



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TIINA PALVIAINEN
MAANVASTAISTEN RAKENTEIDEN KOSTEUDEN HALLINTA SISÄPUOLI-
SILLA KORJAUSMENETELMILLÄ
Diplomityö

Tarkastajat:
professori Matti Pentti
DI Pekka Laamanen
Tarkastajat ja aihe hyväksytyt
Rakennustekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 4. maaliskuuta
2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

PALVIAINEN, TIINA: Maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinta sisäpuolisilla korjausmenetelmillä

Diplomityö, 122 sivua, 1 liitesivu

Kesäkuu 2010

Pääaine: Rakennustuotanto

Tarkastajat: professori Matti Pentti, Tampereen teknillinen yliopisto

DI Pekka Laamanen, Vahanen Oy

Avainsanat: maanvastaaiset rakenteet, perusmuurit, kellarin seinät, kosteusvauriot, kosteuden hallinta, rakenteiden korjausmenetelmät, suolavauriot, massiivitiilirakenteet, kapillaarinen kosteus, injektointi, rappauskorjaukset

Maanvastaisiin rakenteisiin kerääntyvä kosteus on yksi yleisimmistä kosteusvaurioiden syistä. Maanvastaisten rakenteiden korjauksissa on otettava jo suunnitteluvaiheessa huomioon, miten korjattava rakenne kosteusteknisesti toimii. Ilmaston muutoksen myötä on todennäköistä, että sademäärät lisääntyvät sekä pohjavedenpinta kohoaa, mikä lisää maanvastaisten rakenteiden kosteusrasituksia. Kohonnut rasitus lisää maanvastaisissa rakenteissa ilmeneviä kosteusongelmia.

Keski-Euroopassa on ollut käytössä jo useita vuosikymmeniä erilaisia kosteus- ja suolarasitettujen maanvastaisten rakenteiden sisäpuolisia korjausmenetelmiä. Tutkimuksen tavoitteena on ollut laajentaa tietoisuutta maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinnasta sekä erilaisista sisäpuolisista korjausmenetelmistä. Suomessa ei ole aikaisemmin ollut riittävän kattavaa tietoa maanvastaisten rakenteiden sisäpuolisista korjausmahdollisuuksista.

Aikaisempiin suomalaisiin tutkimuksiin verrattuna tässä työssä on käsitelty erikoislaastikorjauksia, joihin kuuluvat suolankeräyslaastirappaukset sekä vedentiivistyslaastikorjaukset. Kapillaarikatkojen injektointikorjauksia on käsitelty aiempaa tarkemmin ja tuotu uutta tietoa injektointikorjausten viime vuosikymmenien kehityksestä. Nämä korjausmenetelmät ovat hyvin toimivia ja soveltuvat käytettäväksi myös Suomessa.

Keski-Euroopassa on kehitetty vastoittain kalsiumsilikaattimateriaali, jota voidaan käyttää maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinnassa sekä kiviaineisten rakenteiden sisäpuolisena lämmöneristeenä myös ylemmissä kerroksissa. Levyn hyviin ominaisuuksiin kuuluu homehtumattomuus, joka mahdollistaa levyn käyttämisen turvallisesti rakenteen sisäpuolella, missä tavanomaiset lämmöneristeet voivat altistua mikrobikasvulle. Levytys soveltuu todella hyvin käytettäväksi myös suomalaisissa lämmöneristystä edellyttävissä rakenteissa.

Muita työssä käsiteltyjä uudempia korjausmenetelmiä ovat rakenteiden sisäpuolinen lämmittäminen sekä sähkö-osmoosiin perustuva EOP-menetelmä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

PALVIAINEN, TIINA: Moisture control of ground structures with inside repairs

Master of Science Thesis, 122 pages, 1 Appendix page

June 2010

Major: Construction Management

Examiners: Professor Matti Pentti, Tampere University of Technology

DI Pekka Laamanen, Vahanen Oy

Keywords: ground structures, cellar walls, humidity problems, moisture control, structure repair methods, salt problems, massive brick structures, capillary moisture, injection, render repairs

One of the most common reasons for moisture problems is the moist that gathers in to the ground structures. It is necessary to take account the moisture behavior of ground structures already in the planning phase of the building renovation. Due to the climate change, it is very likely that the rain fall increase and the ground water level rises. That means that the amount of moisture load, and there for the moisture damages of the ground structures, is going to increase.

In the Central Europe there are long traditions of repairing moist and salt loaded ground structures with inside repairs. The goal of this study is to enhance the knowledge of the moisture control and the inside renovation methods in Finland. There has not been enough information about the different kinds of possibilities of inside repairs.

In this study there is some new information about inside plaster and mortar repairs that has not been dealt in Finnish studies before. The capillary brake injection methods are handled with more accurate information than in earlier studies. These renovation methods are evidently working very well and they can be used also in Finnish buildings.

In the resent years it has been developed an inside insulation material for the stone walls in the Central Europe. The new calcium-silicate plates can also be used in controlling the moisture load of the cellar walls. The plates don't allow any mould growing on the surface, so they can be used as an inside insulation. The calcium-silicate insulation is a very good material for Finnish structures that need thermal insulation due to the cold climate.

Other new methods that are dealt in this study are tempering, that means warming structures, and an electro-osmosis based method called EOP.

ALKUSANAT

Oppiminen on elämänpitäinen prosessi ja johtaa suuremman tiedon saavuttamiseen. Tämän diplomityön valmistuminen on ollut 5 vuoden mittainen tiedonkeräysprosessi, joka on ollut pitkiä aikoja kirjoittamistauolla. Noiden lepotaukojen aikana kokemukset maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmista ja niiden korjausmenetelmistä ovat kertyneet, mikä on antanut paljon tarpeellista syventävää tietoa diplomityön tekemiseen. Alkuvaiheen tiukka syventyminen kirjallisuuteen vaihtui työn edetessä käytäntöön ja oikeiden korjauskohteiden tutkimiseen sekä korjausten suunnitteluun.

Lämpimät kiitokset tuesta diplomityön tekemisessä Vahanen Oy:n asiantuntijoille. Kiitokset myös useille yhteyshenkilöille, joiden avulla sain arvokasta tietoa tutkimus- ja korjauskohteista. Eri korjausmenetelmissä tarvittavien materiaalien maahantuojien yhteyshenkilöiden kanssa käydyt keskustelut olivat osaltaan edesauttamassa arvokkaan lisätiedon saamisessa. Erityiskiitokset diplomityön ohjaajille, jotka etenkin työn viimeistelyvaiheessa antoivat arvokasta palautetta ja ohjausta sisällön viimeistelyyn.

Perheen pitkä odotus on viimein palkittu – ei minusta tullutkaan ikiteekkaria, vaan ihka oikea DI ja kunnon pidot voi alkaa. Taustatuki on ollut tärkeää menneinä opiskeluun ja diplomityöntekoon kuluneina vuosina. Jospa seuraava oppimistavoite olisi tässä, toisenlaisessa perinteen säilyttämisessä: Passibo ylen paljo kaigel väel ku työ minnuu pystys piitti da jaksoitta vuotta.

Helsingissä

31.5.2010



Tiina Palviainen

SISÄLLYS

1.	Johdanto	1
2.	Tutkimusmenetelmät ja työssä käytetty aineisto.....	3
2.1	Johdanto.....	3
2.2	Lähtökohtia.....	3
2.3	Aikaisemmat tutkimukset ja kirjallinen aineisto	4
2.4	Aikaisempien tutkimusten antia.....	5
3.	Maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinnan lähtökohdat	7
3.1	Johdanto.....	7
3.2	Vanhat perusmuurirakenteet eri aikakausina.....	7
3.2.1	Yleistä	7
3.2.2	Kellarin lattia- ja seinärakenteet 1880-1940	7
3.2.3	Kellarin lattia- ja seinärakenteet 1940-1960	10
3.2.4	Kellarin lattia- ja seinärakenteet 1960-1975	12
3.2.5	Kellarin lattia- ja seinärakenteet 1975-	13
3.3	Maanvastaisten rakenteiden kosteus	13
3.3.1	Materiaalien huokoisuuden merkitys kosteuden siirtymisessä.....	13
3.3.2	Maanvastaisten rakenteiden kosteustekninen toiminta	14
3.3.3	Kosteuden siirtymistapojen vaikutus maanvastaisiin rakenteisiin	16
3.4	Suolat kosteusvaurioiden ilmentäjänä.....	23
3.4.1	Yleistä	23
3.4.2	Rakenteissa esiintyvät suolat.....	24
3.4.3	Suolojen kulkeutuminen rakenteessa.....	27
3.4.4	Kosteusvaurioiden synty	30
	Kosteuden vaikutukset rakenteissa.....	30
	Suolojen kiteytymisen vaurioprosessit	32
	Betonirakenteiden vaurioituminen	35
3.5	Tyypillisiä kosteuden ja suolojen aiheuttamia vaurioita.....	36
3.6	Perinteiset korjausmenetelmät	44
4.	Kirjallisuusselvitys: maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinta sisäpuolisilla korjausmenetelmillä	46
4.1	Johdanto.....	46
4.2	Sisäpuoliset korjausmenetelmät	46
4.2.1	Korjausmenetelmien jaottelu.....	46
4.2.2	Pystysuuntaiset korjausmenetelmät.....	47
4.2.3	Vaakasuuntaiset korjausmenetelmät.....	48
4.3	Erikoislaastikorjaukset.....	49
4.3.1	Laastikorjausten pääryhmät.....	49
4.3.2	Uhrautuvien laastien jaottelu.....	50
4.3.3	Suolankeräyslaastit.....	53
	Suolankeräyslaastien historia ja kehitys	54
	Suolankeräyslaastien koostumus ja toiminta	55
	Suolankeräyslaastien yhteydessä käytettävä käsitteistö ja WTA-laastien laatuvaatimukset.....	57
	Suolankeräyslaastien käyttäminen rakenteiden korjauksissa	59
	Suolankeräyslaastien käyttämisessä tehtyjä virheitä.....	61
4.3.4	Hauteet, uhrautuvat haudelaastit ja muut suolanpoistomenetelmät.....	63
	Hauteet	63

	Haudelaastit.....	63
	Muut suolanpoistomenetelmät.....	64
4.3.5	Vedentiiivistyslaastit	64
	Yleistä	64
	Historia ja käytön ohjeistus	65
	Tiivistysrappaukset eli sulkulaastit.....	66
	Tiivistyslaastit eli tiivistyspinnoitteet.....	67
	Rakenteeseen tunkeutuvat tiivistyspinnoitteet.....	69
	Tiivistävien laastikorjauksien käyttäminen.....	69
4.4	Mineraalilevy-pinnoitus	71
4.4.1	Yleistä	71
4.4.2	Mineraalilevytyksen toimintatapa	71
4.4.3	Mineraalilevytyksen käyttäminen korjauksissa	72
4.4.4	Mineraalilevytyksen asennus.....	73
4.5	Seinäkorjausten pintakäsittely.....	73
4.6	Mekaaniset menetelmät	74
4.6.1	Yleistä	74
4.6.2	Tiilien vaihto.....	75
4.6.3	Levynlyöntimenetelmä.....	75
4.6.4	Muurisahausmenetelmä.....	76
4.6.5	Pora(ydin)menetelmä eli porausmenetelmä.....	77
4.6.6	V-leikkaus	77
4.6.7	Mekaanisten menetelmien käyttö	78
4.7	Injektointikäsittelyt	79
4.7.1	Yleistä	79
4.7.2	Injektointiaineet, valinta ja vaikutustavat	80
	Bitumiemulsio.....	83
	Sementtimesteitys/-liima/-liete/mikrosementtiliuos.....	83
	Alkalisilikaatit.....	84
	Alkalimetyylisilikonaatti - kaliummetyylisilikonaatti	84
	Alkalisilikaattien ja alkalimetyylisilikonaattien yhdistetuotteet.....	85
	Parafiinitiiivistys	85
	Silikonimikroemulsio.....	85
	Orgaaniset hartsit	86
4.7.3	Rakenteen kosteuspuiteisuuden merkitys injektoinnissa	86
4.7.4	Paineeton injektointi.....	87
4.7.5	Paineellinen injektointi.....	89
	Paineellisten injektointien jaottelu.....	89
	Impulssi-injektointi	90
	Paineellisen injektoinnin toteutus.....	91
4.7.6	Seinä rakenteen tai rakenteen taustapinnan injektointi	93
	Seinä rakenteen tiivistys.....	93
	Rakenteen taustapinnan tiivistys	94
4.7.7	Injektointitapojen vertailu ja onnistumiseen vaikuttavat tekijät.....	95
	Kapillaarikatkoinjektioinnit.....	95
	Seinä rakenteen injektointikorjausten toimivuus	96
	Injektointikorjausten toimivuus.....	96
	Injektointikorjausten riskitekijät.....	98
4.8	Lattioiden korjaustapoja.....	98
4.8.1	Yleistä	98

4.8.2	Laattalattia.....	99
4.8.3	Tuulettuva lattia	99
	Toimintatapa	99
	Mitoittaminen ja suunnittelu.....	99
	Tuuletuksen varmistaminen.....	101
	Korjauksen vaikutus tilojen käyttöön	101
	Muut tuulettumiseen perustuvat korjausratkaisut	102
4.8.4	Epoksi- ja akrylikäsittelyt.....	102
4.8.5	Lattioiden tiivistys.....	103
4.9	Sähköiset kosteudenhallintamenetelmät.....	104
4.9.1	Yleistä	104
4.9.2	Sähköosmoosi eli elektro-osmoosi	104
4.9.3	EOP- Vaihtuva sähköosmoosi.....	105
	Toiminnan edellytykset	105
	Vaikutukset	106
4.10	Rakenteiden lämmittäminen	107
4.10.1	Menetelmän kehitys	107
4.10.2	Menetelmän toiminta	107
5.	Tulokset ja niiden arviointi	110
5.1	Rakenteiden sisäpuolisessa korjaamisessa huomioitavia asioita	110
5.1.1	Rakenteen kosteus ja suolat.....	110
5.1.2	Vauriot ja korjaustavat	110
5.2	Suomalaisiin oloihin soveltuvat korjausmenetelmät	112
5.2.1	Lämpö- ja kosteustekninen toimivuus	112
5.2.2	Sisäilman laatu	112
5.2.3	Korjausten suunnittelu.....	113
5.2.4	Sisäpuolisten korjausten heikkoudet.....	114
6.	Johtopäätökset	115
6.1	Kosteusvauriokorjausten toteuttaminen sisäpuolisilla korjaustavoilla	115
6.2	Sisäpuolisten korjausmenetelmien käytön haasteita.....	116
6.2.1	Haasteet Euroopassa.....	116
6.2.2	Haasteet Suomessa	116
6.2.3	Haasteet korjausten suoritukselle	117
6.2.4	Tulevaisuuden haasteet	117
6.3	Jatkotutkimukset.....	118

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Biosidit

Biosidivalmiste on yhtä tai useampaa tehoainetta sisältävä kemiallinen tai biologinen valmiste, joka on tarkoitettu torjumaan tai tekemään haitattomaksi eliöitä, estämään niiden vaikutusta tai rajoittamaan niiden esiintymistä. Biosideja ovat desinfiointiaineet, tuholaisten torjunta-aineet, teollisuudessa käytettävät säilytys- ja suoja-aineet sekä alusten kiinnittymisenestoaineet.

EOP-menetelmä

EOP-menetelmä on sähköosmoosiin perustuva vaihtuvalla jännitteellä toimiva kosteudenhallintamenetelmä. Menetelmä on kehitetty Yhdysvalloissa parin viime vuosikymmenen aikana.

Hydraatio

Veden sitoutuminen toiseen ainemolekyylisiin kidevedeksi kemiallisella siteellä, tai niin että vesi hajoaa ja muodostuu toinen yhdiste. Tyypillisesti hydraatiolla reagoivia aineita ovat metallien suolat.

Hydrataatio

Hydrataatiolla tarkoitetaan yleisesti veden ja sementin mineraalien välistä sitoutumisprosessia, jossa syntyy lämpöä ja muodostuu kovettunutta betonikiveä.

Hydrofiilinen

Vesihakuinen, vettä imevä materiaali

Hydrofobinen

Vesipakoinen, vettä hylkivä materiaali

Hydrofobinen vuorovaikutus

Hydrofobisella vuorovaikutuksella tarkoitetaan hydrofobisten l. vesipakoisten molekyylinosien taipumusta muodostaa yhteinen faasi erilleen vedestä. Molekyylit voidaan jakaa hydrofiilisiin, hydrofobisiin sekä amfipaattisiin yhdisteisiin sen mukaisesti, miten niillä on taipumus siirtyä eri faaseihin liuoksissa.

Hygroσκοoppinen

Ilmankosteuden mukaan kosteutta imevä ja luovuttava materiaali

Kastepistelämpötila

Lämpötila, jossa vesihöyry alkaa kondensoitua, kun ilma-vesihöyryseos jäähtyy vakio-paineessa.

Kapillaarikatkon injektointi

Rakenteeseen imeytetään porareikien avulla kapillaarihuokoset osittain tai kokonaan täyttävää nestemäistä tai geelimäistä ainetta. Aine voidaan injektoida painovoimaisesti imeyttämällä tai paineellisesti injektointipumpun ja -tulppien avulla.

Krytokiteet, cryptocrystalline (eng.)

Krytokiteet ovat kooltaan niin pieniä kiteitä, että niitä ei pystytä havaitsemaan tavallisilla mikroskoopeilla vaan havainnointiin tarvitaan polarisoivalla valolla varustettu mik-

roskooppi. Kryptokiteitä tavataan useissa kivilajeissa, kuten sedimenttikivilajeissa tai vulkaanisissa kivilajeissa.

Kyllästyskosteus

Ilma voi sisältää tietyssä lämpötilassa rajallisen määrän kosteutta. Tätä kosteuspitoisuuden raja-arvoa sanotaan kyllästyskosteudeksi. Suhteellinen ilmankosteus määrittelee kuinka paljon kosteutta ilma sisältää verrattuna kyllästyskosteuspitoisuuteen.

