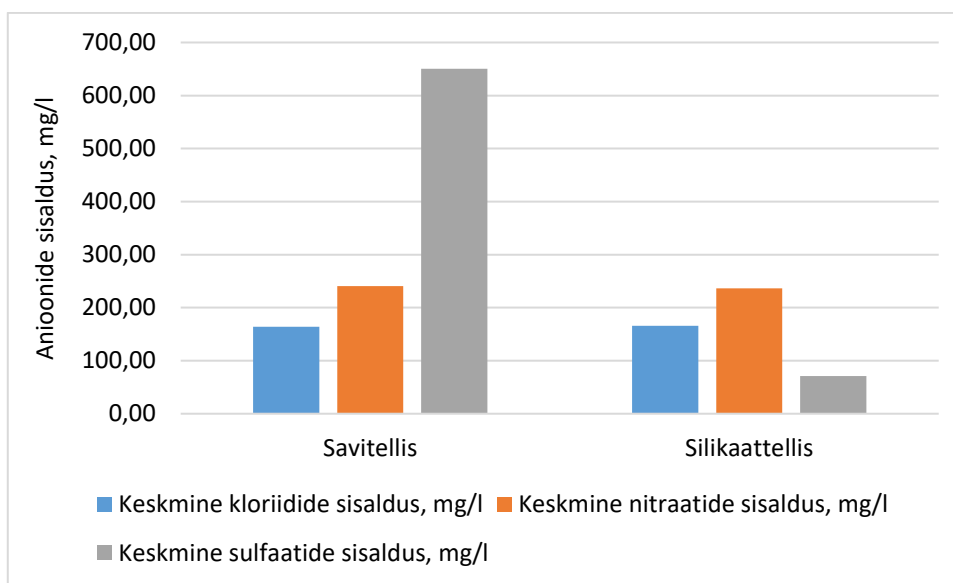


Joonis 3.8 Soolalahuses olnud keraamilise tellise lööktrelliga puurimine katseproovi valmistamiseks

3.5.2 Tulemused ja järeldus

Jooniselt 3.9 on näha, et katses kasutatud Wienerberger OÜ keraamilised tellised sisaldasid peale 5 kuud soolalahuses immutamist kõige rohkem sulfaate (keskmiselt 650 mg/l), järgmisena nitraate (keskmiselt 241 mg/l) ja kõige vähem oli telliste sisalduses kloriide (keskmiselt 164 mg/l). See on loogiline tulemus, sest katses kasutatud soolalahusesse lisati kõiki soolaid 0,5 mooli, aga keemilise aine moolikontsentratsioon ei vasta aine massikontsentratsioonile. Ehk näiteks 0,5 mooli Na_2SO_4 on kaalult üle kaks korra raskem kui 0,5 mooli NaCl . Kuna naatriumsulfaat oli antud soolalahuses kõige suurema molaarmassiga (142 g/mol) ja sellele järgnevad ammoniumnitraat (80 g/mol) ja naatriumkloriid (58,5 g/mol), siis on laborist saadud anioonide sisaldused ootuspärased.

Pärast 5-kuulist soolalahuses immutamist sisaldasid AS Silikaadi poolt toodetud silikaattellised sooladest peamiselt nitraate (keskmiselt 236 mg/l) ja kloriide (keskmiselt 166 mg/l). Sulfaatide sisaldus oli nendes tellistes kõige madalam (keskmiselt 71 mg/l), kuigi eelduslikult soolalahuse massikontsentratsiooni järgi oleks oodanud, et selle soola sisaldus on silikaatides kõige suurem, kuna lahus sisaldas grammides kõige rohkem naatriumsulfaati.



Joonis 3.9 Keraamiliste telliste ja silikaattelliste keskmine anioonide sisaldus peale 5 kuud 0,5 moolises soolalahuses NaCl, NH₄NO₃ ja Na₂SO₄-ga

Kui omavahel võrrelda silikaattellise ja keraamilise tellise anioonide sisaldust, siis mõlemad tellised imasid enda sisse enam-vähem võrdselt kloriide ja nitraate. Silikaatide keskmine kloriidide sisaldus oli 166 mg/l ja keraamilisel tellisel 164 mg/l. Samamoodi silikaattelliste keskmine nitraatide sisaldus oli 236 mg/l ja keraamilisel tellisel 241 mg/l. Sama ei saanud öelda sulfaatide kohta, mille sisaldus keraamilistes tellistes oli kõige suurem ehk keskmiselt 650 mg/l ja mida silikaattellistes oli oodatust palju vähem, keskmiselt 71 mg/l. Sulfaatide madal sisaldus silikaatides võis olla tingitud sellest, et silikaatide poorsus on väiksem kui keraamilistel tellistel ning selles materjalis on rohkem suletud poore. Väiksema poorsuse tõttu liiguvad suured raskemad soolamolekulid väga aeglaselt silikaattellise sisse ja seetõttu on nendes naatriumsulfaatide sisaldus oluliselt madalam. Katses kasutatud sooladest oli naatriumsulfaat kõige suurema molaarmassiga 142 g/mol, sellele järgnes ammoniumnitraat ja naatriumkloriid, molaarmassid ja molaaruumalad on antud allolevas tabelis 3.5.

Tabel 3.5 Soolalahuses kasutatud soolade molaarmassid ja molaarruumalad

Keemiline valem	Molaarmass [g/mol]	Molaarruumala [cm³/mol]
NaCl	58,5	27
Na ₂ SO ₄	142	53,2
NH ₄ NO ₃	80	46,5