Maanvastainen rakenne

Rakenneosa, joka on välittömässä yhteydessä maaperään ja rajoittaa huonetilan maataytöstä. Tyypillisesti maanvarainen lattia tai maanvastainen kellarin seinä, mutta myös alapohjan läpimenevät väliseinät ovat maanvastaisia rakenteita.

PAH-yhdiste

Yleisnimike polyaromaattisille hiilivedyille. PAH-yhdisteitä tavataan yleisesti vanhoissa kivihiilipikeä sisältävissä vedeneristeissä.

Rooman kalkki

Rooman kalkki on kipsivapaata, nopeasti sitoutuvaa hydraulista kalkkia. Rooman kalkkia kutsutaan myös rooman sementiksi, vaikka aine on sementtivapaata. Rooman kalkkia oli hyvin yleisesti käytössä Euroopassa 1800-luvun alusta 1850-luvulle asti. Nykyään rooman kalkkia käytetään kosteus- ja suolavaurioituneiden rakennusten korjaamiseen tarkoitetuissa laasteissa. Nopean sitoutumisen ja hapottomuuden takia rooman kalkkia käytetään myös aktiivisten vesivuotojen tiivistämisessä.

Suolankeräyslaasti

Erikoisrappauslaasti, joka on kehitetty suolarasitetuille rakenteille. Rappaus toimii huokoisuutensa takia kapillaarikatkaisevana kerroksena, jossa kapillaarisen kosteuden mukanaan kuljettamat suolat kiteytyvät rappauslaastin huokosiin.

Sulkulaasti

Erikoisrappauslaasti, joka asennetaan tyypillisesti noin 10..15 mm paksuisena kerrokseksi. Kuivuttuaan laasti toimii huokosrakenteensa ansiosta nestemäisen veden siirtymisen estävänä kerroksena. Kestää tiettyyn rajaan asti paineellista kosteusrasitusta.

Temperierung (saks.), tempering (eng.)

Rakenteiden lämmittäminen. Korjausmenetelmä, jossa rakenteen sisäpinnan rappaukseen asennetaan lämmitysputket tai -kaapelit. Menetelmässä lämmitetään rakennetta, jolloin kapillaarinen kosteuden siirtyminen estyy rakenteen pintaosissa ja rakenne alkaa hitaasti kuivumaan.

Tensidi (Wikipedia)

Tensidit ovat yhdisteitä, joissa on hydrofiilinen (vesihakuinen) ja hydrofobinen (vesipakoinen) pää. Tensidit tunkeutuvat vesiliuoksessa vesimolekyylien väleihin pienentäen pintajännitystä. Tensidit irrottavat kuiduista tehokkaasti likaa, minkä vuoksi niitä käytetään pesuaineissa. Saippua on yksi tensidi, mutta on olemassa myös synteettisiä tensidejä.

Uhrautuva laasti

Erikoislaasti, jonka tehtävänä on suojata alla olevaa rakennetta esimerkiksi kosteuden, suolojen, mekaanisen tai mikro-organismien aiheuttamilta rasituksilta. Suojatessaan rakennetta laastikerros vähitellen tuhoutuu ja se voidaan uusida tarvittavin väliajoin.

Vedentiivistyspinnoite

Erikoislaasti, joka asennetaan tyypillisesti noin 2..3 mm paksuiseksi kerrokseksi vähintään kahdella työstökerralla. Tyypillisesti sementtipohjainen, jossa on elastisuutta lisääviä aineita. Kestää tiettyyn rajaan asti paineellista kosteusrasitusta. Suojataan yleensä rappauslaastikerroksella.

WTA – Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (eng. International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Monuments Preservation).

Alkujaan saksalainen tieteellis-teknillinen yhdistys, joka on perustettu rakennusten ylläpitoa ja huoltoa varten. Yhdistys on laajentunut kansainväliseksi rakennusten korjausmenetelmien tutkimusta ja kehitystä tukevaksi yhdistykseksi. Yhdistys tuottaa tietoa ja ohjeistusta rakennusten hoidosta, suunnittelusta ja korjauksista vastaaville.

1. JOHDANTO

Viimeisen viidentoista vuoden aikana on kiinnitetty yhä enemmän huomiota rakennusten kosteus- ja homeongelmiin. Maanvastaisiin rakenteisiin kerääntyvä kosteus on yksi yleisimmistä kosteusvaurion syistä. Maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmat ilmenevät tiili- ja betonirakenteissa esiintyvänä maali- ja pinnoitevaurioina sekä puu- ja levyrakenteissa home- ja lahovaurioina. Näkyvien vaurioiden lisäksi kosteusongelmat heikentävät sisäilman laatua. Ongelmien kasvua on lisännyt aikaisemmin varastokäytössä olleiden kellarikerroksen tilojen ottaminen asuin-, toimisto- ja liikekäyttöön ilman rakenteiden kosteusteknistä kuntotutkimusta ja suunnittelua. Käyttötarkoituksen muutoksien myötä muuttuvat myös rakennuksen sisäilmaolosuhteet, mikä vaikuttaa suoraan myös rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Tällöin aikaisemmin vauriottomiin rakenteisiin voi syntyä lyhyessä ajassa korjausten jälkeen näkyviä vaurioita.

Ilmaston muutoksen myötä on erittäin todennäköistä, että rakennuksien kosteusrasitukset lisääntyvät. Lämpimämmät talvet sekä kasvavat sademäärät lisäävät jäätymissulamissyklejä sekä heikentävät talvikaudella tapahtuvaa rakenteiden kuivumista. Odotettavissa on pohjavedenpinnan nousua, joka voi aiheuttaa lisääntyneitä kosteusvaurioita kellaritiloissa. Lisäksi kohonneen ilmakehän kosteuden myötä maanvastaisten rakenteiden kuivumiskyky heikentyy ja nykyisellään toimineet rakenteet voivat alkaa vaurioitua kosteuden vaikutuksesta.

Näkyvien vaurioiden lisäksi rakenteen korkea kosteuspitoisuus alentaa sen lämpötilaa sekä vaikuttaa välillisesti myös huoneilman lämpötilaan sekä kosteuspitoisuuteen. Nämä tekijät vaikuttavat tiloissa oleskeltaessa viihtyvyyteen sekä edelleen luokiteltuun hyvän asuinhygienian määriteltävyyteen. Ennen korjauksiin ryhtymistä on ymmärrettävä, miten korjattava rakenne kosteusteknisesti toimii ja mitä on huomioitava korjauksia tehtäessä. Usein vaurioitunutta rakennetta on saatettu korjata useita kertoja, sillä ei ole osattu riittävässä määrin ottaa huomioon korjauksen aiheuttamia muutoksia rakenteen toiminnassa.

Tässä diplomityössä on keskitytty käsittelemään kirjallisuusaineiston perusteella pääasiassa vanhoja tiili- ja betonirakenteisia kerrostaloja sekä niiden tyypillisimpiä maanvastaisia rakenteita, kosteuden ja suolojen kulkeutumista rakenteissa sekä niiden aiheuttamia vaurioita. Useimmiten kosteus on aiheuttanut vaurioita maanvastaisen rakenteen sisäpuolen pintarakenteisiin, jolloin joudutaan joka tapauksessa uusimaan rappaus- ja maalipinnoitteita. Pinnoitteiden uusiminen aikaisempaa vastaavilla tuotteilla johtaa vaurioiden uusiutumiseen. Hakemalla oikeat korjaustavat sisäpintojen korjauksiin voidaan vaurioiden uusiutuminen estää tai hidastaa niiden esiintuloa, jolloin pintojen uusintakorjaustarpeen väli pitenee parista vuodesta jopa 15..40 vuoteen.

Keski-Euroopassa on jo vuosikymmeniä ollut käytössä erilaisia rakenteiden sisäpuolisia korjausmenetelmiä maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmiin. Sisäpuoliset korjausmenetelmät ovat tarpeen pääasiassa kohteissa, joissa maanvastaisten rakenteiden ulkopuolinen korjaaminen on mahdotonta, kallista olosuhteista johtuen tai vauriot ovat paikallisia. Etenkin kaupunkien keskustoissa rakennusta ympäröivän maan auki kaivaminen ja ulkopuolisen vedeneristyksen korjaaminen on katualueiden osalta kallista. Paikoin rakennukset ovat kiinni toisissaan, jolloin niiden ulkopuolinen korjaaminen on mahdotonta. Korjausrakentamisessa on haettu ulkopuolisille korjauksille vaihtoehtoja, jotka ovat teknis-taloudellisesti toimivia, ja joilla pystytään hallitsemaan rakenteisiin kulkeutuvan kosteuden haitallisia vaikutuksia. Vaihtoehtoisina korjausvaihtoehtoina on käytetty mm. erilaisia rakenteen vesihöyrynläpäisevyyteen tai rakenteen tiivistämiseen liittyviä sisäpuolisia korjauksia.

Vaikka Suomessa on ollut käytettävissä tutkimustietoa sekä menetelmäkuvauksia näiden korjausten toteuttamisesta jo yli kahdenkymmenen vuoden ajan, on niiden soveltaminen käytäntöön ollut hidasta. Tähän voi olla syynä epätietoisuus menetelmien toimivuudesta sekä se, että tutkimustietoa ei ole viety riittävän kattavasti rakennusalan ammattilaisten käytettäväksi perus- tai täydennyskoulutuksessa. Tietoisuus näistä vaihtoehtoisista korjausmenetelmistä on ollut Suomessa melko vähäistä, mutta viime vuosina niiden käyttö on lisääntynyt etenkin pääkaupunkiseudulla.

Diplomityön tarkoituksena on laajentaa tietoisuutta rakenteiden kosteuden hallinnasta sekä kosteusongelmaisten rakenteiden sisäpuolisista korjausmenetelmistä. Tietoa haetaan kotimaisesta sekä kansainvälisestä kirjallisuudesta. Tarkoituksena on esittää mahdollisimman laajat tausta- sekä perustiedot eri menetelmistä, jotta on mahdollista arvioida menetelmien käytettävyyttä erilaisten rakenteiden korjauksissa.

2. TUTKIMUSMENETELMÄT JA TYÖSSÄ KÄYTETTY AINEISTO

2.1 Johdanto

Diplomityö koostuu kahdesta pääosa-alueesta. Ensin on selvitetty vanhojen kerrostalojen maanvastaisten seinien tyypillisimpiä rakenteita ja niiden kosteus- ja vedeneristyksen toteutustapoja. Rakenteiden ohella käsitellään kosteuden ja suolojen siirtymistä rakenteissa sekä niiden aiheuttamien vaurioiden syntymistä. Diplomityön pääpaino on kiviaineisten maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallintaan soveltuvien korjaustapojen ja –menetelmien selvittämisessä.

Tietoa sisäpuolisista kosteuden hallinta menetelmistä on haettu kotimaisesta ja ulkomaisesta kirjallisuudesta sekä aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. Lisäksi työssä on käytetty materiaalivalmistajilta saatuja tietoja sekä kertyneitä kokemuksia kosteusvaurioiduneiden maanvastaisten rakenteiden tutkimuksista ja korjauksista.

Tulokset osiossa (luku 5) esitetään päätelmät tutkimuksen perusteella mielenkiintoisimpien ja käytännöllisimpien korjausmenetelmien käyttökelpoisuudesta eri rakenteissa, keskittyen erityisesti Suomessa yleisesti käytettyihin rakennetyyppeihin.

2.2 Lähtökohtia

Kaupunkien keskustoissa sijaitsevien rakennusten lisätilan tarve on johtanut siihen, että rakennusten kellaritiloja otetaan hyötykäyttöön, kuten liike- ja varastotiloiksi sekä toimistotiloiksi. Useimmiten kellaritiloja otetaan käyttöön hyvin pienten, lähinnä pinnoitteisiin kohdistuvien korjausten jälkeen huomioimatta ollenkaan käyttötarkoituksen muutoksien aiheuttamia sisäilma- ja rakennusfysikaalisia vaatimuksia. Usein muutaman vuoden kuluttua korjauksista todetaan tiloissa kosteus- ja homeongelmia, jotka täytyisi saada pois helposti ja nopeasti, mieluiten rikkomatta remontoituja pintoja ja ilman tilojen käyttämisen rajoituksia.

Järkevän kellari- ja pohjakerroksen tilojen korjaamisen peruslähtökohta on suorittaa ennen korjauksia perusteellinen kosteuskartoitus sekä selvittää olemassa olevat rakenteet ja niiden mahdolliset riskikohdat. Pintakosteusilmaisimien avulla rakenteiden kohonneet kosteudet voidaan havaita ja suorittaa tarvittaessa rakennekosteusmittaukset, jotta voidaan selvittää kosteuspitoisuus myös syvemmällä rakenteen sisällä. Tutkimusten perusteella voidaan valita korjauksessa käytettävät uudet materiaalit ja korjaustavat, niin että maanvastainen rakenteiden kosteustekninen toiminta ei aiheuta kosteusvauriota.

Vanhat maalipinnoitteet voivat läpäistä vähäisessä kosteusrasituksessa rakenteeseen kulkeutuvan kosteuden ongelmitta. Mikäli rakenteet pinnoitetaan liian tiiviillä maaleilla, estyy vesihöyryn haihtuminen ja kosteutta sekä suoloja alkaa kerääntyä maalipinnoitteen alle. Tämä on useimpien korjauskohteiden ongelma. Ongelmien poistaminen ei kuitenkaan ole helppoa. Useimmiten joudutaan purkamaan pintarakenteita ja törmätään vanhoihin vedeneristeisiin, jotka voivat sisältää terveydelle haitallisia aineita.

Yleisimmät terveydelle haitalliset vedeneristeet ovat kivihiilipikipohjaisia sivelyinä tai valuasfalttina rakenteisiin asennettuja, pinnaltaan lasittuneita vedeneristyskerroksia. Kivihiilipiki sisältää polyaromaattisia hiilivetyjä, jotka ovat syöpää aiheuttavia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. PAH-vedeneristeistä voi kosteuden vaikutuksesta tai lasittuneen pinnan rikkouduttua emittoitua sisäilmaan orgaanisia yhdisteitä, jotka heikentävät sisäilman laatua.

Tämä johtaa siihen, että ennen kuin päästään korjaamaan rakenteita, joudutaan vanhat vedeneristeet poistamaan erikoispuurkutyönä ja varmistua jäljelle jäävän vedeneristeen kapseloinnista, niin että sisäilmahaittoja ei pääse syntymään. Vedeneristeiden poistamistarve tulee kuitenkin arvioida tapauskohtaisesti, sillä osa vanhoista vedeneristeistä voi sijaita rakenteen keskellä tai kiinteänä osana kantavaa rakennetta, jolloin niiden poistaminen ei välttämättä ole taloudellisesti tai rakenteellisesti järkevää. Tällöin korjaus on suositeltavaa tehdä asiantuntevan ja rakennusfysikaalisen koulutuksen saaneen suunnittelijan opastuksella.

2.3 Aikaisemmat tutkimukset ja kirjallinen aineisto

Euroopan eri yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa on tehty vuosien mittaan paljon tutkimuksia kosteus- ja suolavaurioituneiden rakenteiden erilaisista korjaustavoista. Niin kuin usein kehitystyötä tehtäessä, on kirjallisuusaineiston perusteella havaittavissa, kuinka osa uudemmissa tutkimuksissa tuo uutta tietoa, jonka perusteella aikaisempien tutkimusten tulokset vaurioiden synnystä tai korjausmenetelmien toimivuudesta voidaan todeta osittain vääriksi, lyhytikäisiksi tai tekniikoiden kehittyessä turhan työläiksi. Osa vanhoista, aiemmin suositelluista korjausmenetelmistä voi aiheuttaa sisäilman kannalta riskitekijän.

Tutkimustyötä on tehty erityisesti historiallisten rakenteiden rappaus- ja muurauslaastien koostumuksen selvittämiseksi ja uusien korjauslaastien kehittämiseksi. Aiheesta on lukuisia artikkeleita alan julkaisuissa ja uusimpia laajoja tutkimuksia on mm. Euroopan unionin rahoittama kolmevuotinen COMPASS-tutkimus¹. Nämä tutkimukset koskevat lähinnä kuitenkin museaalisten tai arkeologisten kohteiden korjaamista, jolloin niiden tulokset eivät ole suoraan sovellettavissa uudempien rakennusten korjaamiseen.

Suomessa on käsitelty tai sivuttu tässä diplomityössä käsiteltyjä korjausmenetelmiä ja tutkimusalaa aikaisemmissa diplomitoissa, Tampereen teknillisen yliopiston (ent. korkeakoulu) sekä VTT:n tutkimuksissa [1; 2; 3; 4; 5]. Rakennushallitus, VTT sekä

¹ Compass - Compatibility of plasters and renders with salt-loaded substrates in historic buildings. EU:n tuella tehty kansainvälinen kolmevuotinen (2002-2005) tutkimushanke suolarasitettujen rakenteiden muuraus- ja rappauslaasteista

Teknillinen korkeakoulu ovat selvittäneet vanhojen tiilirakenteiden kapillaarisen kosteuden nousun estämiseksi soveltuvia injektointi- ja elektro-osmoosimenetelmiä sekä rakenteiden pinnoitteiden vaikutusta vaurioiden ehkäisemisessä. Rakennusinsinööriintalon korjausrakentamista koskevassa oppaassa [6, s. 167] on lyhyesti kerrottu alapohjien kosteusvauriokorjauksen yhteydessä injektointi- ja elektro-osmoosikorjausmenetelmistä kapillaarisen kosteuden nousun estämiseksi.

Sievola [7] on tutkinut diplomityössään kosteusvaurioituneiden maanvastaisen seinärakenteiden sisäpuolisten laastikorjausten vaikutusta sisäilman laatuun kokeellisella tutkimuksella. Työssä on tutkittu laastien mikrobien sekä PAH-yhdisteiden läpäisevyyttä sekä fotokatalyyttisen pinnoitteen vaikutusta sisäilman laatuun.

Ruotsissa on vastaavasti todettu, että rakennusalalla on liian vähän yhtenäistä tietoa maanvastaisten rakenteiden korjausmenetelmistä, minkä johdosta 1990-luvun loppupuolella on tehty pieni maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmia ja niiden korjausmenetelmiä käsittelevä opas. Oppaassa on kerrottu menetelmäkuvausten ja niiden toimivuuden arvioinnin yhteydessä lyhyesti maassa tehdyistä kokeellisista korjausmenetelmiä käsittelevistä tutkimuksista [8].

Suomessa aihepiiriin kuuluvia tutkimuksia ovat Museoviraston tuella 1980-luvulla tehdyt kenttätutkimukset Suomenlinnassa, Merikasarmilla sekä Kastelholman linnoituksella historiallisten rakennusten rappauksiin soveltuvista laasteista sekä tiilien rapautumisesta, ja keinoja niiden estämiseksi. Kenttätutkimusten ohella on tutkittu myös laboriotutkimuksilla julkisivurappauksiin soveltuvien laastien oikeaa koostumusta. Kokeissa testattiin muun muassa rappauksen pakkasenkestävyyttä, mihin vaikuttaa suuresti laastien ilmahuokostilavuus. [3; 4; 9; 10] Suomenlinnassa on tehty EU:n tuella 2000-luvun alussa kenttätutkimuksia puhtaaksi muuratun tiiliseinän rapautumisen ehkäisemisestä sisäilman kosteutta ja lämpötilaa säätämällä [11].

Useita tutkimuksia on tehty myös historiallisesti arvokkaiden, satoja vuosia vanhojen kohteiden korjauksiin soveltuvista korjausmenetelmistä. Historiallisten kohteiden määrä on Suomessa pieni, minkä takia niihin soveltuvia restauroivia korjausmenetelmiä ei käsitellä tässä tutkimuksessa.

2.4 Aikaisempien tutkimusten antia

Tiilikivien ja rappauslaastien rapautuminen johtuvat niiden sisältämien suolojen olotilan muutoksista ilman kosteuden muuttuessa. Lähimpänä rakenteen pintaa sijaitsevat helpoimmin liukenevat ja kiteytyvät suolat. Perander et al. [3, s.137] mukaan on todettu sekä laboratorio- että kenttäkokeissa tiilien rapautumisen olevan voimakkainta olosuhteissa, joissa kosteus muuttuu suolojen kastepisteen molemmilla puolilla. He esittävät, että sisäilman lämpötila ja kosteus pidettäisiin mahdollisimman vakiona, mikä vähentäisi vaurioiden syntyä. Tehtyjen havaintojen perusteella kosteissa, lämmittämättömissä tiloissa esiintyi runsaasti suoloja, mutta niiden aiheuttamat vauriot rakenteille olivat vähäisiä, kun taas jaksollisesti lämmitetyissä tiloissa vauriot olivat suurempia. Vaurioitumiseen vaikuttaa myös tiilien polttoaste, ja yleensä rapautuneet tiilet ovat väriltään vaaleampi kuin ehjät tiilet. [3, s. 124-129].

Vahanan [4, s. 86-87] on sivunnut vuonna 1983 valmistuneessa, historiallisen kohteiden restauroinnissa käytettäviä rappauslaasteja käsittelevässä diplomityössään maakosteudelle alttiiden rapattujen tiiliseinien kosteusteknisiä korjausratkaisuja ja on listannut ne seuraavasti:

- kuivatuksen järjestäminen perusmuurin ja perustuksen viereen
- kapillaarikatkojen rakentaminen injektoimalla tai sähkö-osmoottisilla menetelmillä
- suolojen impregnointi vaikealiukoisemmiksi
- seinien mekaaninen puhdistus ennen rappauksien uusintaa
- perusmuurin ja sokkelin tiivistäminen rappaamalla vedenimeytymisen estävillä laasteilla
- sisäseinien rappaus kerroksittain, niin että tiivis kynsilaasti aiheuttaa haihtumisrintaman muodostumisen rappauskerrosten rajapintaan ja pintakerros on huokoistettu.

Virtanen [5] on diplomityössään tutkinut kapillaarisen kosteuden nousun estämistä injektointimenetelmillä laboratorio- ja kenttätutkimusten sekä kirjallisuusselvityksen avulla. Tutkimuksessa on käsitelty myös erilaisia rakenteiden tuulettamiseen perustuvia korjausratkaisuja, joista osa on todettu Suomen oloihin soveltumattomiksi. Myös Rakennushallituksen TTK:lla teettämässä koerakentamistutkimuksessa [12] tutkittiin tiilirakenteiden kapillaarisen kosteuden nousun estämistä paineettomalla injektointimenetelmällä käyttäen erilaisia injektointiaineita. Tutkimuksessa todettiin, että injektoimalla pystytään vähentämään kapillaarista kosteuden nousua 90 %. Tutkimuksessa kehitetyt injektointimenetelmät ovat kuitenkin työläitä, jotta niiden käyttö tutkimuksen mukaisien suositusten mukaan olisi yleistynyt.

Suomenlinnassa Tenalji von Fersenissä tehdyissä tutkimuksissa [11] on todettu, että äkilliset ilmankosteuden muutokset ovat merkittävä tekijä suola- ja kosteusrasitettujen tiilien vaurioitumisessa. Vaurioitumista voidaan hillitä rajoittamalla tilan sisäilmankosteus talvi-kevät -kaudella RH 50-57 %:in ja kesä-syys -kaudella RH 55-75 %:in. Tenalji von Fersenissä merkittävin tiiliä vaurioittava suola on natriumkloridi, jonka liukoisuusraja on RH 55%. Tehdyllä säädöllä pidetään natriumkloridi talvikaudella kiteytyneenä ja taas kesällä liunneena, jolloin tavanomaista edestakaismuutosta ei ilmene ja vaurioituminen vähenee merkittävästi.

3. MAANVASTAISTEN RAKENTEIDEN KOSTEUDEN HALLINNAN LÄHTÖKOHDAT

3.1 Johdanto

Maanvastaisten rakenteiden kosteutta ja sen aiheuttamia ongelmia käsiteltäessä on ymmärrettävä millaisia ovat kyseessä olevat rakenteet, miten kosteus niihin liittyy ja milloin rakenteiden kosteus on ongelma. Seuraavassa käydään lyhyesti läpi tyypillisiä suomalaisten rakennusten maanvastaisia rakenteita sekä niiden alkuperäisiä vedeneristystapoja. Lisäksi käsitellään lyhyesti rakenteissa esiintyvän kosteuden siirtymistapoja, mistä on olemassa runsaasti kirjallisuutta. Kosteuden ohella selvitetään rakenteissa esiintyviä suojoja, niiden kulkeutumista sekä suolavaurioiden syntymekanismia.

3.2 Vanhat perusmuurirakenteet eri aikakausina

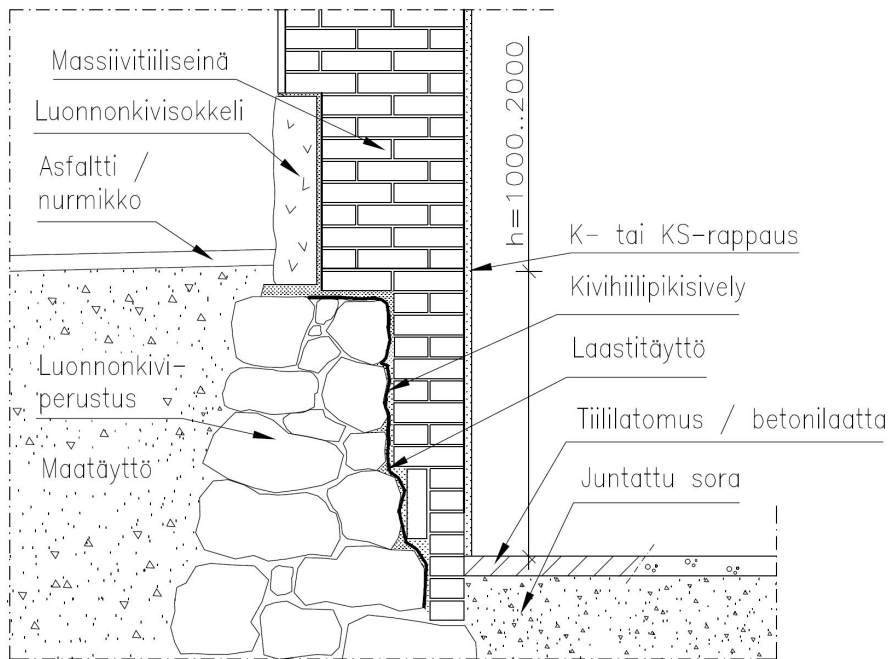
3.2.1 Yleistä

Maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmia ilmenee eri-ikäisissä rakennuksissa. Rakentamisen kehittymisen myötä rakennusaineet ja etenkin rakennusten maanvastaisten rakenteiden toteutus on muuttunut. Korjauksia suunniteltaessa tulee tiedostaa kullekin aikakaudelle tyypilliset rakenteet, jotta pystytään huomioimaan riittävässä määrin rakenteiden erilaisuus korjaustapoja määriteltäessä.

3.2.2 Kellarin lattia- ja seinärakenteet 1880-1940

Aikakauden alkupuolen rakennukset ovat pääsääntöisesti tiilirunkoisia. Tiilinä käytettiin poltettuja täystiiliä, punatiiliä. Vuoteen 1917 asti Helsingin rakennusjärjestyksen mukaan ensimmäisen kerroksen tiiliseinien tuli olla vähintään 2½ kiven seiniä. Rapattuina 2½ kiven seinät ovat paksuudeltaan noin 75 cm. [13, s. 14-17]

Vanhoissa 1800-luvun ja 1900-luvun vaihteen rakennuksissa perustuksena on pääasiassa luonnonkivistä tehty kivilatomus, joka on saatettu tehdä puupaalu- tai arinaperustuksen päälle. Perusmuurissa saatettiin käyttää luonnonkivien ohella rakennuspaikalta räjäytettyä kiviainesta. Latomus tehtiin useimmiten ns. kylmämuurina ilman sideainetta. Muuratuissa perusmuureissa sideaineena käytettiin sementinsekaista kalkkilaastia. Kellarin sisäseinä muurattiin perusmuurin kohdalla useimmiten punatiilestä, mutta 1900-luvun puolella sisäkuori saatettiin valaa myös betonista. Kuvassa 3.1 on esitetty tyypillinen vuosisadan vaihteessa rakennetun kerrostalon kellarin seinän rakenneleikkaus materiaaleineen.



Kuva 3.1. Tyypillinen 1900-luvun vaihteen kerrostalon kellarin seinä.

Vanhojen perusmuurien vedeneristeenä on käytetty kivihiiplitervaa, pikeä, bitumia ja valuasfalttia. Vedeneristekerros sijoitettiin kivilatomuksen sisäpintaan täyttämällä saumat laastilla ja sivelemällä pinnat bitumilla tai kivihiiplitervalla ennen sisäkuoren muurausta. Esimerkki tällaisesta toteutuksesta on kuvassa 3.2., jossa perusmuurin sisäpinnan muuraus on purettu ja takaa paljastuneen luonnonkiven pinnassa on musta kivihiiplikisively.

Toinen yleisesti käytetty tapa oli täyttää perusmuurin ja sisäkuoren väli valuasfaltilla. Valuasfaltti valmistettiin työmaalla sekoittamalla asfalttiin hiekkaa. Tyypillisimmät vanhojen rakennusten valuasfaltit sisältävät kivihiiplitervaa, joka sisältää terveydelle haitallisia polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH-yhdisteitä). Rakenteiden sisältämät haitta-aineet ovat yksi maanvastaisten rakenteiden korjaussuunnittelussa huomioitavia erityisaloja. Kolmantena maanvastaisten rakenteiden kosteuden suojaustapana on ollut kivilatomuksen ulkopuolelle asennettava paksu savikerros, jolla on estetty nestemäisen veden kulkeutuminen rakenteeseen.

Luonnonkivistä sekä sisäpinnan tiilimuurauksesta tehdyn perusmuurin päällinen tassattiin laastilla ja pienillä kivillä, jonka jälkeen tehtiin maaperän kosteuden nousun katkaiseva kerros sivelemällä pinta bitumilla tai kivihiiplitervalla, asentamalla valuasfalttikerros tai valmiit asfalttilaatat. Kapillaarikatkon päälle muurattiin rakennuksen ulkoseinät massiivitiilestä.

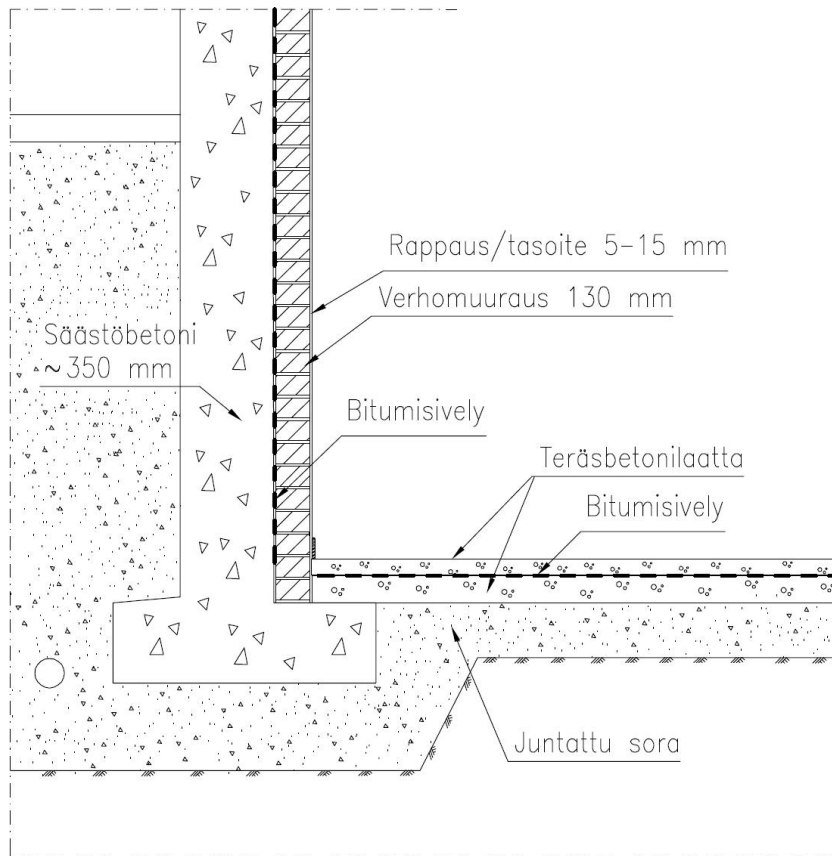


Kuva 3.2. Puretun tiilimuurauksen takana on nähtävissä vanha luonnonkivimuurauksen pintaan tehty vedeneristys. Rakennus on rakennettu 1880-luvun lopussa.

Betonin yleistymisen myötä 1910-luvulta alkaen perusmuurit valettiin ns. säästöbetonista, jossa käytettiin massan seassa suuria kiviä. Aluksi betonista perusmuuria ei vedeneristetty, vaan luotettiin vesitiiveyden osalta paksuun betonivaluun. Vedeneristys siveltiin myös betonirakenteissa muurin sisäpintaan ja vedeneristys suojattiin huokoisista tiilistä tehdyllä $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ -kiven verhomuurauksella. Kuvassa 3.3 on tyypillinen 1930-luvun kellarin maanvastaisen seinän rakenneleikkaus. Vedenpaineen vaikutuksen alaisissa rakenteissa vedeneristeen suojaksi valettiin raudoitettu betoniseinä estämään vedeneristeen irtoaminen muurin pinnasta. Asfaltin sijasta vedeneristeenä käytettiin usein perusmuuriin kiinni liimattavaa eristysuopaa. [14, s.60]

Alapohjarakenteina olivat ryömintätalaiset puurakenteiset rossipohjat tai tiiliholvatut puurakenteiset orgaanisella sammal-, turve- tai olkitäytöllä lämmöneristetyt alapohjat. Kellaritilallisissa rakennuksissa tehtiin maanvarainen alapohja tasatun pohjamaan päälle. Monissa vanhoissa 1800-luvun ja 1900-luvun alun rakennuksissa kellareissa sijaitti toisarvoista varastotilaa. Halkokellareissa saattoi olla tiivistetty maalattia, muissa tiloissa käytettiin tiililadontaa tai kiveystä.

1900-luvulla kellarien lattiarakenteena yleistyi maakerroksen varaan valettu raudoitettu betonilaatta. Vain osittain maanpinnan alapuolella olevissa asuin- tai liikekäyttöön tarkoitetuissa tiloissa maanvaraisten lattioiden vedeneristeenä käytettiin valuasfalttia, joka asennettiin tasatun sorakerroksen päälle 5..20 cm:n paksuisena kerroksena. Toisena eristysaineena käytettiin ns. pirunpoikaa, joka saatiin sekoittamalla hiekkaa kivihilpikeen. Vedeneristekerroksen päälle rakennettiin puurakenteinen alapohjarakenne orgaanisella lämmöneristetäytöllä.



Kuva 3.3. Tyypillinen 1930-luvun kerrostalon kellarin maanvastainen seinä.