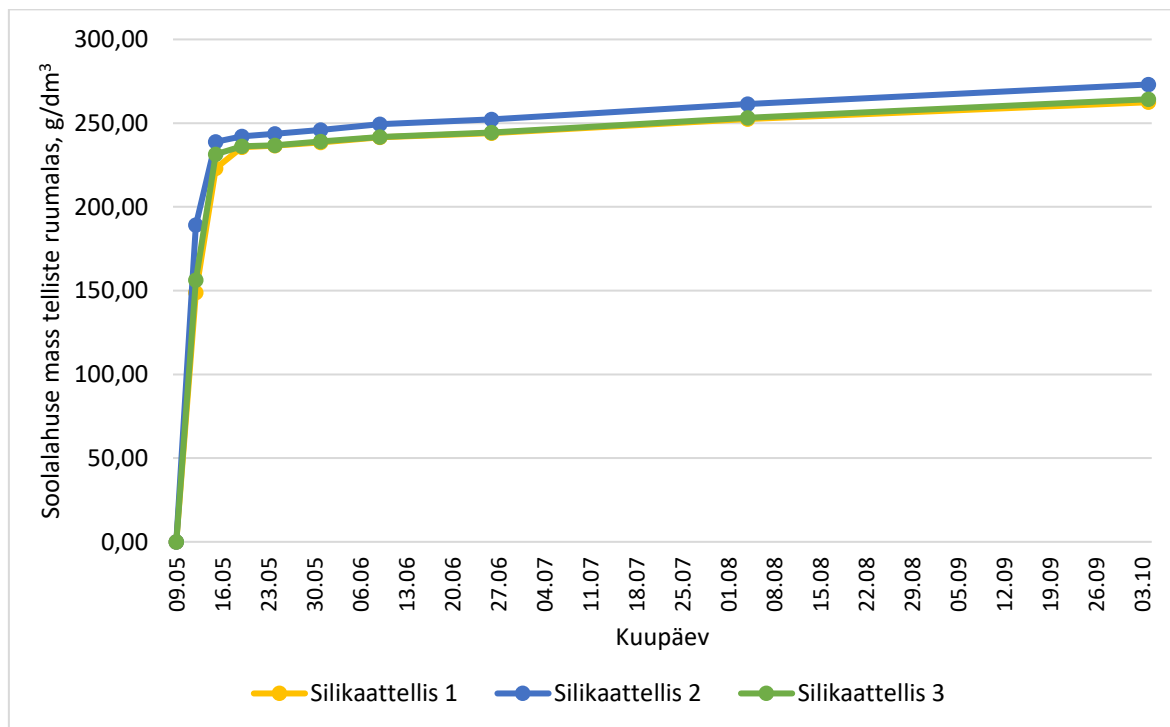
Tabel 3.6 Keraamiliste telliste ja silikaattelliste ionkromatograafilise analüüsi tulemused ehk anioonide sisaldus tellistes

Proov	Cl⁻, mg/l	NO₃⁻, mg/l	SO₄²⁻, mg/l
Keraamiline tellis 1	172.3	255.8	718.6
Keraamiline tellis 2	155.4	221.9	636.5
Keraamiline tellis 3	164.6	245.0	595.6
Silikaattellis 1	153.5	218.1	70.5
Silikaattellis 2	174.5	249.4	73.6
Silikaattellis 3	168.9	240.9	68.1

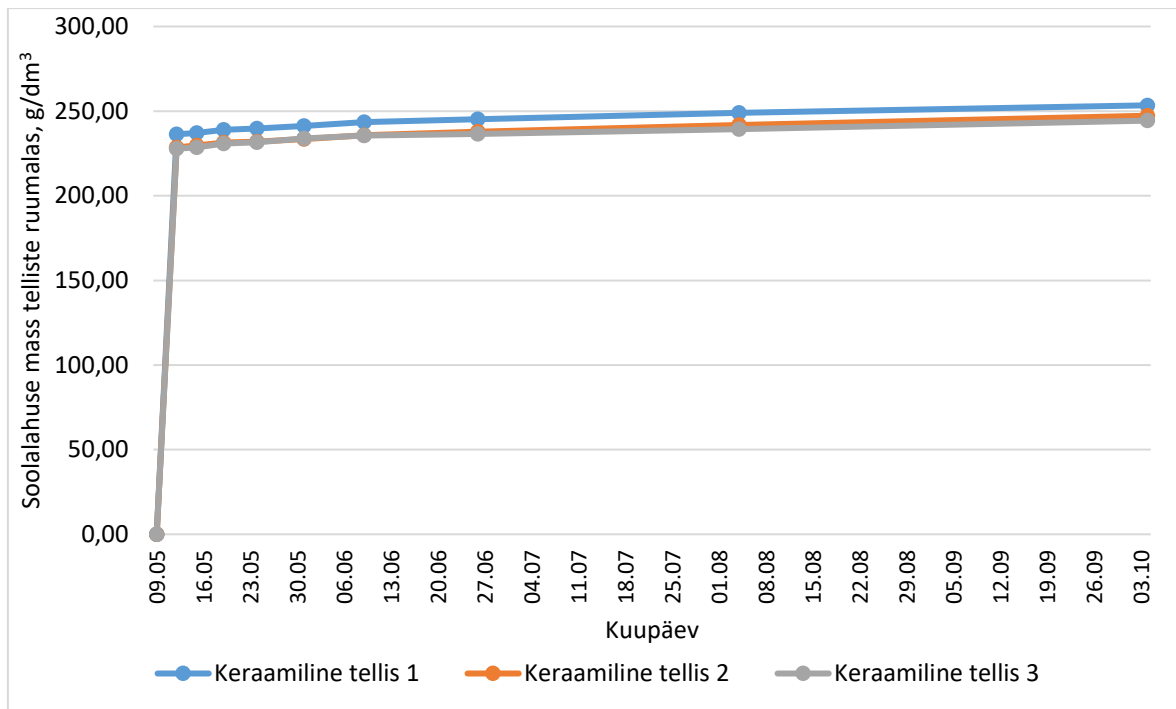
Tabelist 3.6 on toodud ionkromatograafilise analüüsi tulemused, kust selgub, et katse jooksul imendus keraamilisse tellistesse maksimaalselt 172,3 mg/l kloriide, 255,8 mg/l nitraate ja 718,6 mg/l sulfaate. Silikaattellistesse imendus maksimaalselt 174,5 mg/l kloriide, 249,4 mg/l nitraate ja 73,6 mg/l sulfaate. Selline kogus soolade anioone pole kindlasti telliste maksimaalne mahutatavus ning tellise pooridesse mahuks veelgi suuremas koguses soolasid. Kui vaadata varasemalt läbi viidud uurimusi soolade mahutatavuse kohta tellistes, siis pole leitud kindlaid maksimaalseid tulemusi, kui palju tellis või müüritis saaks soolasid sisaldada. Küll aga on toodud välja paljudes uurimustes, kui palju on müüritisest või tellistes olnud soolade sisaldus. Näiteks varasemas K. Kuslapi magistritöös on leitud umbes 200. aasta vanusest Patarei merekindluse müüritisest, mis koosnes savitellistest, paekivist ja mõrdist, maksimaalselt 1733 mg/l sulfaate ja 300 mg/l kloriide [37]. H. Sirelpuu magistritöös uuritud 200. aasta vanusest Mooste tall-tõllakuuri looduskivist ja savitellistest müüritisest on leitud maksimaalselt 739 mg/l nitraate [36]. Lätis on läbi viidud 2009. aastal laboratoorne uurimus madalal kuumusel põletatud keraamiliste tellistega, kus

peale soolalahuses immutamist võetud proovid telliste pindmisest kihist sisaldasid 2500 mg/l kloriide ja 3840 mg/l sulfaate [25].