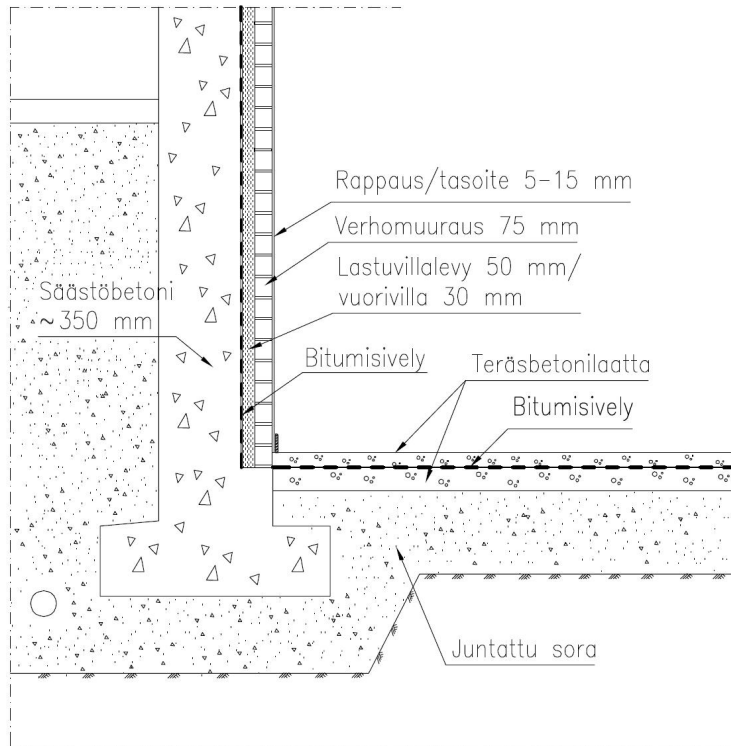
Betonilattioiden yleistymisen myötä alapohjiin asennettiin vedeneristekerros kahden betonilaatan väliin. Alemman betonilaatan pintaan siveltiin yleensä kahteen kertaan bitumi- tai kivihiilipikikerros. Joissakin rakennuksissa betonilaattojen väliin asennettiin 2.4 cm:n valuasfalttikerros. [14, s. 60-62] Rakennuspaikasta ja tilan alkuperäisestä käyttötarkoituksesta riippuen alapohjissa ei välttämättä ole lainkaan vedeneristyskerrosta, vaan alapohjan betonilaatta on valettu suoraan tasatun pohjamaan päälle.

Ensimmäiset vedentiivistysbetonit tulivat markkinoille ennen ensimmäistä maailmansotaa. Kyseessä olivat betonin ja laastin sekoituksessa massaan lisättävät aineet, joiden tarkoituksena oli tehdä massasta vedenpitävä. Rakennustaidon esittelyssä vuonna 1910 oli laastiin sekoitettava Bitumen-emulsiooni, joka oli öljymäinen, tummanruskea, bitumin, veden ja emulgaattorin seos. 1930-luvulla vastaavia tuotteita myytiin tuotenimillä Ceresit, Sica ja Tricosal. [14, s. 63]

3.2.3 Kellarin lattia- ja seinärakenteet 1940-1960

Rakennusinsinööriyhdistyksen 1948 julkaiseman Talonrakennuksen kosteus- ja vesieristystöiden normaalimääräykset (RIY A10) [15] vihkossa on normitettu käytettäviä kosteus- ja vedeneristeitä sekä ohjeistettu yleisimpien eristysten suoritustavat (kostuseristys bitumisivelyillä, vedenpaine-eristys eristyskermeillä ja valuasfaltilla). Ohjeessa todetaan seuraavasti: ” Lyhyesti mainittakoon kuitenkin, että kostuseristyksellä eristetään kaikki pinnat, joita myöten maakosteus voi tunkeutua rakennukseen. Niinpä eriste-

tään maanvastaiset permannot, joista eristyksen tulee katkeamatta jatkaa perusmuurin kautta sokkelin sisäpuolelle ja tämän päältä ulkoilmaan. Sokkeli on aina eristettävä sekä päältä että takaa siihen liittyvästä ylärakenteesta. Sydänmuurit, pilarit ja muut kantavat rakenteet eristetään perustuksestaan.”



Kuva 3.4. Tyypillinen kellarin seinärakenne 1950-luvun lopulla rakennetussa kerrostalossa

1950-luvulla valuasfaltin käyttö vedeneristeenä väheni. Pääasiallisena vedeneristeenä niin seinä kuin lattiarakenteissa olivat kylmäsiveltävät bitumiliuokset, kuumana levitettävät bitumit sekä vesilasi. Kuvassa 3.4 on 1950-luvun rakennuksen kellarin sisäpuolelta lämmöneristetty seinä. Edelleenkin käytössä oli myös lämpöeristeettömiä ilmaväällisiä kellarin seiniä. Kosteudeneristysivelyjä tehtäessä pinnat pohjustettiin bitumiliuoksella, minkä jälkeen levitettiin varsinainen vedeneristeenä toimiva kuumabitumisively.

Kosteudeneristeenä käytettiin tislattuja sekä puhallettuja bitumeja, joita valmistettiin eri laatuluokissa. Pohjaeristykseen soveltui parhaiten tislattujen bitumien laatuluokat TB 25 – TB 65. Vesilasia käytettiin lähinnä kivipintojen kosteuseristämiseen. [16, s. 264] Maanvastaisten rakenteiden betonimassaan lisättiin tiivistysaineita, joilla saatiin ”vesitiivistä” betonia. Osa aineista jäi betonin huokosiin täyttäen ne, osa vaikutti betonimassaan heikentäen ainesosien välistä kitkaa, jolloin saatiin tiiviimpää betonia.

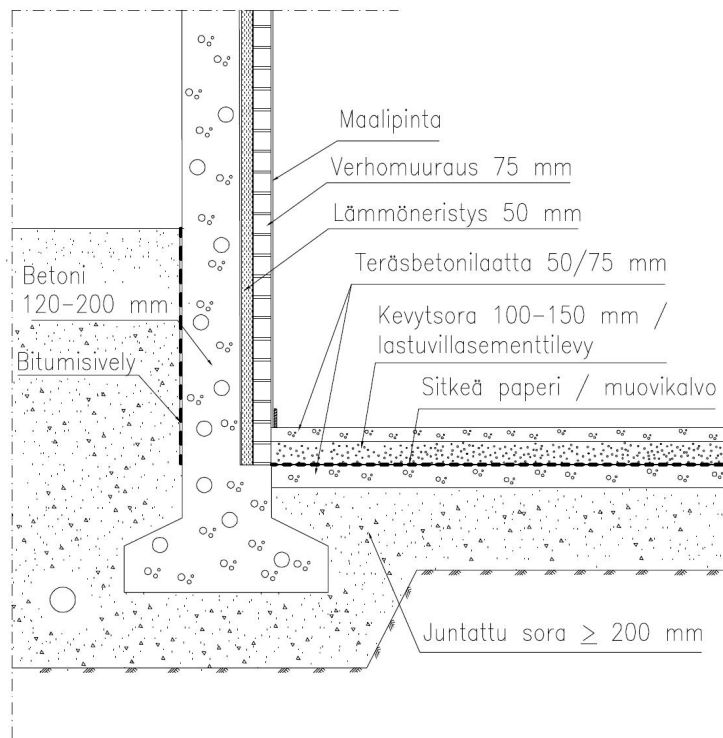
Vedeneritys asennettiin muutoin tiilimuurirunkoisissa rakennuksissa kellarin seinärakenteessa betonin sisäpintaan lämmöneristeen ja muuratun sisäkuoren taakse. Lämmöneristeenä käytettiin useimmiten lastuvilla- tai vuorivillalevyä tai korkkia, jotka painettiin kiinni märkään bitumisivelyyn. Kuorimuurauksen sijaan lämmöneristeen pinta saatettiin myös rapata. Alapohjarakenteissa yleinen vedeneristeen sijaintipaikka oli kah-

den betonilaatan välissä. Monissa rakennuksissa sisäkuorimuuraus sekä muuratut väli- seinät on tehty alapohjalaatan päälle ilman seinän alla olevaa kosteuseristystä.

Pilarirunkoisissa rakennuksissa maanvastaiset ulkoseinät on tehty vastaavasti kuin tiilirunkoisissa rakennuksissa. Rakennuksen rungon pilareissa ei ole kapillaarisen kosteuden nousun katkaisevaa vedeneristekerrosta. Seinärakenteissa kapillaarikatko on asennettu yleensä perusmuurin yläosaan lähelle ensimmäistä välipohjaa.

3.2.4 Kellarin lattia- ja seinärakenteet 1960-1975

Vuonna 1959 tuli voimaan uusi rakennuslaki sekä –asetus, jossa todetaan kosteus- ja vedeneristysten osalta, että rakennus on eristettävä kosteudelta ja tarpeen vaatiessa vedennpaineelta. Aikakautta vallitsi kerrostalojen elementtirakentaminen, mutta pääosa rakennuksien maanvastaisista rakenteista oli kuitenkin paikalla valettuja betoniseiniä. Massiivitiilimuurauksien käyttö rakenteissa loppui lähes täysin. Tiiltä käytettiin edelleen väliseinissä sekä kuorimuurauksissa.



Kuva 3.5. Tyypillinen 1960-luvun kerrostalon maanvastainen seinä.

Kerrostalot 1960-1975 kirjassa [17] esitettyjen tyypillisten rakenteiden perusteella aikakauden kosteudeneristys maanvastaisissa rakenteissa toteutettiin edelleen perinteisesti betonisen ulkokuoren sisäpuolisena bitumieristykseenä, mutta rakenteen ulkopuolelta tehdyt bitumisivelyeristykset alkoivat vähitellen yleistyä (kuva 3.5). Alapohjat olivat tyypillisesti täyden varaan valettuja kaksoislaattoja, joiden välissä oli lämmöneriste tai kosteuseristykseenä bitumisively. Maanvastaiten perustusten yläosassa saatettiin käyttää nk. vesitiivistä betonia, jonka suunniteltiin toimivan kapillaarisen kosteuden nousun katkaisevana kerroksena.

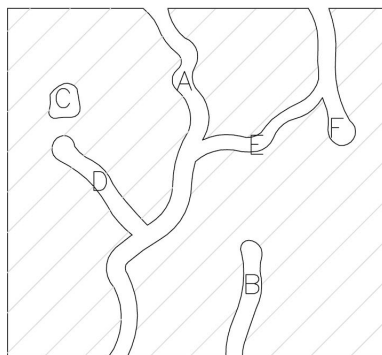
3.2.5 Kellarin lattia- ja seinärakenteet 1975-

Elementtirakentaminen oli tavallista ja kellarin seinärakenteet tehtiin enenevässä määrin betonielementeistä. Nykypäivään siirryttäessä maavastaisten rakenteiden toteutuksessa on käytössä edelleen paikallavalutekniikka, elementtirakenteet sekä molempia hyödyntävä sekatekniikka. Rakenteiden toteutus ja vedeneristystavat vaihtelevat perinteisestä bitumikermieristyksestä betonissa käytettäviin vesitiiveyttä parantaviin lisäaineisiin.

3.3 Maanvastaisten rakenteiden kosteus

3.3.1 Materiaalien huokoisuuden merkitys kosteuden siirtymisessä

Materiaalin huokoisuudella tarkoitetaan materiaalin ilmahuokosien määrää suhteessa materiaalin kokonaistilavuuteen. Kosteuden siirtymisen kannalta oleellisempaa on nk. näennäinen huokoisuus, joka kuvaa niiden ilmahuokosien määrää kokonaistilavuudesta, jotka ovat kapillaarisesti helppopääsyisiä ja voivat täytyä vedellä kapillaarisesti. Jäljelle jäävä osa huokostilasta koostuu ilmahuokosista, jotka eivät voi täytyä nesteellä ilman paineen vaikutusta. Kuvassa 3.6 on esitetty materiaalin erilaisia huokosia.



- A Läpimenevä huokonen
- B Umpihuokonen
- C Suljettu huokonen
- D Haarautuva
- E Yhdistävä
- F Pussinpohja

Kuva 3.6. Materiaalin erilaiset huokokset [18 ks. 19, s.490; 20, s.47; 21, s.12]

Kosteuden siirtymisessä rakenteen materiaalien huokosjärjestelmällä on suuri merkitys. Pitkistä, toisiinsa yhteydessä olevista huokosista koostuvissa materiaaleissa kosteus pääsee liikkumaan esteettä. Tällaista yhtenäistä huokosverkostoa kutsutaan myös kapillaariverkostoksi. Suljetut huokokset sekä umpihuokokset ovat kapillaarisen kosteuden tavoittamattomissa, mutta kosteus pääsee niihin vesihöyrynä. Weberin mukaan [19, s.480] umpihuokosissa, jotka voivat olla toisesta päästään yhteydessä kapillaarihuokosverkkoon, muodostuu kapillaarista kosteuden nousua vastustava paine, joka estää huokosta täyttymästä kokonaan vedellä.

Materiaalien huokokset voidaan jaotella niiden koon perusteella mikro-, makro-, sekä ilmahuokosiin. Makrohuokokset, joita kutsutaan myös kapillaarihuokosiksi, ovat kooltaan välillä 10^{-7} .. 10^{-4} m. Mikrohuokokset ovat kooltaan pienempiä ja niissä ei tapahdu kapillaarista kosteuden siirtymistä. Ilmahuokokset ovat kooltaan niin suuria, että niissä ei pääse muodostumaan kosteuden nousun edellyttämiä kapillaarivoimia. Näillä kapillaarisen kosteuden ulottumattomissa olevilla ilmahuokosilla on merkitystä, kun arvioidaan injektointimenetelmien toimivuutta [19, s.492]. Materiaalista voidaan mitata RH 100 %

suhteellinen kosteus, mutta siinä on edelleen vapaata ilmahuokostilaa, sillä osa huokosista on täynnä kosteaa ilmaa, ei nestemäistä vettä.

3.3.2 Maanvastaisten rakenteiden kosteustekninen toiminta

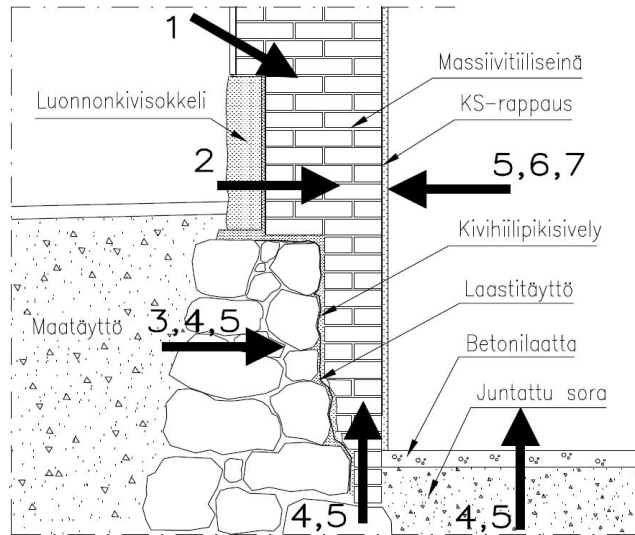
Kosteuden erilaiset siirtymistavat sekä olomuodot ovat hyvin tunnettuja ja niitä on käsitelty vuosien saatossa useissa rakennusmateriaaleja koskevissa tutkimuksissa. Kosteus kuuluu huomioida olennaisena osana maanvastaisten rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja lähtökohtaisesti kaikki maahan yhteydessä olevat rakenteet ovat kosteuden rasittamia. Maanvastaisten rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja lähtökohtaisesti kaikki maahan yhteydessä olevat rakenteet ovat kosteuden rasittamia. Maanvastaisten rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja lähtökohtaisesti kaikki maahan yhteydessä olevat rakenteet ovat kosteuden rasittamia. Maanvastaisten rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja lähtökohtaisesti kaikki maahan yhteydessä olevat rakenteet ovat kosteuden rasittamia. Maanvastaisten rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja lähtökohtaisesti kaikki maahan yhteydessä olevat rakenteet ovat kosteuden rasittamia. Maanvastaisten rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja lähtökohtaisesti kaikki maahan yhteydessä olevat rakenteet ovat kosteuden rasittamia.

Weber [22] on jaotellut kosteuden siirtymistavat seuraavasti:

- kapillaarinen kosteuden siirtyminen (paineeton)
- paineenalainen kosteuden siirtyminen (vajo-, pinta- ja kerrosvesi)
- hygroskooppinen vedenimeytyminen suolapitoisuuden avulla
- kapillaarikondensaation aiheuttama vedenimeytyminen
- kondensaation aiheuttama vedenimeytyminen (huokosvesi).

Rakenteisiin kosteus voi siirtyä nestemäisenä tai vesihöyrynä kuvan 3.7 mukaisesti. Nestemäisessä olomuodossa kosteutta siirtyy rakenteeseen perustusten kautta kapillaarisesti, rakenteen sivulta maataytön kautta paineellisena tai ei-paineellisena vetenä tai sokkelirakenteiden epätiiviyyskohdista sade- ja pintavesien imeytymisen kautta. Vesihöyrynä kosteutta voi siirtyä rakenteisiin maaperästä diffuusion vaikutuksesta sekä ympäröivästä ilmasta materiaalien hygroskooppisuuden tai kondensaation vaikutuksesta. Vesihöyrynä rakenteisiin kulkeutuva vesi varastoituu rakenteen huokossysteemiin ja voi nesteytyä kapillaarihuokosiin kapillaarikondensaation takia.

Maanvastaisten rakenteiden kosteusrasituksen määrää lisää pohjavedenpinnan nousu sadekuurojen jälkeen [23, s. 29] sekä pintavesien vajoaminen maakerroksessa, mikä etenkin roudan sulamisen aikaan voi aiheuttaa paineellista kosteusrasitusta. Perusmuurin kosteusrasitus voi olla suurta kohteissa, joissa rakennuksen vierustäyttö ei läpäise hyvin vettä tai salaojitus ei toimi kunnolla.



Veden imeytyminen nestemäisessä muodossa:

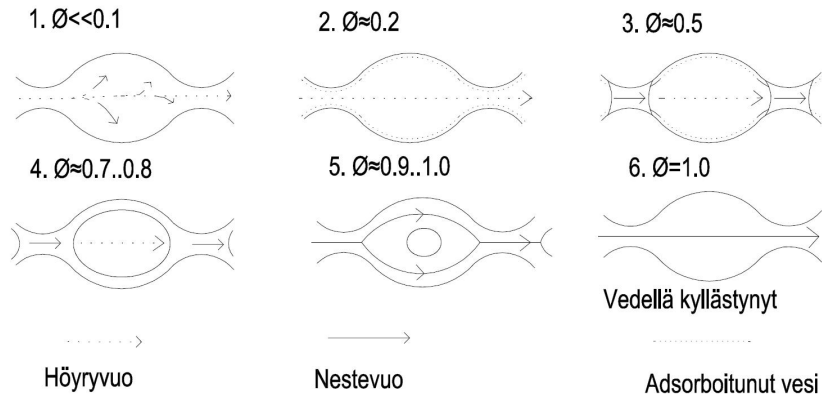
1. sadevesi
2. pintavesi, roiskevesi
3. vajovesi
4. kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Veden imeytyminen vesihöyrynä:

5. diffuusio
6. kondensaatio
7. hygroskooppinen kosteuden imeytyminen

Kuva 3.7. Rakenteiden kosteusrasitukset ja vedenimeytymismekanismit [mukaellen 22]

Rakenteissa kosteus siirtyy ensisijaisesti diffuusion tai kapillaarisen liikkeen vaikutuksella. Absetz & Viljasen mukaan niiden erottaminen käytännössä on vaikeaa [24, s. 1,5]. Aineen huokosilman kosteuspitoisuuden kasvaessa lisääntyy myös kapillaarisen kosteuden siirtymisen osuus, mikä on esitetty kuvassa 3.8. Huokosten ollessa täynnä vettä, on siirtyminen yksinomaan kapillaarista. Kapillaarisella alueella aineen kosteudenjohtavuus muuttuu kosteuspitoisuuden funktiona, mikä aiheuttaa etenevän kosteusvyöhykkeen.



Kuva 3.8. Kosteuden siirtyminen eri tavoilla suhteellisen kosteuden funktiona [25, ks. 24, s.6]

Kuvassa voidaan erottaa seuraavat kuusi vaihetta:

1. vesi liikkuu yksistään diffuusion avulla,
2. vesi liikkuu diffuusion avulla osan vedestä ollessa tiivistyneenä huokosen pintaan,
3. vesi liikkuu huokosten kapillaarikäytävissä tiivistyneenä eli kapillaarivetenä ja huokostilassa edelleen höyrynä,
4. veden tiivistyminen huokosen pintaan lisääntyy, koska kapillaarisesti liikkuvan kosteuden haihtuminen huokostilaan on hidasta ja osa kosteudesta siirtyy suoraan kapillaarikäytävästä huokosen pinnalle, huokostilassa kosteus siirtyy edelleen osittain myös diffuusion avulla,
5. vapaa huokostilavuus pienenee ja kosteus siirtyy pääasiassa kapillaarisesti, vaiheessa huokostila on täyttynyt vedellä ja kosteus siirtyy yksinomaan kapillaarisesti, kunnes huokonen on täysin täyttynyt vedellä (vaihe 6).

Ojanen et al. [26, ks. 27, s. 12] ovat esittäneet lähteeseen perustuvan vastaavan kosteuden siirtymismuotojen periaatteen. Heidän esittämäänsä kaaviossa on huomioitu huokosen seinämälle tiivistyneen veden pintadiffuusio, jossa tiivistyneen vesikerroksen pinnassa tapahtuu höyrystymistä vapaaseen huokostilaan.

3.3.3 Kosteuden siirtymistapojen vaikutus maanvastaisiin rakenteisiin

Rakenteiden kosteusrasituksiin vaikuttavat edellä esitettyjen ulkopuolisten kosteuslähteiden lisäksi ulkoilman, sisäilman ja maan lämpötila sekä kosteuspitoisuus maaperässä ja sisäilmassa. Lähes kaikissa rakenteissa ja materiaaleissa kosteutta siirtyy diffuusion ja hygroskooppisen kosteuden siirtymisen kautta, minkä takia kosteusvaurioita voi esiintyä ilman kapillaarisen kosteuden nousun vaikutusta. Seuraavassa on käyty lyhyesti läpi kosteuden kulkeutumistapojen vaikutusta maanvastaisten rakenteiden toimintaan. Tavomaisten aineen huokosrakenteesta ja kosteus- ja lämpötilaolosuhteista riippuvien siirtymistapojen ohella on käsitelty lyhyesti myös sähkökentän vaikutuksesta tapahtuvaa kosteuden siirtymistä sekä vuotovesiä.

Diffuusio

Maanvastaisten rakenteiden eri puolilla, sisäilmassa ja maaperässä, vallitsevat erilaiset lämpö- ja kosteustekniset olosuhteet. Sisäilman suhteellinen kosteus 20 °C lämpötilassa vaihtelee ulkoilman olosuhteiden mukaan tyypillisesti välillä $RH = 20..40 \%$. Sateisina päivinä sisäilman kosteus voi kohota hyvin paljon korkeammaksi. Maaperässä lämmitetyn rakennuksen ympärillä lämpötila on hiukan alhaisempi, 15..17 °C, mutta maan huokosilman kosteuspitoisuus on lähellä $RH = 100 \%$. Olosuhde-eroista johtuen rakenteen läpi syntyy diffuusiovirtaus, joka pyrkii tasoittamaan olosuhteet ja kostea ilma virtaa rakenteen läpi kuivempaan sisäilmaan. [1, s. 6].

Alapohjarakenteen tiiviit pinnoitteet mahdollistavat betonilaatan kuivumisen yksinomaan alaspäin, minkä vaikutuksesta alapuolinen maatyttö alkaa lämmetä. Lämpämissen seurauksena huokosten kyllästyskosteuspitoisuus nousee ja kosteuden diffuusiovirta pienenee ja kuivuminen hidastuu. [2, s. 14-15]

Tyypillisimmät diffuusion aiheuttamat kosteusvauriot ovat syntyneet alapohjarakenteisiin, joissa kosteutta tiivistyy tiiviin lattiapinnoitteen alle betonin yläosiin aiheuttaen lattiapinnoitteen sekä kiinnitysliiman vaurioitumista. Vastaavia vaurioita voi esiintyä maanvastaisissa seinissä, mikäli seinät on pinnoitettu vesihöyryä huonosti läpäisevillä pinnoitteilla. Alapohjien pinnoiteongelmat korostuvat kohteissa, joissa kellarin lattioissa ei ole lämmöneristystä alapohjan betonilaatan alla. Näissä rakenteissa diffuusion avulla siirtyvän kosteuden määrä on huomattavasti suurempi verrattuna polystyreenilämmöneristettyihin alapohjiin.

Hygroskooppinen kosteuden siirtyminen

Materiaalin kosteuspitoisuus riippuu sitä ympäröivän ilman kosteudesta. Mikäli rakenteen huokosten kosteuspitoisuus on alhaisempi kuin sisäilman kosteus, pyrkii hygroskooppinen materiaali imemään kosteutta ja tasapainottamaan kosteuseron diffuusion avulla. Tätä kosteudenimeytymistä kutsutaan sorptioksi. Vastaavasti jos rakennetta ympäröivä ilma on kuivempaa, pyrkii materiaali luovuttamaan kosteutta sisäilmaan (desorptio).

Hygroskooppista kosteuden siirtymistä esiintyy useimmiten sadepäivinä, jolloin korvausilmana sisätilaan tullut ulkoilma on hyvin kostea ja tavallisesti kuivan sisäilman kanssa tasapainossa oleva materiaali pyrkii tasoittamaan kosteuseron. Toisaalta talvikaudella sisäilma on hyvin kuivaa, jolloin rakenteisiin varastoitunut kosteus pääsee kuivamaan sisäilmaan.

Rakenteessa olevat suolat voivat kohottaa huomattavasti materiaalin sorptiokykyä ja edelleen rakenteen tasapainokosteutta, sillä suoloilla on kyky ottaa kosteutta suoraan sisäilmasta. Tällä on erittäin suuri merkitys erityisesti tiilirakenteiden sekä rappauksen kosteusvaurioiden etenemiselle. Kuvissa 3.9 - 3.11 on esimerkkejä alhaisen liukoisuuden omaavien hygroskooppisten suolojen aiheuttamista vaurioista tiilirakenteissa.

Vaurioiden syntymistä voidaan ehkäistä rakenteen hyvän kuivumiskyvyn ohella ilmanvaihdon tehostamisella, jolla pystytään vähentämään sisäilman kosteuden määrää sekä lisäämään rakenteen kuivumiskykyä.

Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Merkittävimpana maanvastaisten rakenteiden kosteusvaurioiden aiheuttajana on kapillaarisuuden välityksellä rakenteisiin kulkeutuva kosteus. Kapillaarisen kosteuden siirtymisen edellytyksenä on materiaalin yhtenäinen huokosverkosto, kuten edellä on esitetty. Kapillaarisen kosteuden siirtymisnopeuteen vaikuttaa aineen huokosrakenne ja –jakauma; pienihuokoisella aineella on suuri kapillaarinen imukyky, mutta pieni virtausnopeus ja suurihuokoisella aineella päinvastoin.

Etenkin tiilimuurattujen rakenteiden huokosrakenne mahdollistaa kosteuden siirtymisen sekä varastoitumisen kapillaarisesti yhtenäisen huokosverkoston takia. Kapillaarinen kosteuden siirtyminen edellyttää, että rakenne on yhteydessä suoraan tai välillisesti maataytön kautta vapaaseen vesipintaan esimerkiksi pohjaveteen, orsiveteen tai kalliion painanteeseen kerääntyneeseen veteen. Vanhat tiilet ovat usein huokosjakaumaltaan toisistaan jossain määrin poikkeavia polttoasteen ja käsityön takia, mistä johtuen niillä on eroja kosteuden siirtymisessä sekä sitomiskyvyssä. Tästä johtuen tiilien kosteuden siirtokyky ja vaurioituminen vaihtelee suuresti eri tiilien välillä, mikä on nähtävillä kuvissa 3.9 - 3.11.



Kuva 3.9. Kosteuden ja suolan rasittama, nk. tiilisyövästä vaurioitunut tiili 1890-luvun lopulla rakennetussa rakennuksessa. Tiilisyöväälle on ominaista tiilen rapautuminen saumalaastien pysyessä ehjinä.



Kuva 3.10. Kylmän, 1840-luvulla rakennetussa rakennuksessa sijaitsevan varaston seinän vanha kalkkimaalaus on kulunut pois. Seinän alaosassa tiilien pinnat ovat vaurioituneet ja varisevat jauhona alas kosteuden ja liukoisten suolojen vaikutuksesta. Ylemmänä oleva heikkolaatuinen tiili on vaurioitunut muita syvemmälle tiilisyövän vaikutuksesta.



Kuva 3.11. Tiilien erilaisista polttoasteista ja huokosrakenteesta johtuen kosteus voi ilmetä vain joissain tiilissä pintavaurioina viereisten tiilien ollessa ehjiä.

Tyypillisesti kapillaarisen kosteuden aiheuttamat vauriot ovat rakenteen alaosan kautta siirtyneen kosteuden aiheuttamia, mutta mikäli rakennuksen vierustan täyttömaana on huokosjakaumaltaan pienirakeista maa-ainesta, voi maa-ainesta siirtää kosteutta sivusuunnassa. Kosteusvaurioita voi tällöin esiintyä myös ylempänä maanvastaisessa seinässä, jos rakenteessa ei ole pystysuuntaista vedeneristystä tai se on vaurioitunut.

Maanvastaisissa rakenteissa kapillaarisen kosteuden siirtymistä estetään käyttämällä alapohjarakenteiden alla maa-ainesta, jossa ei ole hienoainesta ja maakerroksen paksuus

sekä huokosrakenne estävät kapillaarisen kosteuden nousun. Vastaavasti myös seinien vierustoilla käytetään yleensä kapillaarikatkona toimivaa maa-ainesta, joka on helposti vettä läpäisevää ja johtaa pintavedet nopeasti salaojiin.

Kondensoituminen

Yksi rakenteiden kosteustasapainoon vaikuttavista tekijöistä on sisäilman kosteuden tiivistyminen eli kondensoituminen kylmien rakenteiden pinnoille. Kondensaatiota tapahtuu, kun ilman kosteus saavuttaa kyllästyskosteuspitoisuuden. Tiivistyminen tapahtuu yleensä ilmaa kylmemmälle pinnalle, esim. kylmän seinärakenteen pinnalle tai tavallisimmin kylmälle ikkunapinnalle. Yleisimmin kondensoitumista esiintyy, kun huoneilman sisäilman lämpötila laskee tai tilassa käytetään vettä, jolloin ilman kosteuspitoisuus kasvaa. Tiivistymisessä voi syntyä nestemäistä, pinnalla valuvaa vettä mikäli pinta on tiivis. Jos kylmä pinta on vesihöyryä läpäisevä, voi tiivistymistä tapahtua materiaalin pinnan huokosissa, ilman näkyvää nestemäistä vettä.

Kondensaatiota voi tapahtua myös syvällä rakenteen sisällä, kun diffuusion avulla siirtynyt kosteus saavuttaa kondensoitumisen edellyttämän lämpötilan. Suomessa kellaritilojen osalta suurin riski kosteuden kondensoitumiselle on maanpinnan läheisyydessä olevassa seinän yläosassa, jossa ei ole lämmöneristettä.

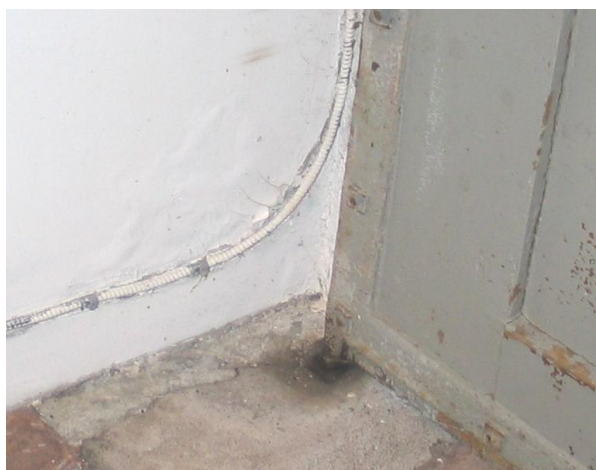


Kuva 3.12-3.13. Ruoka- ja juomavaraston ulkoseinissä on kondensoituneen kosteuden aiheuttamia kosteus- ja homevaurioita.

Kiviaineisissa rakenteissa kondensaation aiheuttamien vakavien kosteusvaurioiden määrä on vähäinen. Tyypillisenä kondensoitumisen aiheuttamien vaurioiden sijaintipaikkana ovat vanhoille rakennuksille tyypilliset vanhat ruoka- ja säilytysvarastotilat sekä lämmittämättömät kellarit. Useimmiten näiden tilojen ilmanvaihto ja lämmitys ovat puutteelliset, jolloin etenkin kesäaikaan rakenteiden pintojen lämpötilat ovat alhaiset verrattuna muihin huoneiloihin. Kun tilaa käytetään ja ovi avataan, päätyy tilaan lämmintä ja kostea ilmaa, joka voi tiivistyä rakenteiden pinnalle. Kuvissa 3.12-3.13

ruoka- ja juomavaraston seinille on muodostunut rappausvaurioita sekä homekasvustoa pinnoille kondensoituneen kosteuden vaikutuksesta.

Kondensaation aiheuttamia vaurioita voidaan joskus tavata sisäänkäyntien läheisyydessä. Mikäli ulko-ovi on epätiivis tai eteistilassa ei ole lämmitystä, voi rakenteiden pinnat etenkin oven läheisyydessä olla viileitä, jolloin sisäilman kosteus voi tiivistyä rappauksen pintaosiin. Näkyvien vaurioiden syntyminen edellyttää yleensä vaurioita rappausta suojaavassa pinnoitteessa tai runsasta sisäilman kosteutta. Kuvassa 3.14 ulko-oven sisäpielen rappaus vaurioitunut ja maalipinta hilseilee. Muualla sisäänkäynnin kohdalla kohonneita kosteuksia tai vaurioita ei ollut havaittavissa seinien alaosissa.



Kuva 3.14. Ulko-oven piilirappaukseen on syntynyt vaurioita kondensoituneen kosteuden vaikutuksesta.

Kapillaarikondensaatio

Kapillaarikondensaatio on ilmiö, jossa huokosilman kosteus tiivistyy materiaalin huokosiin huokosvedeksi ilman suhteellisesta kosteudesta riippuvan kastepistelämpötilan alittuessa. Kapillaarikondensaatiota tapahtuu yleensä kooltaan kapillaarihuokosia pienemmissä mikro- ja geelihuokosissa. Tasapainokosteuden vuoksi kapillaarikondensaatio on mahdollista ennen kyllästyskosteuden saavuttamista. Mitä pienempiä ovat materiaalin huokokset, sitä enemmän kosteutta voi tiivistyä kapillaarikondensaation vaikutuksesta. Mitä suurempia huokokset ovat, sitä suuremman kosteuspitoisuuden kapillaarikondensaation tapahtuminen edellyttää. Pienissä alle 0,5 mm:n suuruissa huokosissa vedentiivistymistä tapahtuu huokosilman suhteellisen kosteuden ollessa 75 %. [19, s.492; 20, s.60]

Osmoosi

Osa rakenteessa olevasta kosteudesta voi kulkeutua myös osmoosin vaikutuksesta, kun rakenteessa oleva veden kulkua hidastava kalvo, esimerkiksi puun soluseinä tai kivirakenteissa hiukkasten välinen pieni kosketuspinta, läpäisee vettä, mutta estää vedessä olevien suurempien molekyylien läpipääsyn. Kalvon eri puolille syntyvää paine-eroa kutsutaan osmoottiseksi paineeksi, joka aiheuttaa veden osmoottista kulkeutumista kalvon läpi paine-eron tasaamiseksi. [28, s. 7].

Elektro-osmoosi

Yhtenä kosteuden siirtymistapana on kosteuden kulkeutuminen ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta, yleisimmin tätä siirtymistapaa kutsutaan elektro-osmoosiksi, sähköosmoosiksi tai elektrolyysiksi. Elektro-osmoosin periaate on tunnettu tieteessä jo kauan. Ensimmäisenä ilmiötä tutkinut F.F. Reuss havaitsi kokeissaan 1800-luvun alkuvuosina, että vesi voitiin pakottaa liikkumaan maaperästä sähkökentän vaikutuksella märän saven läpi [20, s.181].