Selles katses paigutati kõik tellised pikali asendis soolalahuse sisse ning nende maksimaalne võimalik kapillaartõus oli keraamilistes tellistes 3,5 cm ja silikaattellistes 6 cm ehk telliste mõõdetud kõrgus, millest lahutati maha soolalahuse vedelikusamba kõrgus 3 cm. Eelnevalt kirjeldatud katsetes mõõdeti telliste kapillaartõusu ja imavust püstiste tellistega, kus vee maksimaalne kapillaartõus sai olla ühe tellise pikkus ehk 22 cm. Kuna selles katses ei pidanud vesi ja soolad kapillaarselt nii kõrgele liikuma kui varasemalt, oli telliste soolalahuse imavus suurem ning seda eriti silikaattellistes. Jooniselt 3.5 on näha, et varasemalt imasid silikaattellised 1 kuu jooksul NaCl soolalahuseid 116 kuni 137 g/dm³, siis selles katses olid silikaattellised 1 kuuga imanud 242 kuni 249 g/dm³ (vt joonist 3.10), mis on eelmisest kaks korda suurem tulemus. Keraamiliste telliste kapillaarne imavus ei olnud varasemate katsega võrreldes kuigi erinev. Joonise 3.11 tulemustest selgub, et pikali asendis oli keraamiliste telliste soolalahuse imavus kuu aja jooksul 235 kuni 243 g/dm³ ning jooniselt 3.5 on näha, et püstises asendis oli nende telliste kapillaarne imavus 217 kuni 226 g/dm³. Selline tulemus näitab, kui hea kapillaarse imavusega on keraamiline tellis võrreldes silikaattellisega.



Joonis 3.10 Silikaattelliste NaCl, NH₄NO₃ ja Na₂SO₄-ga soolalahuse imavus 5 kuu jooksul



Joonis 3.11 Keraamiliste telliste NaCl, NH₄NO₃ ja Na₂SO₄-ga soolalahuse imavus 5 kuu jooksul

3.6 Soolade kontsentratsiooni vähendamine krohvide abil

3.6.1 Metoodika

Soolade eemaldamise metoodika töötati välja koos Karin Mihkelsooga, Madis Mihkelsooga ja Mihkel Kivistega. Selleks valiti välja juba eelnevas katses 3 moodul silikaattellist ja 3 keraamilist tellist, mille küljed olid eelnevalt Fibergum hüdroisolatsiooniga kaetud ja mida oli hoitud 0,5 mol soolalahuses (NaCl, NH₄NO₃, Na₂SO₄) viis kuud.

Krohvid, mis peaksid vähendama tellistes soolade sisaldust, valiti välja koos Karin Mihkelsooga. Katsesse valiti järgmised kolm krohvi: Saviukumaja lubikrohv, Saviukumaja savikrohv ja RestHunt termokrohv. Igat krohvi kanti peale ühele keraamilisele tellisele ja ühele silikaattellisele. Krohvisegude pealekandmiseks lisati kuivsegule juurde kraanivett, et segu muutuks töödeldavaks pastaks. Töös lähtuti Madis Mihkelsoo antud retseptist:

- Savikrohvi kuivsegu 20 kg segada 4 l veega;
- Lubikrohvi kuivsegu 20 kg segada 5 l veega;
- Termokrohvi kuivsegu 20kg segada 3,5 l veega.

Tellised krohviti 09.10.2023, kus kõigile kuuele ehitustellisele, mis olid 5 kuud sooladega küllastunud, kanti peale 2 cm krohvi. Enne krohvimist niisutati telliste pealmist pinda kraaniveega, et krohvil tekiks parem nakkumine kiviga. Selleks, et kelluga kanda krohvi telliste peale ühtlaselt 2 cm paksuselt, ehitati valmis kõvast papist servad tellise kahele pikemale küljele. Peale krohvimist asetati tellised kraaniveega täidetud vanni, et soolad saaksid difusiooni ja kapillaartõusu mõjul liikuda koos veega ohverkrohvide sisse. Veetaset hoiti ühtlaselt 3 cm juures kogu katse toimumisel ja vanni peal hoiti vineeritükki, et vähendada vee aurustumist soolalahusest.



Joonis 3.12 Lubikrohvi pealekandmine silikaattellisele ja keraamilisele tellisele



Joonis 3.13 Veevanni asetatud silikaattellised ja keraamilised tellised koos peale kantud krohvidega: vasakul Saviukumaja lubikrohv, keskel Saviukumaja savikrohv ja paremal RestHunt termokrohv

Peale 6 nädala möödumist 20.11.2023, võeti tellised vannist välja ja nende pealt eemaldati krohvikihit. Selleks, et uurida, kui efektiivselt krohvid 1,5 kuu jooksul tellistest soolasid eemaldasid, oli vaja uuesti määrata telliste soolasisaldus. Selleks puuriti tellistesse sama meetodika järgi nagu eelnevas katse kirjelduses 20.11.2023 Hilti (TE

4-A22) lööktrelliga auk ja koguti puurimisel saadud vähemalt 10 g tellisepuru kilekottidesse. Kusjuures tellisepuru võeti tellise pealmisest osast, eelnevalt paiknenud krohvikihhi lähedalt. Igast tellisest koguti puru eraldi kilekotti. Seejärel uhmerdati kilekottides olev puru väiksemateks osadeks, et selles ei sisalduks suuremaid tükke. Saadud purust kaaluti välja 5 g, mis valati koos 100 ml destilleeritud veega katsepurki, kus saadud lahust segati ja võeti 50 ml proov. Antud proov võeti iga tellise kohta ehk kokku tuli 6 proovi, mis saadeti TalTechi Keskkonnatehnoloogia teaduslaborisse Priit Tikkerile. Seal määrati kindlaks telliste uus soolade (nitraatide, sulfaatide ja kloriidide) kontsentratsioon. Kui krohvid mõjusid ja eemaldasid tellistest soolaid, siis peaks laboritulemused näitama väiksemat soolade kontsentratsiooni.

3.6.2 Tulemused ja järeldus

Tabelist 3.7 on näha kloriidide vähenemine erinevate ohverkrohvide mõjul 1,5 kuu jooksul katses kasutatud keraamilistest ja silikaattelistest. Kõige parema tulemuse andis RestHunt termokrohv, mis eemaldas keraamilisest tellisest 50,7% kloriide ja silikaattellisest 22,9% kloriide. Sellele järgnes Saviukumaja savikrohv ning kõige halvemini eemaldas mõlemast tellisest kloriide Saviukumaja lubikrohv. Ka varasemas K. Kuslapi magistritöös ilmes, et termokrohv sidus endasse kõige rohkem soolade anioone ehk müüritisest liikusid soolad kõige efektiivsemalt termokrohvi [37]. Kuigi mõlemad tellisetüübid imasid enda sisse peaaegu samas koguses kloriide, siis ohverkrohvid vähendasid silikaattelistest anioone palju vähem kui keraamilistest tellistest. Tulemusi võis mõjutada asjaolu, et silikaattellis oli ruumalalt suurem kui keraamiline tellis ning seetõttu on soolade liikumise vahemaa ohverkrohvi pikem.