Elektro-osmoosi perustuu aineessa olevien hiukkasten, ionien sähköiseen varautumiseen. Rakenteessa tai maaperässä olevat suolat voivat olla ionimuodossa huokosissa olevassa vedessä. Saman sähköisen varauksen omaavien ionien jakautuessa rajapinnalle, muodostuu pinnan yli nettovaraus, sähköinen potentiaali eli zetapotentiaali. Materiaalihiukkasen pinnalle kerrostuu ioneja ja pinnan läheisyyteen kertyy vastaava määrä erimerkkisiä ioneja, jotta sähköinen neutraalius säilyy. Zetapotentiaalın varaus, positiivinen tai negatiivinen, määrää hiukkasen kulkeutumissuunnan. Elektro-osmoosi on sitä tehokkaampaa, mitä suurempi on zetapotentiaalın arvo. [28]

Suolujen ionien ympärille kerääntyy vesimolekyylejä, jolloin sähköisen kentän vaikutuksesta suolaionien liikkeessa tapahtuu myös kosteuden siirtymistä. Veteen liuenneiden suolujen anionit ja kationit liikkuvat niiden varauksen perusteella anodille tai katodille. Varauksen suuruuteen vaikuttaa myös liuoksen suolakonsentraatio sekä suolujen koostumus. [29, s.5-8] Konsentraation kasvaessa liian suureksi, lakkaa elektroosmoosin vaikutuksesta tapahtuva veden liike. Sähköisesti varautuneet hiukkaset liikkuvat edelleen anodilta katodille, kuljettaen suoloja mukanaan. Suolujen kulkeutumisen myötä konsentraatio pienenee ja veden kulkeutuminen alkaa uudelleen.

Vuotovedet

Rakenteisiin voi siirtyä kosteutta myös vesivuotokohtien kautta. Vesivuotoja esiintyy tyypillisesti rakenteiden liittymien epätiiveyskohdissa, betonirakenteiden harvavalukohdissa, työsaumoissa tai halkeamissa. Rakenteiden liittymien epätiiveyskohtia voivat olla esimerkiksi seinä- ja lattiarakenteen liittymät, pilarirakenteen ja maanvastaisen seinän liittymät sekä putki- tai kaapeliläpiviennit. Kuvassa 3.15 on pilarin ja maanvastaisen seinän liittymässä esiintynyt vesivuotokohta. Kyseisellä kohdalla on kahden eri korkoon perustetun rakennuksen rajaseinä, jossa sijaitsee ulkopuolella syöksytorvi.

Vuotovesien syynä on usein rakenteen epätiiveyskohtien lisäksi ulkopuolinen lisääntynyt kosteusrasitus, jonka syynä on esimerkiksi syöksytorven läheisyys, huono rakennuksen vierustan kallistus, rakenteeseen päin viettävä kalliopinta. Vuodon syntymisen edellytyksenä on puuttuva tai puutteellinen pystysuuntainen vedeneristys. Vanhojen massiivitiilirakenteiden pintaan sivelty vedeneristys on voinut rikkoutua kivilatomuksen liikkeiden seurauksena, minkä johdosta rakenteessa voi olla paikallisia vauriokohtia.



Kuva 3.15. 1930-luvulla rakennetun rakennuksen maanvastaisen betoniseinän ja -pilarin rajapinnassa on vesivuotokohta. Ylempänä maanvastaisessa seinässä on runsaasti heikkolaatuisen betonin läpi tulleen kosteuden aiheuttamia maalivaurioita.

Vuotoja esiintyy yleensä runsaiden sateiden jälkeen tai keväällä sulamisvesien aikana. Vuotoja voi voimistaa maatyön tiiveys tai roudan vaikutus, jolloin maanvastaiseen rakenteeseen saattaa aiheutua paineellista kosteusrasitusta. Veden imeytyminen rakenteeseen on sitä voimakkaampaa, mitä suurempi on ulkopuolinen paine [20, s.55; 23, s.29]. Pahimmassa tapauksessa paine on niin suuri, että kapillaarihuokokset täyttyvät vedellä ja syntyy aktiivinen vesivuoto rakenteen läpi.

3.4 Suolat kosteusvaurioiden ilmentäjänä

3.4.1 Yleistä

Liukoiset suolat ovat merkittävin kiviaineisten rakenteiden kosteusvaurioiden ilmentäjä sekä vaurioittaja. Suolojen rakennusta vaurioittava vaikutus perustuu hygroskooppisuuden: niiden kykyyn imeä vettä ympäröivästä ilmasta, hydratoitumiseen ja veteen liukenemiseen sekä kiteytymiseen kosteuden haihtuessa. Suolat siirtyvät maaperästä sekä rakenteen sisältä kosteusvirran mukana rakenteen kosteutta haihduttavalle pinnalle ja kiteytyvät kosteuden poistuessa rakenteen suuriin huokosiin sekä pinnalle.

Pääosin vauriot syntyvät, kun suola kiteytyessään tarvitsee suuremman tilan kuin liuenneessa olomuodossa ollessaan ja rikkoo pienempien ilmahuokosten seinämiä. Rakenteissa olevan kosteuden esiintyminen havaitaan usein vasta siinä vaiheessa, kun rakenteen pinnalle kiteytyy suolaa ja sen pinnoitteet vaurioituvat. Suolojen kiteytymisestä aiheutuvia vaurion syntytapoja on useita.

Suolojen rakenteita vaurioittava vaikutus on tiedostettu rakennushistoriassa kauan, ja jo antiikin Rooman aikaisessa kirjallisuudessa on esitetty kuinka kosteus- ja suolarasitetut muuraukset voidaan rapata [20, s. 288]. Rakenteissa esiintyvät suolat voivat olla peräisin rakennusmateriaaleista, ne voivat kulkeutua rakenteisiin kosteuden mukana tai niitä syntyy rakenteissa happojen ja emäksien neutralisaatiossa kosteuden vaikutuksesta.

3.4.2 Rakenteissa esiintyvät suolat

Mineraaliperäisissä rakennusaineissa voi olla suoloja luonnostaan tai suoloja voi kulkeutua rakenteisiin vierasaineina. Rakenteissa esiintyvien suolojen lähteitä on esitetty taulukossa 3.1. Rakenteen muuraukseen käytettyyn laastiin on voitu lisätä kipsiä kovettumisen nopeuttamiseksi sekä kutistumisen vähentämiseksi. Mikäli laastin valmistuksessa on käytetty merivettä, on rakenteeseen joutunut natriumkloridia ja magnesiumsulfaattia. Laastiin käytetty hiekka sekä tiilikivet voivat sisältää suoloja. Tiilikivissä olevaan suolamäärään vaikuttavat raaka-aine (savi), poltto-olosuhteet ja käytetty polttoaine [9; 20]. Rannikkoseudun savi sisältää yleensä suoloja sekä humusta, kun taas sisämaan savikot ovat suolattomia, mistä johtuen rannikkoseudun rakennuksissa on suurempi riski tiilessä oleviin suoloihin. von Konow'n käyttämien lähteiden mukaan tiilen polton yhteydessä tiiliin voi joutua sulfaatteja. [9, s.13].

Taulukko 3.1. Rakenteissa esiintyvien suolojen ja niiden ainesosien alkuperä.

Materiaaliperäiset suolan lähteet:	Ulkoa tulevat suolat:
Sideaine	Talvikuukausien kloridirasitus vajoveden sekä roiskeveden kautta
Merenrantahiekan käyttö laasteissa (aikaisemat vuosisadat)	Rakennuspaikan maaperän maa-alkalien kapillaarinen nousu rakenteeseen
Hydrauliset lisäaineet	Maan lannoitus (nitraatit)
Laastin sekoitusvesi	Viemäreiden vuotokohdat
Tiilien valmistukseen käytetty savi	Koirien ym. ulosteet
Luonnonkivet (hiekkakivet, liuskekivi, kalkkikivi, vulkaaninen trassi ja potsolaani (rappauslaasteissa), savesta puhdistettu kalkki	Korjaustoimenpiteet, alkalipitoiset injektointiaineet (vesilasi -> natrium- ja kaliumkarbonaatti), kipsiä sisältävästä savesta tehdyt tiilet
Kipsilaasti ja stukkolaasti	Eläinsuojat (ulosteet, keinolannoitteet, virtsa, humus)
Sementti, etenkin 1900-luvun alussa käytetty, voi sisältää poltettua tai sammutettua kalkkia	Tilojen käyttötapa, varastoidut tavarat
	Ilmansaasteet, sadeveden sisältämä rikki-dioksidi (kalsiumsulfaatin kehittyminen)

Suoloja voi siirtyä rakenteisiin myös sadeveden tai maaperän kosteuden avulla rakenteisiin imeytyvän veden välityksellä. Frössel [20, s.303]. pitää tällaista vierasaineina rakenteisiin kulkeutuvien suolojen vaikutusta ratkaisevampana verrattuna materiaalien luonnolliseen suolapitoisuuteen. Niistä erityisesti klorideilla ja sulfaateilla on rakenteita vaurioittavana tekijänä suuri merkitys. Pihojen ja katujen sulanapitoon käytetty natrium-

ja kalsiumkloridi joutuvat talvikausina roiskevetenä rakennusten sokkeleiden läheisyyteen ja imeytyvät maaperään. Muita ulkoa tulevia suolanlähteitä ovat esimerkiksi rakennusten vierustojen kasvillisuuden lannoitus sekä rakennuksen sijainti meren läheisyydessä, jolloin kostea meri-ilma voi kuljettaa suoloja rakenteisiin.

Suoloja voi syntyä rakenteisiin myös kemiallisissa reaktioissa. Rappaus- ja saumalaastien sideaineet ovat alkalisia, kun taas maaperä ja ympäristö ovat happamia, mikä aiheuttaa laastien sideaineen neutralisaatiota. Sadeveden mukana suoraan rakenteisiin sekä maahan imeytyvät ja edelleen kosteuden mukana kulkeutuvat ilmansaasteet lisäävät vierasaineiden joutumista rakenteisiin, jotka neutralisaation vaikutuksesta muodostavat erilaisia suoloja. Frössel [20] on käsitellyt suolojen syntymisprosessia hyvin laajasti tiilimuurauksien vaurioiden aiheuttajana.

Perander et al. mukaan Suomenlinnan rakennuksien rappauslaastikokeiden aikana maaperästä tutkittiin mahdollisia suolalähteitä, mutta niitä ei löydetty. Pääasiallisena suolojen lähteenä olivat ympäröivästä meri-ilmasta sekä rakennuksien käytöstä rakenteisiin siirtyneet suolat. Suomenlinnan tiilimuurauksista otettujen näytteiden perusteella rakenteesta löydettiin natrium- ja kaliumkarbonaatteja, klorideja ja nitraatteja sekä kalsiumsuoloja, kun taas sulfaattien määrä oli vähäinen. [3, s. 128-129]



Kuva 3.16.-3.17. Suomenlinnan linnoituksen luonnonkiviholvin suolakiteytymiä elokuussa 2006. Suolan määrä antaa viitteitä Suomenlinnan tiilimuurattuihin rakennuksiin kohdistuvasta suolarasituksesta.

Frössel toteaa, että vaikka tutkimukset ovat lisänneet tietoa rakennuksia vaurioittavista suoloista, on vielä monia asioita huomioimatta suolojen kulkeutumisesta rakennuksiin sekä rakenteiden vaurioitumisesta. Tähän mennessä ei ole pystytty päättämään varmaksi suolojen alkuperää. On kuitenkin todettu, että jotkut luonnonkivet sisältävät vesiliukoisia suoloja, esimerkkinä tuffikivi, jossa voi olla suolaa jopa 4 %. [20, s. 303] Yhtenä Keski-Euroopassa tavattavista suoloja rakenteisiin aiheuttavista toimista on ollut rakenteiden korjaukset, joissa rakenteisiin on injektoitu aineita, jotka kemiallisten reaktioiden avulla muodostavat kosteuden vaikutuksesta suoloja.

Tavallisimmat maaperässä ja rakenteissa esiintyvät vesiliukoiset suolat ovat kalium- ja kalsiumyhdisteitä, kuten nitraatteja, sulfaatteja, karbonaatteja sekä klorideja. Muiden suolojen, kuten nitriittien ja fosfaattien esiintyminen on poikkeuksellista. Oleellisimpia vaurioittavia suoloja ovat alkalisuolojen hapot [20, s.297]. Tyypillisimmät rakenteita vaurioittavat suolat on esitetty taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2: Tärkeimmät rakenteita vaurioittavat suolat [20, s.298; 22; 23, s.40]

	Kemiallinen nimi	Mineraalinen nimi
Sulfaattiyhdisteet		
MgSO ₄ • H ₂ O	Magnesiumsulfaatti	Kieseriitti
MgSO ₄ • 6 H ₂ O	Magnesiumsulfaatti	Heksahydriitti
MgSO ₄ • 7 H ₂ O	Magnesiumsulfaatti	Epsomiitti
CaSO ₄ • 2 H ₂ O	Kalsiumsulfaatti	Kipsi
Na ₂ SO ₄	Natriumsulfaatti	Thenardiitti
Na ₂ SO ₄ • 10 H ₂ O	Natriumsulfaatti	Mirabiitti
3 CaO • Al ₂ O ₃ • CaSO ₄ • 2 H ₂ O		Etringiitti
Nitraattiyhdisteet		
Mg(NO ₃) ₂ • 6 H ₂ O	Magnesiumnitraatti	Nitromagnesiitti
Ca(NO ₃) ₂ • 4 H ₂ O	Kalsiumnitraatti	Nitrokalsiitti
5 Ca(NO ₃) ₂ • 4 NH ₄ NO ₃ • 10 H ₂ O	Kalsiumnitraatti	Kalkkisalpietari
KNO ₃	Kaliumnitraatti	Nitrokaliitti
NaNO ₃	Natriumnitraatti	Nitronatriitti
NH ₄ NO ₃	Ammoniumnitraatti	Ammoniumsalpietari
Kloridiyhdisteet		
CaCl ₂ • 6 H ₂ O	Kalsiumkloridi	Antartisiitti
NaCl	Natriumkloridi	Keittosuola, haliitti
MgCl ₂ • 6 H ₂ O	Magnesiumkloridi	Bisofiitti
KCl	Kaliumkloridi	Sylviniitti
CaMg ₂ Cl ₆ • 12 H ₂ O	Kalsiummagnesiumkloridi	Tachyhydriitti
Karbonaattiyhdisteet		
Na ₂ CO ₃ • 10 H ₂ O	Sooda, natriumkarbonaatti	Natriitti
K ₂ CO ₃	Potaska, kaliumkarbonaatti	Kalisiniitti
CaCO ₃	Kalkki, kalsiumkarbonaatti	Kalsiitti

3.4.3 Suolojen kulkeutuminen rakenteessa

Suolapitoinen vesiliuos jakaantuu rakenteeseen kapillaarisuuden ja diffuusion välityksellä. Ensisijaisena suolojen kulkeutumistapana pidetään kapillaarisuuden välityksellä tapahtuvaa kosteuden siirtymistä [20; 22]. Siirtyminen ja sen vaikutus on Bläuer Böhmin mukaan riippuvainen rakenteen huokoisuudesta ja materiaalin rakenteesta [30, s.410]. Tiilimuuratuissa rakenteissa suolojen kulkeutuminen on hyvin tunnettua ja kulkeutumis- ja vaurioitumisprosesseja on käsitelty kirjallisuudessa. Betonirakenteissa suolavaurioiden määrä on yleensä vähäisempää, mutta kosteissa oloissa myös betonin pinnalla voi ilmetä näkyviä suolakiteytyymiä tai -vaurioita. Kuvissa 3.18 ja 3.19 on nähtävissä maalipinnoitteen epäjatkuvuuskohdista betonipinnalle kiteytyneitä suoloja.



Kuvat 3.18. ja 3.19. Betonirakenteiden pinnalle kiteytyneitä suoloja.

Vesiliukoisten suolojen pitoisuuserot aiheuttavat molekulaarista veden siirtymistä osmoottisten voimien vaikutuksesta pyrkien tasoittamaan pitoisuuksien erot [24, s.5]. von Konow'n mukaan suolakonsentraatio rakenteen pinnalla on tavallisesti huomattavasti sisäosia korkeampi, jolloin osmoottisen paineen vaikutuksesta alhaisemman konsentraation liuenneet suolat kulkeutuvat pintaa kohti [9, s.15]. Osmoosin vaikutusta kosteuden siirtymiseen on tutkittu erittäin vähän, sillä rakenteen suolajakauman määrittäminen on lähes mahdotonta suolojen ollessa liuenneessa muodossa [24, s.5].

Rakenteessa kapillaarisesti liikkuva kosteus sisältää liuenneita suoloja, jotka veden virtauksen mukana kulkeutuvat kosteuden haihtumisvyöhykkeelle seinän pinnalle. Seinärakenteen pintaosissa suolojen konsentraatio alkaa vähitellen kasvaa. Liukoisten suolojen lisäksi vyöhykkeelle siirtyy myös hygroskooppisia suoloja, jotka lisäävät rakenteen kosteusrasitusta absorboimalla kosteutta ympäröivästä ilmasta. Osa liukoisista suoloista on niin hygroskooppisia, että ne eivät kiteydy, vaan ottavat liukoisena pysymiseen tarvittavan kosteuden suoraan ilmasta ja pysyvät rakenteen huokosissa veteen liuenneina [20, s.300]. Kuvassa 3.20 on lähes 200 vuotta vanhan kylmän, maapohjaisen varaston tiiliseinä, joka on alkanut vaurioitua pinnasta kosteuden ja suolojen vaikutuksesta ilman että pinnalla on nähtävissä suolakiteytyymiä.



3.20. Kylmän varastotilan massiivitiiliseinän pinta varisee kosteuden vaurioittamana. Todennäköisesti vaurioitumisen osasyynä ovat tiilissä olevat hygroskooppiset suolat.



Kuva 3.21. Laaja-alaista rappaus- ja suolavauriota massiivitiilirakenteen sisäpinnalla.

Weber [22] toteaa, että suolojen konsentraation ja erityisesti hygroskooppisten suolojen määrän kasvaessa rakenteen pinnalla, kasvaa myös hygroskooppinen vedenimeytyminen sisäilmasta rakenteeseen. Lisääntynyt vedenimeytyminen aiheuttaa puolestaan tarpeen suuremmalle kosteuden haihtumiselle, jotta veden haihtumisen ja imeytymisen fysikaalinen tasapaino säilyy. Haihtuminen kiihdyttää suolojen kerääntymistä, mikä johtaa lisääntyneeseen hygroskooppiseen aktiivisuuteen ja edelleen seinäpinnalla olevan kosteuden haihtumisvyöhykkeen suurenemiseen. Tästä vedenhaihtumisvyöhykkeen

jatkuvasta siirtymisestä yhä ylemmäs on Weberin mukaan todisteena valokuvat tunnetuista rakennuksista vuosisadan vaihteessa ja viime vuosikymmeninä. [20, s.300; 22] Kuvissa on näkyvissä, kuinka suola- ja kosteusrasitettujen ulkoseinien kastunut ja suolavaurioitunut alue on siirtynyt yhä korkeammalle rakennuksen julkisivuissa. Frössel on esittänyt maanvastaisen seinän kosteuden siirtymistä ja vaurioitumisen etenemistä maanpäälliseen seinään kuvasarjassa [20, s.59]. Kuvasarjassa ensin kosteus tunkeutuu vähitellen maanvastaiseen seinään maataytön puolelta. Ajan kuluessa kosteuden tunkeutumasyvyys kasvaa ulottuen vähitellen koko seinärakenteen läpi sisätiloihin asti. Tässä vaiheessa kosteuden nousu rakenteessa ylöspäin alkaa kiihtyä ja vähitellen kosteus nousee yhä ylemmäs maanpäällä olevassa seinärakenteessa.

Suoloja voidaan jaotella niiden liukoisuuksien perusteella taulukon 3.3 mukaisesti. Yksittäisen suolan liukoisuus vaihtelee lämpötilasta riippuen, jolloin rakenteiden suolavaurioiden syntyyn vaikuttaa rakenteen ja sisäilman lämpötilat. Suoloja voidaan jaotella myös niiden hygroskooppisuuden perusteella sen tasapainokosteuden mukaan, mikä määrää suolojen kosteuden imeytymisen ja kiteytymisen rajan. Osa suoloista on veteen liukenemattomia tai niiden liukeneminen on hyvin vähäistä. Yhdisteinä esiintyvien suolojen hygroskooppinen tasapainokosteus voi olla huomattavan alhainen verrattuna niiden omiin tasapainokosteuksiin.

Taulukko 3.3. Suolojen liukoisuudet veteen sekä eräiden suolojen hygroskooppiset tasapainokosteudet [20, s.65,299; 23, s.41]

		g suola / 100 ml vettä		hygroskooppisuus
		kylmä	lämmin	20 °C
Karbonaattiyhdisteet				
CaCO ₃	Kalsiumkarbonaatti, kalkki	0,0015	0,00019	/
K ₂ CO ₃	Kaliumkarbonaatti, potaska	112	156	-
K ₂ CO ₃ • 2 H ₂ O	Kaliumkarbonaatti	147	331	-
2 K ₂ CO ₃ • 3 H ₂ O	Kaliumkarbonaatti	129	268	-
KH CO ₃	Kaliumkarbonaatti	-	-	43 %
Na ₂ CO ₃ • H ₂ O	Natriumkarbonaatti, sooda	21	420	92 %
Na ₂ CO ₃ • 10 H ₂ O	Natriumkarbonaatti	-	-	87%
Kloridiyhdisteet				
NaCl	Natriumkloridi	36	39	75 %
CaCl ₂	Kalsiumkloridi	75	159	29 %
CaF ₂	Kalsiumfluoridi	0,002	0,002	-
MgCl ₂ • 6 H ₂ O	Magnesiumkloridi	167	367	33 %
PbCl	Lyijykloridi	1	3	
CaMg ₂ Cl ₆ • 12 H ₂ O	Ca-Mg-kloridi	-	-	29 %

Nitraattiyhdisteet				
Ca(NO ₃) ₂ • 4 H ₂ O	Kalsiumnitraatti	-	-	50 %
5 Ca(NO ₃) ₂ • 4 NH ₄ NO ₃ • 10 H ₂ O	Kalsiumnitraatti	266	600/660	-
Ca(NO ₃) ₂	Kalsiumnitraatti	121	376	-
Mg(NO ₃) ₂ • 6 H ₂ O	Magnesiumnitraatti	125	-	53 %
Sulfaattiyhdisteet				
CaSO ₄ • 2 H ₂ O	Kipsi, kalsiumsulfaatti	0,24	0,22	/
MgSO ₄ • H ₂ O	Magnesiumsulfaatti	71	91	+
Na ₂ SO ₄ • 10 H ₂ O	Natriumsulfaatti	11	92	87 %
BaSO ₄	Bariumsulfidi	0,0002	0,0004	-
PbSO ₄	Lyijysulfidi	0,004	0,005	-
Muut				
NaF	Natriumfluoridi	4	-	-
		- ei tiedossa		
		+ tuskin hygroskooppinen		
		/ ei hygroskooppinen		

Suolan hygroskooppisuudella on merkitystä suolojen kiteytymisjärjestyksen muotoutumiseen rakenteeseen. Liukoisuusrajan ylittyessä alkavat suolat kiteytyä niiden liukoisuuden mukaisilla kosteusalueilla. Alhaisen liukoisuuden suolat kiteytyvät seinän alaosaan, kun taas helposti liukenevat suolat kiteytyvät liukoisuuden mukaisesti niiden yläpuolelle. Seinän alaosaan kiteytyneet suolat ovat taulukon 3.3 mukaisesti magnesium- ja kalsiumkarbonaatteja sekä kaliumsulfaattia. Ylimmäksi kiteytyvät suolat ovat nitraatteja ja klorideja, jotka ilmaisevat rakenteen kosteimman alueen. Näiden suolojen välialueella ovat suurimpia vaurioita aiheuttavat magnesium- ja natriumsulfaatit sekä poikkeustapauksina esiintyvää kaliumnitraattia. [20, s.297].

3.4.4 Kosteusvaurioiden synty

Kosteuden vaikutukset rakenteissa

Kiviaineisten rakenteiden kosteus- ja suolavauriot ovat usein yhtä aikaisia ja riippuvaisia toisistaan. Ilman kosteutta ei suolojen aiheuttamia vaurioita rakenteisiin voi syntyä. Weber ja Frössel toteavatkin, että kumpikaan niistä ei yksinään sopivissa oloissa vaurioita rakenteita, mutta yhteistoiminnan kautta niistä tulee vaara rakenteille. [20; 22] Kosteus toimii rakenteita vaurioittavien aineiden ja tapahtumien välittäjäaineena, jonka välityksellä vaurioita syntyy suolan kiteytyessä, orgaanisen aineen mikrobivaurioituessa tai rakenteen pakkasvaurioituessa kosteuden vaikutuksesta. Erilaisia kosteuden ja veden

aiheuttamia fysikaalisia, kemiallisia sekä biologisia vaikutuksia materiaaleihin on listattu taulukkoon 3.4.

Taulukko 3.4. Veden aiheuttamien materiaalivaurioiden luokittelu [20, tab.3.2]

Fysikaaliset	Kemialliset	Biologiset
Kosteus-, lämpö- ja staattiset vaikutukset	Sidosainereaktiot, haitta-ainekuormitus, suolavauriot	Eloperäiset vaikutukset
<ul style="list-style-type: none"> • perustusten liikkeet • pakkasrapautuminen • lämpötilanvaihtelut • lämpöhäviöt • laajenemis- ja kutistumishalkeamat • materiaalimuutokset • seinän läpikostuminen 	<ul style="list-style-type: none"> • suolojen kiteytyminen • kulkeutumislmiö • pakkas-suolarapautuminen • saumamuutokset • sideaineen muutokset • kalkin huuhtoutuminen • ruostepilkut • kemiallinen korrosio 	<ul style="list-style-type: none"> • mikro-organismit • levänkasvu • sammalen kasvu • jäkälän kasvu • torjunta-aineiden lisääntyminen • sienisairaudet • homeenkasvu • likaantuminen

Kiviaineisten maanvastaisten rakenteiden kannalta oleelliset veden ja kosteuden aiheuttamat materiaalivauriot ovat fysikaalisia sekä kemiallisia vaurioita. Rakenteen kastuminen aiheuttaa rakenteen lämpötilan alenemista, heikentää rappausten lujuutta sekä voi aiheuttaa pakkasrapautumista. Kapillaarinen vesi kuljettaa suoloja, jotka aiheuttavat sideaineen muutoksia ja kiteytyessään suolat rikkovat tiilien ja rappauksen pinnan huokosia.

Pakkasrapautumisessa kostean rakenteen pintaosa jäätyy, ja jäätyneen edessä syvemmälle rakenteeseen, estää syntyneen jääkerros taustalta tulevan kosteuden laajenemisen [3, s. 76], jolloin syntyneen paine rikkoo rakenteen huokosrakenteen ja tiilien pintaosa irtoaa levyinä. Vastaavasti myös melko tiiviissä, kastuneessa rappauksessa pakkanen voi aiheuttaa samankaltaista vaurioitumista ja rappauksen huokosrakenteen rikkoutua tai rappauskerros irtoaa alustasta.

Kosteuden merkitys rakennuksen lämmitystarpeeseen on merkittävä, sillä massiivitiiliseinän lämmöneristävyyden laskee 50 % verrattuna kuivaan rakenteeseen, jos rakenteen läpikostumisaste on 4-painoprosenttia [20, s.36]. Alentunut lämmöneristävyyden lisää kondensoitumisriskiä ja edelleen kondensoituneen veden aiheuttamia kosteus- sekä pakkasvaurioita

Biologisten vaurioiden osalta haittaa syntyy etenkin silloin, jos maanvastaisten rakenteissa on käytetty mikrobikasvulle alttiita materiaaleja esimerkiksi sisäverhouksena tai tiloihin varastoidut tavarat vaurioituvat rakenteen kosteuden vaikutuksesta. Kosteuden vaikutuksia voidaan käsitellä myös tilojen käyttäjän näkökannalta taulukon 3.5 mukaisesti. Haittavaikutuksissa on huomioitu rakenteellisten vaikutusten lisäksi sisäilma-, esteettisyys- ja mukavuusnäkökohdat.

Taulukko 3.5. Veden / kosteuden vaikutukset rakennuksessa [20, tab.3.3]

Fysikaaliset ominaisuudet	Kemialliset ominaisuudet	Materiaali-ominaisuudet	Ilmastolliset vaatimukset	Biologiset / hygieeniset vaatimukset	Esteettisyys
lämmöneristys	suolakonsentraatio	korroosio	mukavuus	sienisairaus	maalattujen seinien ja kattojen laatu
ääneneristys	hygroskooppisuus	laajenemis- ja kutistumisprosessi	terveellisyys	homeenkasvu	rappausvauriot
kemiallinen gradientti	lujuuden heikentyminen	hajuhaista	mikro-organismit	maalivauriot	
kiteytymät	kuluminen / tuhoutuminen	laakerivaatimus	lahoamisprosessi	suolakiteytymät hyvinvointi / tunkkaisuus	kosteusläiskät

Tärkeimmät kosteuden ja suolojen aiheuttamat tiilimuurattujen rakenteiden vauriot voidaan listata seuraavasti [22] koskien pääasiassa maanpinnan yläpuolisia rakenteita:

- pakkasvauriot/pakkasrapautuminen
- vedenimeytymisen aiheuttama lämmönjohtavuuden alentuminen ja sitä kautta lisääntynyt kosteuden kondensoitumisen vaara
- pinnan kuoriutuminen (pintarapautuminen) kosteuden takia ja rakennusaineen ulkopinnan käyristyminen
- suolankiteytymisen aiheuttamat vauriot
- suolojen hydratoitumisen aiheuttamat vauriot
- suolaisen veden jäätyislämpötilan alenemisen kautta syntyneet pakkasvauriot (pakkas-suolarapautuminen)
- tasapainokosteuden kohoaminen hygroskooppisuuden vaikutuksesta
- sideainemuutokset ja edelleen käynnistynyt suolankehitys happamien pakokaasujen vaikutuksesta hapoille alttiisiin sideaineisiin, esimerkiksi SO_2 ja SO_3 , vaikutukset kalkkiin, ja siihen yhdistynyt kiihtyvä sulfaatinkehitys
- mikro-organismien aiheuttamat vauriot, joita esiintyy paljon läpikostuneiden rakennusaineiden pinnoilla.

Suolojen kiteytymisen vaurioprosessit

Suolojen ja kosteuden huokoisissa materiaaleissa aiheuttamien vaurioiden syntymisestä on vuosien saatossa ollut useita teorioita. Frössel'n [20, s.69] mukaan suolojen kiteytyminen aiheuttaa paineen kasvua materiaalin huokosissa ja paineen syntyvät voidaan jaotella seuraavasti:

- hydrostaattinen kiteytymispaine tai ylikylläisen liuoksen kiteytymispaine
- lineaarisen kasvun aiheuttama paine
- hydraation aiheuttama paine.

Fröselin mukaan kirjallisuudessa on usein esitetty epäselvästi lineaarisen kasvun paineen ja kiteytymispaineen välinen ero. Linearisella kasvulla tarkoitetaan suolojen

kiteiden kasvua tiettyyn suuntaan. Kun lineaarisesti kasvava kide saavuttaa huokosen seinämän tai toisen kiteen, eikä vapaata kasvutilaa ole kyseisessä suunnassa, syntyy huokosen seinämään kiteen kasvaessa painetta, joka voi rikkoa huokosseinämän. Lineaarista kasvua tapahtuu erityisesti palkin, prisman tai neulanmuotoiseksi kiteytyvillä suoloilla.

Kiteytymispainetta syntyy, kun kapillaari- ja ilmahuokosissa olevan ylikylläisen liuoksen suolat kiteytyvät ja niiden tilavuus kasvaa. Mikäli syntynyttä painetta ei voida vähentää tai jakaa materiaalissa, kasvaa kiteytymispaineen suuruus ja aiheuttaa rakenteen huokosrakenteen rikkoutumista.

Kiteytymispaineen suuruuteen vaikuttaa materiaalin huokosrakenne: pienimmissä huokosissa on suurempi kemiallinen potentiaali kiteiden syntymiselle kuin suuremmissa huokosissa, mistä johtuen pienistä huokosista koostuvilla materiaaleilla on suurempi riski vaurioitumiselle. Kiteytymispaine voi ylittää moninkertaisesti materiaalin lujuuden ja vaurioiden syntymistä edesauttaa useimmiten kuivumisen ja liukenemisen vuorottelun aiheuttama paineen vaihtelu huokosissa. Taulukossa 3.6 on esitetty ylikylläisten suolaliuosten kiteytymispaineita kahdessa lämpötilassa. Kiteytymispaine kasvaa eksponentiaalisesti liuoksen ylikylläisyyden suurentuessa.

Taulukko 3.6. Rakenteita vaurioittavien suolojen ylikylläisten liuosten kiteytymispaineet [20, tab.3.11]

Suola	Moolitilavuus	Kiteytymispaine N/mm ²			
		C/CS* = 2		C/CS* = 10	
		0°C	50°C	0°C	50°C
CaSO ₄ · 1/2 H ₂ O	46	33,5	39,8	112,0	132,5
CaSO ₄ · 2 H ₂ O	55	28,2	33,4	93,8	111,0
MgSO ₄ · 7 H ₂ O	147	10,5	12,5	35,0	41,5
MgSO ₄ · 6 H ₂ O	130	11,8	14,1	39,5	49,5
MgSO ₄ · 1 H ₂ O	57	27,2	32,4	91,0	107,9
Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O	220	7,2	8,3	23,4	27,7
Na ₂ SO ₄	53	29,2	34,5	97,0	115,0
NaCl	28	55,4	65,4	184,5	219,0
Na ₂ CO ₃ · 10 H ₂ O	199	7,8	9,2	25,9	30,8
Na ₂ CO ₃ · 7 H ₂ O	154	10,0	11,9	33,4	36,5
Na ₂ CO ₃ · 1 H ₂ O	55	28,0	33,3	93,5	110,9
* Liuoksen ylikylläisyysaste					

Hydrostaattista kiteytymispainetta syntyy, kun huokonen on täynnä ylikylläistä liuosta. Jos syntyvät kiteet sulkevat huokoseen johtavat tiehyet, voi huokoseen syntyä kiteytymisen jatkuessa joka suuntaan vaikuttava hydrostaattinen kiteytymispaine.

Viimeisenä, samantapaisena vaurioreaktiona on useille suoloille ominainen kyky hydratoitumiseen. Hydratoituvat suolat pystyvät tietyssä lämpötilassa sitomaan vettä suolakiteeseen niin sanotuksi hydraatti- eli kidevedeksi. Lämpötilan noustessa tämä kidevesi haihtuu suolakiteestä ja alhaisemmissa lämpötiloissa kiteeseen sitoutuu kidevettä. Suolan tilavuus kasvaa veden sitoutuessa kiteeseen, minkä seurauksena muodostuu painetta, jota nimitetään hydraatiopaineeksi. [20, s.70; 22]

Suolojen ja kosteuden huokosiin materiaaleihin aiheuttamien vaurioiden syntymisestä on ollut useita teorioita, mukaan lukien edellä esitetyt suolojen kiteytymisen yhteydessä muodostuvaan paineeseen perustuvat vaurioprosessit. Frössel toteaa, että suolojen syntymistä ja niiden rakenteita vaurioittavaa vaikutusta ei vielä tunneta tarkasti. Erilaiset vaurioitumisteoriat ja niistä tehdyt tutkimukset ovat herättäneet paljon keskustelua. Yksimielisyys vallitsee siitä, että kosteuspiitoisuuden vaihtelu on merkittävä tekijä vaurioiden syntymisessä. Suomenlinnassa tehdyssä tutkimuksessa tehdyt havainnot vahvistavat nopean sisäilman kosteuspiitoisuuden vaihtelun suuren merkityksen tiilirakenteiden vaurioitumiseen [11].