Tabel 3.7 Keraamiliste telliste ja silikaattelliste ionkromatograafilise analüüsi tulemused kloriidide sisaldusest enne krohvimist ja peale krohvimist

Tellise nimetus	Krohv	Cl sisaldus enne krohvi, mg/l	Cl sisaldus peale krohvi, mg/l	Cl mahuline vähenemine, mg/l	Cl protsentuaalne vähenemine
Keraamiline tellis 1	Savikrohv	172,30	91,70	-80,60	-46,78
Keraamiline tellis 2	Lubikrohv	155,40	107,30	-48,10	-30,95
Keraamiline tellis 3	Termokrohv	164,60	81,10	-83,50	-50,73
Silikaattellis 1	Savikrohv	153,50	131,70	-21,80	-14,20
Silikaattellis 2	Lubikrohv	174,50	155,10	-19,40	-11,12
Silikaattellis 3	Termokrohv	168,90	130,20	-38,70	-22,91

Nitraatide sisaldust tellistes on võrreldud tabelis 3.8. Laboratoorsete katsete tulemustest on näha, et kloriidid ja nitraadid on käitunud tellistes sarnaselt ning ka ohverkrohvide mõjul vähenenud enam-vähem samamoodi. Kõige rohkem nitraate on keraamilistest tellistest vähendanud termokrohv ehk 52,6%. Sellele järgneb savikrohv ja lubikrohv. Silikaatidest on kõige paremini eemaldanud nitraate termokrohv, kus protsentuaalne vähenemine on olnud 22,0%. Sellele järgnevad üsna võrdselt lubikrohv 18,3% ja savikrohv 17,2%. Ka siin on näha sarnast anioonide käitumist nagu eelnevalt kloriidide puhul kirjeldatud. Ehk silikaattellised ja keraamilised tellised on imanud algusfaasis enda sisse üsna võrdses koguses nitraate, kuid ohverkrohvid on eemaldanud silikaatidest palju väiksemas koguses anioone kui teistest. Võib oletada, et selline tulemus on tekkinud, sest silikaattellised on mõõtmetelt suuremad ning nendest on seetõttu aeganõudvam soolasid eemaldada.

Tabel 3.8 Keraamiliste telliste ja silikaattelliste ionkromatograafilise analüüsi tulemused nitraatide sisaldusest enne krohvimist ja peale krohvimist

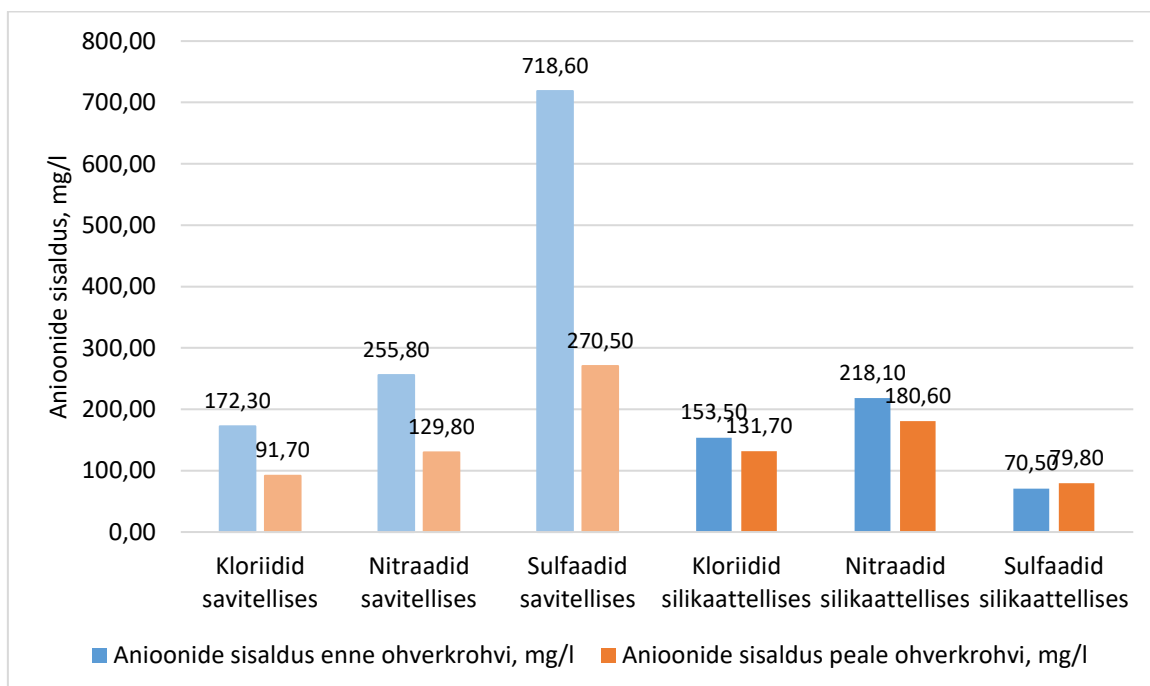
Tellise nimetus	Krohv	NO₃ sisaldus enne krohvi, mg/l	NO₃ sisaldus peale krohvi, mg/l	NO₃ mahuline vähenemine, mg/l	NO₃ protsentuaalne vähenemine
Keraamiline tellis 1	Savikrohv	255,80	129,80	-126,00	-49,26
Keraamiline tellis 2	Lubikrohv	221,90	139,20	-82,70	-37,27
Keraamiline tellis 3	Termokrohv	245,00	116,00	-129,00	-52,65
Silikaattellis 1	Savikrohv	218,10	180,60	-37,50	-17,19
Silikaattellis 2	Lubikrohv	249,40	203,80	-45,60	-18,28
Silikaattellis 3	Termokrohv	240,90	187,90	-53,00	-22,00

Tabelis 3.9 on antud sulfaatide sisaldused tellistes enne ja peale ohverkrohve, kust on näha, et esialgu on keraamilised tellised imanud enda sisse kordades rohkem sulfaate kui silikaattellised. Peale ohverkrohvide eemaldamist on sulfaate vähenenud efektiivselt keraamilistes tellistes ning kõige parema tulemuse on andunud kaks krohvi - savikrohv 62,4% anioonide vähenemist ja lubikrohv 62,3%. Silikaattelliste sulfaatide sisaldused on peale savikrohvi ja lubikrohvi eemaldamist suuremad kui esialgselt. Ainult termokrohv on sulfaate vähendanud 4,6%. Sellise tulemuse silikaattellistes võis põhjustada asjaolu, et ohverkrohvid jõudsid sulfaate eemaldada tellise pindmisest kihist ning alumises kihis asunud sulfaadid jõudsid ohverkrohvi mõjul liikuda tellise ülemise pinnakihi lähedale. Seetõttu näitavad tulemused nagu savi- ja lubikrohv oleksid lisanud sulfaate tellisesse juurde, kuigi tegelikult toimus silikaattellises aeglane anioonide liikumine.

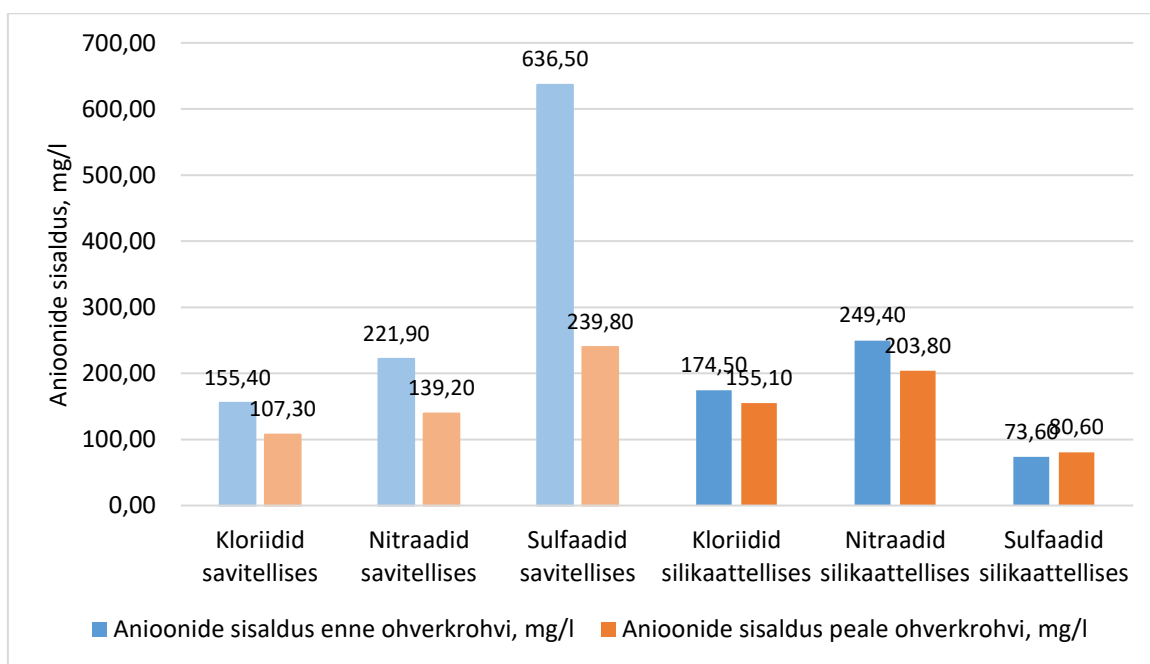
Tabel 3.9 Keraamiliste telliste ja silikaattelliste ionkromatograafilise analüüsi tulemused sulfaatide sisaldusest enne krohvimist ja peale krohvimist

Tellise nimetus	Krohv	SO₄ sisaldus enne krohvi, mg/l	SO₄ sisaldus peale krohvi, mg/l	SO₄ mahuline vähenemine, mg/l	Na₂SO₄ protsentuaalne vähenemine
Keraamiline tellis 1	Savikrohv	718,60	270,50	-448,10	-62,36
Keraamiline tellis 2	Lubikrohv	636,50	239,80	-396,70	-62,33
Keraamiline tellis 3	Termokrohv	595,60	298,70	-296,90	-49,85
Silikaattellis 1	Savikrohv	70,50	79,80	9,30	13,19
Silikaattellis 2	Lubikrohv	73,60	80,60	7,00	9,51
Silikaattellis 3	Termokrohv	68,10	65,00	-3,10	-4,55

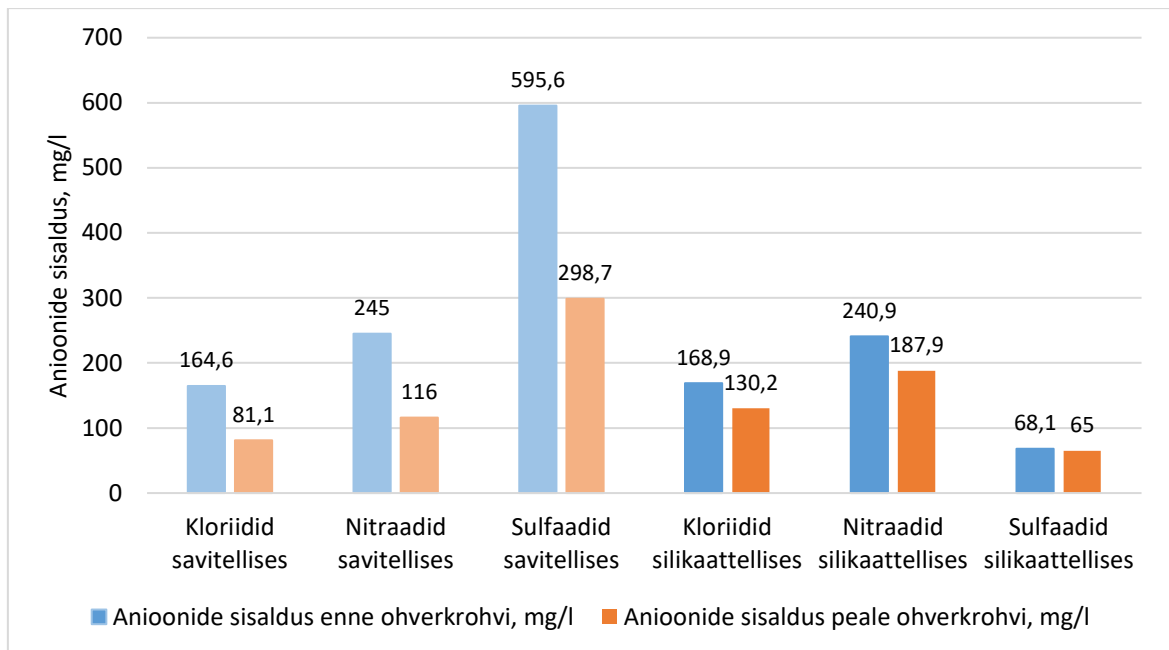
Võib oletada, et naatriumsulfaadi kogus oli silikaattellises väiksem, sest selle soola molaarmass on palju suurem (142 g/mol) kui naatriumkloriidil (58,5 g/mol) ja ammooniumnitraadil (80 g/mol). Mida suurem on soola molaarmass, seda aeglasemalt see liigub ja seetõttu on seda raskem ja aeganõudvam ohverkrohviga müüritisest eemaldada. Suuremate molaarmassidega soolad nagu naatriumsulfaat, on kõige parem eemaldada ohverkrohvidega, kus on väike poorsus, aga suur hulk suuremaid poore kui $>1 \mu\text{m}$ [12].



Joonis 3.14 Savikrohvi mõju anioonide eemaldamisel keraamilistest tellistest ja silikaattellistest



Joonis 3.15 Lubikrohvi mõju anioonide eemaldamisel keraamilistest tellistest ja silikaattellistest



Joonis 3.16 Termokrohvi mõju anioonide eemaldamisel keraamilistest tellistest ja silikaattellistest

Võib järeldada, et kuna keraamilistel tellisel on suurem poorsus ja kiirem veeimavus, siis seetõttu on need tellised saanud imada enda pooridesse rohkem soolaid kui silikaattellis. Silikaattellis on veeimavus aeglasem ning sellest tulenevalt imab see aeglasemalt soolamolekule ja niiskust. Ka eelnevalt läbi viidud telliskivide veega immutamise katsetes ja kapillaartõusu mõõtmisel oli näha, kui kiiresti imab keraamiline tellis vett ning kuivõrd aeglane on silikaatkivi imavus. Telliste imavust võib mõjutada ka asjaolu, et silikaattellistel on rohkem suletud poore ja vesi ning soolad ei saa niivõrd kiiresti liikuda. Veeimavus toimub materjalis, kus on avatud kapillaarpoorid. Selleks, et teha täpsemaid järeldusi, tuleks uurida katsetes kasutatud telliste poorsust ning pooride omavahelisi ühendusi. Samuti peaks uurima ohverkrohvide poorsust, sest pooride suurusest sõltub, milliseid soolamolekule need imavad.

KOKKUVÕTE

Magistritöös läbi viidud laboratoorsed uuringud näitasid, et vesi ja koos sellega liikuvad soolad imendusid paremini keraamilistesse tellistesse kui silikaattellistesse. Seetõttu on keraamilised tellised vastuvõtlikumad niiskusele ja sooladele ning see mõjutab nende vastupidavust ilmastikutingimustele. Silikaattellistega läbi viidud katsetest selgus, et nende veeimavus oli väiksem võrreldes keraamiliste tellistega ning seetõttu oli ka nende kapillaartõus ja soolade sisaldus madalam. Selline omadus on olulise tähtsusega ehitusmaterjalide valikul ning tagab pikema kasutusea, kui materjal talub paremini võimalikke koormusi ja ilmastikust tulenevaid mõjutegureid.

Laboratoorsed uuringud näitasid piiratud katsekehade põhjal, et kahte eri tüüpi tellised mahutavad soolasid erineval määral. Tulemustest selgus, et keraamilised tellised võivad imada kapillaarpooridesse kordades rohkem sulfaate kui silikaattellised, ning millel võib olla kahjulik mõju konstruktsiooni pikaajalisele stabiilsusele. Kloriidide ja nitraatide imendumine keraamilistesse tellistesse ja silikaattellistesse oli sarnane ning suuremaid erinevusi ei täheldatud. Sama ei saa öelda ohverkrohvidega soolade eemaldamisel tellistest, kus 6 nädalaga vähenesid kloriidid, nitraadid ja sulfaadid keraamilistest tellistest keskmiselt 49%. Silikaattellistes oli tulemus oluliselt kehvem ning keskmiselt vähenes anioonide sisaldus tellistes 10%.

Võime teha oletusi kirjandusliku analüüsi põhjal, et silikaattellistes oli soolade ja vee liikumine aeglasem, sest selle poorsus on väiksem ning selle pooride struktuur on rohkem suletud kui keraamilisel tellisel, kuid täpsemate järelduste tegemiseks oleks vaja uurida mõlema tellise pooride omadusi. Samuti ei saa väita, et üks või teine tellise tüüp oleks parem, kuna müüritise tugevuse moodustavad tellised koos mörtidega, kuid antud uuringutes mörtide veeimavust ja vastupanu sooladele ei uuritud.

Ohverkrohvide kasutamine tellistel vähendab nendes sisalduvaid soolasid, tänu sellele säilib planeeritav konstruktsiooni eluiga. Uuringutes selgus, et ohverkrohvidest toimis soolade eemaldamisel üldiselt kõige paremini RestHunt termokrohv, mis eemaldas protsentuaalselt kokku kõige rohkem kloriide, sulfaate ja nitraate mõlemast erinevast tellise tüübist. Saviukumaja savikrohv ja lubikrohvi võrdluses toimis keraamilistest tellistest soolade eemaldamisel paremini savikrohv. Silikaattellistest soolade eemaldamisel oli kõige efektiivsem termokrohv, sellele järgnesid peaaegu võrdselt savi- ja lubikrohv.

Antud uurimus annab panuse teadmistesse vee ja soolade mahutatavusest, kapillaartõusust ja veeimavusest keraamilistes tellistes ja silikaattellistes. Samuti annab tehtud analüüs teadmisi juurde tellistest erinevate soolade eemaldamisel savi-, lubi- ja termokrohviga. Sellest tulenevad teadmised võivad olla olulised ehitusinseneridele ja

restaureerijatele, kes tegelevad ajalooliste hoonete säilitamise ja renoveerimisega. Uuringute tulemused aitavad paremini mõista, kuidas valida ja hooldada telliseid vastavalt keskkonnatingimustele.

Magistritöös läbiviidud katsete puuduseks võib tuua, et ohverkrohvidega soolade eemaldamise katse ei anna lõpliku arusaama, kui efektiivselt on võimalik keraamilistest ja silikaattelistest soolasid eemaldada. Tekib küsimus, kui palju soolasid võis tellistest lahustuda puhtasse kraanivette. Seda probleemi saaks lahendada, kui võtta soolasisalduse proovid ohverkrohvidest ning neid omavahel võrrelda, millised krohvid sisaldavad kõige rohkem soolade anioone. Antud töö tulemuste põhjal saab võrrelda ainult seda, milline oli soolade anioonide sisaldus erinevates tellistes peale 6 nädalast ohverkrohvide mõjumist.

Magistritöös uuriti vee ja soolade liikumist ainult kahte eri tüüpi tellistes, kuid parema ülevaate saamiseks oleks vaja sarnaseid katseid korrata ka laboratoorselt müüritise väiksemate osade ja agressiivse soolalahusega. Samuti võiks uuringuid läbi viia rohkemate tellistega, et saadud tulemusi ja järeldusi kinnitada. Praeguste uuringute põhjal ei saa teha lõplike järeldusi, kuidas toimib müüritisel vee ja soolade liikumine ning kuidas erinevad mürdid, tellised ja seinapaksused soolakahjustustega müüritisel käituvad ning kui palju see kasutusiga mõjub. Lisaks tuleks uurida, kuidas hüdroisolatsiooni kasutamine vähendab või väldib soolade sissetungi maapinna kaudu vundamenti ja sealt edasi teistesse hoone konstruktsioonidesse.

SUMMARY

The laboratory experiments conducted in the master's thesis revealed that water and the salts carried by it were absorbed more efficiently into ceramic bricks than into silicate bricks. Therefore, ceramic bricks are more susceptible to moisture and salts, affecting their durability in different weather conditions. Tests conducted with silicate bricks showed that their water absorption was lower, resulting in lower capillary rise and salt content. This characteristic is crucial in selecting construction materials, ensuring a longer lifespan when the material better withstands potential loads and weather-related factors.

Laboratory studies indicated, based on limited test specimens, that two different types of bricks accommodate salts to varying extents. Results showed that ceramic bricks may absorb multiple times more sulfates into capillary pores than silicate bricks, potentially causing harmful effects on the long-term stability of the construction. The absorption of chlorides and nitrates into both ceramic and silicate bricks was similar, with no significant differences observed. However, the same cannot be said for the removal of salts using sacrificial renders, where, within 6 weeks, chlorides, nitrates, and sulfates decreased by an average of 49% in ceramic bricks. Silicate bricks exhibited significantly poorer results, with an average reduction of anions in the bricks by 10%.

Based on analysis, assumptions can be made that the slower movement of salts and water in silicate bricks may be attributed to their smaller porosity and more closed pore structure compared to ceramic bricks. However, more precise conclusions would require an examination of the pore properties of both types of bricks. It cannot be asserted that one type of brick is superior since the strength of the masonry is determined by the bricks together with the mortars; however, the water absorption and salt resistance of mortars were not investigated in these studies.

The use of sacrificial renders on bricks reduces the salt content, thereby increasing the lifespan of the construction. The studies revealed that, generally, RestHunt thermal render performed the best in removing salts, procentually removing the highest amount of chlorides, sulfates, and nitrates from both types of bricks. In comparison between Saviukumaja clay render and lime render, for ceramic bricks, clay render performed better than lime render. For silicate bricks, thermal render was the most effective in salt removal, followed closely by clay and lime renders.

This study contributes to the knowledge of water and salt retention, capillary rise, and water absorption in ceramic bricks and silicate bricks. The analysis also provides additional knowledge on the removal of salts using clay, lime, and thermal renders. These insights may be crucial for construction engineers and restorers involved in the

preservation and renovation of historical buildings, helping them make informed decisions on selecting and maintaining construction materials according to environmental conditions.

A limitation of the experiments conducted in the master's thesis is that the test of removing salts with sacrificial renders does not provide a definitive understanding of how effectively salts can be removed from ceramic and silicate bricks. The question arises about how many salts may have dissolved from the bricks into pure tap water. This issue could be addressed by taking salt content samples from sacrificial renders and comparing them to determine which renders contain the highest concentration of salt anions. Based on the results of this work, only a comparison of the anion content of salts in different bricks after 6 weeks of sacrificial render action can be made.

The master's thesis investigated the movement of water and salts only in bricks. However, for a better overview, similar experiments would need to be repeated with smaller parts of masonry in the laboratory using aggressive salt solutions. Based on the current studies, final conclusions cannot be drawn regarding how water and salt movement operates in masonry and how different mortars, bricks, and wall thicknesses in masonry behave with salt damage, and to what extent this affects their lifespan. Additionally, it should be investigated how the use of hydroisolation reduces or prevents the infiltration of salts from the ground into the foundation and, consequently, into other building structures.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] *EVS-EN 1990:2002+NA:2002 Eurokoodeks. Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused.* [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1990-2002-na-2002-consolidated>. Kasutatud 08.01.2024.
- [2] B. Lubelli, R.P.J. van Hees and C.J.W.P. Groot. „Sodium chloride crystallization in a “salt transporting” restoration plaster,” *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1467-1474, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.027>. Kasutatud 08.01.2024.
- [3] S. H. Perry and A. Duffy, „The Short-Term Effects of Mortars on Salt Movement in Stone”, *Atmospheric Environment*, vol. 31, no. 9, pp. 1297-1305, 1997. doi: [10.1016/S1352-2310\(96\)00290-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00290-7). Kasutatud 08.01.2024.
- [4] J. Svare, I. Vitina, L. Krage and R. Lusiš, „Working efficiency of „sacrificial” plasters – practical experience in Latvia”, *Material Science and Applied Chemistry*, pp. 68-74, 2008. Loetud aadressil: <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/4414/fulltext>. Kasutatud 08.01.2024.
- [5] K. Balksten and P. S. Buriijn, „Understanding Deterioration due to Salt and Ice Crystallization in Scandinavian Massive Brick Masonry”, *Heritage*, vol. 4, no 1, pp. 349-370. doi: [10.3390/heritage4010022](https://doi.org/10.3390/heritage4010022). Kasutatud 08.01.2024.
- [6] E. Franzoni, C. Gentilini, G. Graziani and S. Bandini, „Towards the assessment of the shear behaviour of masonry in on-site conditions: A study on dry and salt/water conditioned brick masonry triplets”, *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 405-416, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.002>. Kasutatud 08.01.2024.
- [7] D. Young, *Salt attack and rising damp A guide to salt damp in historic and older buildings.* Australia: Heritage Council, 2008. Loetud aadressil: <https://www.environment.nsw.gov.au/-/media/OEH/Corporate-Site/Documents/Heritage/salt-attack-and-rising-damp-guide.pdf>. Kasutatud 08.01.2024.
- [8] K. Õiger, *Ehitiste renoveerimine.* Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015.
- [9] V. Voltri, „Kivikonstruktsioonid,” *in* Ehituskonstruktori käsiraamat. Eesti: Ehitame kirjastus, 2014, pp. 363–409.

- [10] EVS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012+NA:2013 Eurokoodeks 6: Kivikonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid sarrustatud ja sarrustamata kivikonstruktsioonide projekteerimiseks. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1996-1-1-2005-a1-2012-na-2013-consolidated>. Kasutatud 08.01.2024.
- [11] EVS-EN 771-1:2011+A1:2015 Müürikivide spetsifikatsioon. Osa 1: Keraamilised müürikivid. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-771-1-2011-a1-2015-consolidated>. Kasutatud 08.01.2024.
- [12] L.M. Raado, *Ehitusmaterjalid*. Tallinn: Sihtasutus Professor Karl Õigeri Stipendiumifond, 2018.
- [13] M. Mändel. *Tellismüürid. Ajalugu ja restureerimine*. 2018. <https://www.muinsuskaitseamet.ee/et/handbook/tellismuurid-ajalugu-ja-restaureerimine>. Kasutatud 08.01.2024.
- [14] EVS-EN 771-2:2011+A1:2015 Müürikivide spetsifikatsioon. Osa 2: Silikaatmüürikivid. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-771-2-2011-a1-2015-consolidated>. Kasutatud 08.01.2024.
- [15] AS Silikaat. *Silikaattellised*. <https://silikaat.ee/static/Silikaattellised.pdf>. Kasutatud 08.01.2024.
- [16] AS Silikaat. *Ettevõttest*. <https://silikaat.ee/ettevotest/>. Kasutatud 08.01.2024.
- [17] M. Mändel. *Silikaattellisest võib saada tõeline kultuuriväärtus*. <https://novaator.err.ee/1022705/silikaattellisest-voib-saada-toeline-kultuurivaartus>. Kasutatud 08.01.2024.
- [18] Äripäeva eriprojektide ja sisuturunduse üksus. *Silikaattellise kui korstnapitsi kivi ajalugu ja tänapäev*. <https://www.ehitusuudised.ee/sisuturundus/2019/09/02/silikaattellise-kui-korstnapitsi-kivi-ajalugu-ja-tanapaev?channels=ehitus>. Kasutatud 08.01.2024
- [19] Emerisda. *Summary report on existing techniques, procedures and criteria for assessment of effectiveness of interventions*. https://www.emerisda.eu/wp-content/uploads/2014/07/D-2_3.pdf. Kasutatud 08.01.2024.
- [20] G. W. Scherer, „Stress from crystallization of salt“, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1613-1624, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.034>. Kasutatud 08.01.2024

- [21] Piirfeld, „Soklite saneerimine“, *Keskkonnatehnika*, nr. 1, lk. 37 – 40, 2005.
- [22] J. Ahl, “Salt diffusion in brick structures”, *Journal of Materials Science*, vol. 38, pp. 2055-2061, 2003. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1023558026018>. Kasutatud 08.01.2024.
- [23] D. Ferretti and Z. P. Bažant, “Stability of ancient masonry towers: Moisture diffusion, carbonation and size effect”, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1379-1388, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.013>. Kasutatud 08.01.2024.
- [24] E. Arafat, A. Alam, S. Islam and S. Das. *Effect of salinity on brick clay & its reduction by leaching process*. http://iccesd.com/proc_2016/Papers/ICCESD-2016-575.pdf. Kasutatud 08.01.2024.
- [25] T. Kalamees, T. A. Kõiv, R. Liias, K. Õiger, U. Kallavus, L. Mikli jt, *Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga: uuringu lõpparuanne*. Tallinn: 2010.
- [26] L. M. Ottosen, A. J. Pedersen and I. Rörig-Dalgaard, „Salt-related problems in brick masonry and electrokinetic removal of salts”, *Journal of Building Appraisal*, vol. 3, no. 3, pp. 181-194, 2007, doi: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jba.2950074>. Kasutatud 08.01.2024.
- [27] W. M. Ibrahim, A. Bakar, M. A. Johari, M. Ramadhansyah & M. Fadzil. *Elasticity and Moisture Movement of Calcium Silicate Brick under Sulphate Environment*. 2012. <https://www.semanticscholar.org/paper/Elasticity-and-Moisture-Movement-of-Calcium-Brick-Ibrahim-Bakar/0775eb8b3bb9506a251322ab2e5adb98332a32e2>. Kasutatud 08.01.2024.
- [28] J. P. Ramadhansyah. Elasticity of calcium silicate brick masonry wall due to sulphate attack. 2010. https://www.researchgate.net/publication/259579024_Elasticity_of_calcium_silicate_brick_masonry_wall_due_to_sulphate_attack. Kasutatud 08.01.2024.
- [29] J. M. P. Q. Delgado, A. S. Guimarães, V. P. de Freitas, I. Antepara, V. Kočí, R. Černý, "Salt Damage and Rising Damp Treatment in Building Structures", *Materials Science and Engineering*, vol. 2016, 2016, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/1280894>. Kasutatud 08.01.2024.

- [30] N. Husillos-Rodríguez, P. M. Carmona-Quiroga, S. Martínez-Ramírez, M. T. Blanco-Varela, R. Fort, „Sacrificial mortars for surface desalination”, *Construction and Building Materials*, vol. 173, pp. 452-460, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.029>. Kasutatud 08.01.2024.
- [31] J. Sētiņa, L. Krāģe, J. Svare and S. Kirilova, „Simulation of Desalination Processes Using Lime Based Mortars”, *Chemine Tehnologija*, no. 1, pp. 30-36, 2009. Loetud aadressil: http://alephfiles.rtu.lv/TUA01/000024349_e.pdf. Kasutatud 08.01.2024.
- [32] K. Tooming. *Lubi II. Traditsiooniline lubikrohv ja -värv*. <https://www.muinsuskaitseamet.ee/et/lubi-ii-traditsiooniline-lubikrohv-ja-varv-0> Kasutatud. 08.01.2024.
- [33] M. Loit. *Savikrohv. Hea ja ilus viimistlusmaterjal*. <https://www.muinsuskaitseamet.ee/et/savikrohv-hea-ja-ilus-viimistlusmaterjal-0>. Kasutatud 08.01.2024
- [34] RestHunt Ekspert OÜ. *Termokrohv K*. <https://resthunt.ee/tooted/segud/termokrohv-k/>. Kasutatud 08.01.2024.
- [35] Krohwin OÜ. *Termokrohv hoiab maja soojas ega kahjusta maja tervist*. <https://www.krohwin.ee/blogi/termokrohv-hoiab-maja-soojas-ega-kahjusta-maja-tervist>. Kasutatud 08.01.2024.
- [36] E. Franzoni and S. Bandini, “Spontaneous electrical effects in masonry affected by capillary water rise: The role of salts”, *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 642-646, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.098>. Kasutatud 08.01.2024.
- [37] H. Sirelpuu, “Looduskivist ja põletatud savitellistest kombineeritud müüritiste desalineerimine”, [Magistritöö], Metsandus- ja maaehitus instituut, EMÜ, Tartu, 2020. [Online]. Loetud aadressil: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/6050>. Kasutatud 08.01.2024.
- [38] K. Kuslap, “Kivimüüritise soolade kontsentratsiooni vähendamine ohverkrohvide abil Patarei merekindluse näitel”, [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tartu Kolledž, Eesti, 2022. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/1b39b83b-1287-463b-9053-81766f765719>. Kasutatud 08.01.2024.

- [39] *EVS-EN 772-1:2011+A1:2015 Müürikivide katsemeetodid. Osa 1: Survetugevuse määramine.* [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-772-1-2011-a1-2015-consolidated>. Kasutatud 08.01.2024.
- [40] *EVS-EN 772-6:2005 Müürikivide katsemeetodid. Osa 6: Betoonmüürikivide paindetõmbetugevuse määramine.* [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-772-6-2005>. Kasutatud 08.01.2024.
- [41] Wienerberger AG. *Punane Sile keraamiline tellis.* <https://www.wienerberger.ee/tooted/terca-keraamilised-tellised/tootekataloog-tellised/punane-sile-keraamiline-tellis.html>. Kasutatud 08.01.2024.