Charola ja Pühringer [31] ovat käyneet läpi tärkeimmät aiheesta tehdyt tutkimustulokset, ja tiivistäneet tämänhetkisen tutkimustiedon valossa osan esitetyistä teorioista olevan virheellisiä ja osan olevan mahdollisia. Esimerkiksi hydraation vaikutuksesta syntyvä tilavuuden kasvu ei ole yksinään riittävän suuri muodostamaan huokosrakennetta rikkovaa painetta. Tutkimuksissa on pystytty osoittamaan, että suolat, jotka pystyvät muodostamaan toisen kiinteän muodon, kuten hydraatin, ovat vaurioittavampia, mutta syy tähän on vielä varmuudella selvittämättä. Hydrostaattisen kiteytymispaineen vaurioittavaa vaikutusta pidetään mahdollisena, sillä ylikylläisen liuoksen tilavuus on pienempi kuin siitä kiteytymisen kautta muodostuneiden suolakiteiden ja kylläisen liuoksen tilavuudet yhteensä.

Viimeisimpien tutkimusten perusteella on esitetty teoria, jonka mukaan vaurioitumisen syynä ovat ohuena kerroksena huokosen pinnalle muodostuvien pienikokoisten kryptokiteiden huokosen seinään aiheuttamat leikkausjännitykset. Kryptokiteet ovat niin pieniä kiteitä, että niitä ei pystytä havaitsemaan tavallisilla mikroskoopeilla vaan havainnointiin tarvitaan polarisoiva mikroskooppi. Kryptokiteitä voi muodostua, jos kuivan ja kostean olosuhteen vaihtelu on nopeaa, jolloin tavallisia suuria suolakiteitä ei ehdi muodostumaan. Kryptokiteiden muodostamalla kerroksella on suuri yhteinen pinta-ala, mutta kiteiden pienestä koosta johtuen niiden kosteuden absorboiminen ja liukeneminen tapahtuu huomattavasti nopeammin kuin suurilla suolakiteillä. Vastaavasti nopean liukenemisen kautta voi huokosiin muodostua ylikylläisiä liuoksia. Kryptokiteiden olosuhdemuutosten takia myös niiden tilavuuden muutokset ovat vastaavasti nopeita. Tilavuuden muutosten kautta huokosen seinään kohdistuu leikkausjännitystä, joka aiheuttaa vaurioita etenkin silloin, jos huokosen seinämä on vain osittain peittynyt kryptokiteillä. [31]

Edellä esitetyn perusteella viimeisimmät tutkimukset ovat tarkentaneet vuosien saatossa esitetyt suolojen kiteytymisen aiheuttamat vaurioprosessit peruslähtökohdiltaan oikeiksi, mutta tarkentaneet vaurioiden syntymisen aiheutumista olosuhteiden ja suolo-

jen kiteytymistapojen osalta. Edelleenkin tarvitaan lisätutkimusta, jotta voidaan varmistua vaurioitumisprosessien tarkasta tapahtumisesta.

Betonirakenteiden vaurioituminen

Maanvastaiset betonirakenteet altistuvat maaperän veden ja vesiliukoisten aineiden aiheuttamille fysikaalisille ja kemiallisille vaikutuksille. Betoni rapautuu happojen vaikutuksesta, sillä useimpien happojen ja sementin kovettumistuotteiden reaktiossa muodostuu vesiliukoisia suoloja, jotka kuluttavat sementtikiveä. [32, s.5] Alkaliensa osalta ainoastaan voimakkaat alkalit voivat vaurioittaa betonia, joka on itse alkaalinen materiaali.

Yhtenä betonirakenteisiin vaurioita aiheuttavana prosessina on pitkälle kehittyneen karbonatisoitumisen seurauksena mahdollistuva terästen korroosio. Korroosion vaikutuksesta betonipinta voi vaurioitua terästen kohdalta korroosiotuotteiden aiheuttaman tilavuuden kasvun takia. Maanvastaisten betonirakenteiden sisäpinnoilla näkyvät korroosiovauriot ovat melko harvinaisia ja edellyttävät pitkäaikaista altistusta kosteudelle sekä ohutta peitepaksuutta.

Betoni voi nostaa kapillaarista kosteutta niin lattia- kuin seinärakenteissa. Betonissa olevien kapillaarihuokosten määrä voi olla jopa 40 % betonin tilavuudesta [32, s.7]. Betonin huokoisuuteen, ja sitä kautta tiiveyteen, voidaan vaikuttaa valmistusvaiheessa vesi-sementtisuhteen, sementin määrän, runkoaineen raekokojakauman sekä lisäainesten avulla. Huokoisena materiaalina betoni läpäisee kosteutta suhteellisen helposti diffuusion vaikutuksesta.

Kosteuden kulkeutumisen myötä betonissa voi siirtyä myös suoloja rakenteen haihduttavalla pinnalle. Suolavaurion synty tapa on betonirakenteissa yhtenevä tiilirakenteissa esiintyvillä vaurioilla. Tiiviimpänä ja lujempaan materiaalina betonirakenteiden suolavauriot poikkeavat verrattuna rappauksissa esiintyviin vaurioihin. Kosteuden vaikutuksesta betonin pinnalle kulkeutuva suola pystyy yleensä vaurioittamaan vain betonin pintaosaa, kun taas rappauskerros voi vaurioitua lähes täysin. Betonin maalipinnoite voi hilseillä jo vähäisenkin suolamäärän vaikutuksesta, sillä betonilla ei ole vastaava suolakiteitä vastaanottavaa huokostilaa kuin rappauksella. Rapatuilla betonipinnoilla vauriot voivat olla huomattavasti laajempia. Kuvassa 3.21 on maanvastaisen heikkolujuuksisen betoniseinän maalipinnan vaurioita.



Kuva 3.22. Tyypillistä maanvastaisen betoniseinän sisäpinnalla esiintyvää maalin hilselyä kosteuden vaikutuksesta. Seinän betoni oli hyvin heikkolujuuksista ja vettä läpäisevää. Pilarin ja seinän liittymärakenteissa esiintyy jopa vesivuotoa.

Joissain betonirakenteissa esiintyy kosteuden ja pahimmassa tapauksessa veden läpikulkeutumista, johon voi olla useita syitä. Betonirakenteisiin voi syntyä valun jälkeen kuivumisen yhteydessä sekä myöhemmin hydrataation seurauksena halkeamia, jotka voivat toimivat yhtenä reittinä veden kulkeutumiselle. Vanhat betonirakenteet voivat olla paikoin lujuudeltaan hyvin heikkoja betonimassassa käytetyn vähäisen sementtimäärän takia, mistä johtuen betonille tavanomainen tiivis huokosrakenne ei pääse syntymään. Betonissa voi olla myös muita epätiiviyiskohtia, kuten vuotoja läpivienneissä tai työsaumoissa.

3.5 Tyypillisiä kosteuden ja suolojen aiheuttamia vaurioita

Kiviaineisissa rakenteissa kosteus ja suolat ilmenevät tyypillisesti maali- ja rappauspinnan vaurioina sekä pinnoille kerääntyvänä suolana. Usein puhutaan myös kalkin härmistymisestä rakenteen pinnalle. Rapatuilla tiilipinnoilla suolojen kiteytyminen voi aiheuttaa pinnan vaurioiden lisäksi rappauksen irtoamista alustasta sekä rappauksen rapautumista (kuva 3.23-3.24). Mikäli seinärappauksen tartunta alustaan on ollut huono, ja rappaus on irti alustastaan, voi suolan kiteytyminen tapahtua rappauksen takana.



Kuva 3.23. Maalipinnan alle kiteytynyttä suolaa.



Kuva 3.24. Pitkälle kehittyneitä rappauksen rapautumista kosteuden ja suolojen vaikutuksesta.

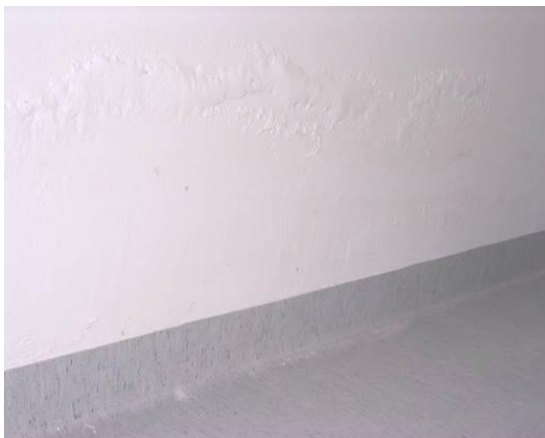
Puhtaaksi muuratuilla tai maalatuilla tiilipinnoilla suolat kiteytyvät etenkin laastisaumojen kohdalle, minkä lisäksi voi ilmetä maalipinnan hilseilyä. Betonirakenteissa tyypillisiä vaurioita ovat tasoite- ja rappauskerrosten irtoamiset, maalipinnan vauriot (kuva 3.22) sekä tapettien homevauriot. Epähomogeenisessa betonirakenteessa voi esiintyä nestemäisen veden kulkeutumista rakenteen läpi etenkin paineellisen veden vaikutuksesta.



Kuva 3.25. Seinän alaosan tapetit ovat homehtuneet jalkalistan yläpuolelta alla olevan tiilirakenteen kosteuden vaikutuksesta. Näkyvää hometta löytyi myös tapettien alta rappauksen pinnasta.



Kuva 3.26. Kosteusongelmaisen tilan lattiaan on asennettu laminaattipäällyste ja rapattuihin massiivitiiliseiniin maalatut lasikuitutapetit. Puisen jalkalistan kosteus on noin 18-painoprosenttia, lasikuitupinnoitteen alla oli havaittavissa alkavia rappausvaurioita ja jalkalistan päällä vihertävää hometta.



Kuva 3.27.- 3.28. Kosteuden mukanaan kuljettamat suolat kiteytyvät kosteuden haihtuessa. Seinissä on havaittavissa yhtenäisen haihtumisrintaman kohdalle syntynyt 1.suolakiteytymälinja. Linjan sijainti vaihtelee pääasiassa rakenteen kosteusrasituksen, kuivumiskyvyn ja suolojen koostumuksen mukaan.



Kuva 3.29.- 3.30. Betoniseinän alaosaan on kiteytynyt suolaa alapohjan betonilaatan pinnoitteen ylösnoston yläpuolelle. Lattiapinnoitteena on tiivis epoksinnoite.

Alapohjarakenteissa kosteus voi aiheuttaa mattopinnoitteiden alle mikrobikasvua. Kosteus ilmenee usein mattopinnoitteen tai vinyylilaattojen irtoamisena alustastaan (kuva 3.31). Tällöin on yleensä kyseessä pinnoitteen kiinnitysliiman vaurioituminen kosteuden vaikutuksesta ja liimassa olevien orgaanisten ainesosien mikrobivaurioituminen. Ongelma korostuu kohteissa, joissa on käytetty julkisiin tiloihin tarkoitettuja tiiviitä ja kulutusta kestäviä lattiapinnoitteita.



Kuva 3.31. Lattiapinnoite on noussut laajoilta alueilta koholle maanvastaisessa alapohjassa.

Linoleumpinnoitteet ovat yleensä läpäisevyydeltään muovimattoja paremmin vesihöyryä läpäiseviä, mutta niiden riskitekijänä on niiden herkkyys vaurioitumiselle. Mikäli linoleumpinnoite altistuu suurelle kosteudelle, on vaarana maton vaurioitumisprosessin käynnistyminen, joka jatkuu, vaikka varsinainen kosteuslähde saataisiin poistettua mattoa poistamatta. Hyvän läpäisevyyden takia on mahdollista, että maton vaurioitumisesta kertovaa pinnoitteen kohoamista ei tapahdu, mutta matto vaurioituu alustan kosteuden vaikutuksesta. Vaurioitumisprosessissa matosta emittoituu sisäilman laatua heikentäviä yhdisteitä, jotka voivat aiheuttaa tilojen käyttäjissä sisäilmaperäistä oireilua.

Alapohjan kosteus voi korostua seinä- ja lattiarakenteen rajapinnassa, missä on haihtumisen kannalta vähiten vesihöyrynvastusta. Yleensä ongelma korostuu rakenteissa, joissa alapohjan betonilaatta on valuerotuskaistan sekä kutistumisen takia irti seinärakenteesta ja syntynyttä rakoa ei ole erikseen tiivistetty. Tilojen alipaineisuuden takia raosta virtaa kosteaa ja usein mikrobeja sisältävää korvausilmaa maapohjasta sisätiloihin. Toinen seinän ja lattian rajan tyypillisimmistä vaurioiden aiheuttajista on kosteuden siirtyminen kantavasta seinärakenteesta alapohjarakenteeseen. Vauriota voi esiintyä, jos lattiabetonia ei ole erotettu irrotuskaistalla seinärakenteesta, erotuskaistana on kosteutta siirtävää materiaalia tai puuaineinen lattian pintarakenne on asennettu kiinni seinään.

Usein kohonnutta seinien sekä alapohjarakenteiden kosteutta ei huomata ajoissa, vaan kosteus on jo aiheuttanut puisten jalkalistojen taustapinnoille mikrobikasvua tai muovisten seinäpintaan liimattujen jalkalistojen sekä lattiamattojen kiinnitysliiman vaurioitumista (kuva 3.32).



Kuva 3.32. Maanvastaiseen betoniseinään asennetun muovisen jalkalistan taustapinnan kiinnitysliima on mikrobivaurioitunut rakenteessa olevan kosteuden vaikutuksesta.

Yleisesti tavataan myös kiintokalusteiden taustapintojen vaurioitumista seinärakenteen kosteuden vaikutuksesta. Toisena tyypillisenä vauriona on maanvastaisten seinien sisäpinnalle asennettujen verhouksien vaurioituminen (kuva 3.33). Mikäli seinän alaosan vauriot piilotetaan esimerkiksi seinän alaosaan asennettavan rakennuslevyn tai kosteutta läpäisemättömän muovipinnoitetun tai metallilevyn taakse, on seurauksena kosteuden haihtumisrintaman kohoaminen korkeammalle levyn yläpuolelle kohtaan missä kosteuden haihtuminen voi tapahtua esteettä. Seurauksena on kosteusvaurioiden uusiutuminen (kuva 3.34). Yhtenä ongelmakohtana on massiivitiilirakenteisiin kohteisiin tehdyt märkätilat, missä vedeneriste hidastaa suuresti seinään nousevan kosteuden haihtumista kylpyhuoneen puolelle. Tällöin kuivatus- sekä haihdutustarve väliseinän toisella puolella tai ulkoseinällä kylpyhuoneen viereisessä tilassa on muita tiloja suurempi. Kuvassa 3.35 on esimerkki kylpyhuoneesta, jossa massiivitiiliseinien alaosaan kiteytyneet suolat ovat irrottaneet muovitapettien alaosat.



Kuva 3.33. Väliseinän päälle on asennettu huokoinen kuitulevy ja paikoin myös kovalevyä. Irrotetun kovalevyn takana rappaukset ovat kosteita ja vanhat tapetit sekä rappauksen pinta ovat homehtuneet. Vauriot jatkuvat myös kuitulevytyksen takana.



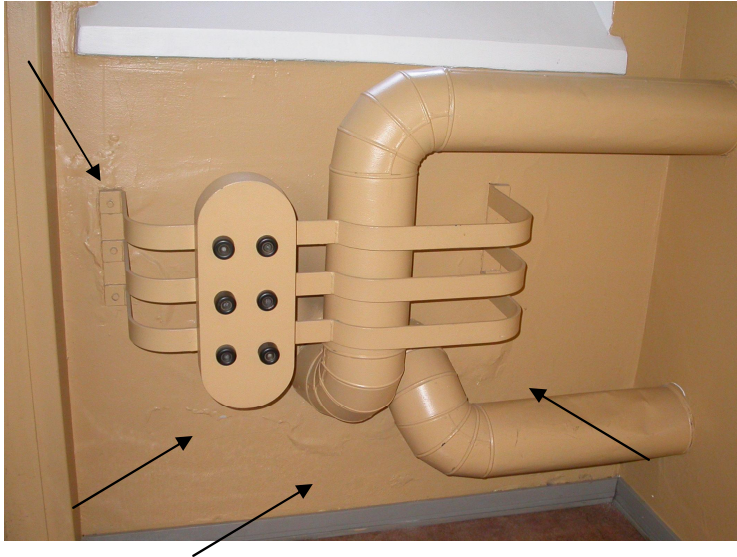
Kuvat 3.34. Tiilimuuratun seinän alaosaan on asennettu rakennuslevy, jolla on pyritty piilottamaan kosteuden aiheuttamat pinnoitevauriot. Kosteuden haihtumisrintama on noussut levyn yläpuolelle ja vauriot ovat uusiutuneet.



Kuvat 3.35. Kylpyhuone, jossa massiivitiiliseiniin pintaan on asennettu muovitapetit. Tapettien saumat ja alaosat ovat irtoilleet, kun saumojen kautta haihtuneen kosteuden kuljettamat suolat ovat kiteytyneet rappaukseen.



Kuva 3.36. Maanvastaisessa seinässä sijaitseva epätiivis putkiläpivienni on aiheuttanut ympärillä olevan rappauksen kastumisen.



Kuva 3.37. Maanvastaisessa seinässä sijaitsevan putkiläpiviennin kautta seinään siirtynyt kosteus on vaurioittanut seinän rappaukset, mikä ilmenee maalin pullistumina nuolella merkityissä kohdissa. Vaurion edetessä maalipinta rikkoutuu.

Paikallisia kosteusvaurioita voi syntyä epätiivien putki- ja kaapeliläpivientien kohdalle, kuten on nähtävissä kuvissa 3.36 sekä 3.37. Maanvastaisten rakenteiden kosteusongelmia voi ilmetä myös eri tasoissa sijaitsevien tilojen rajapinnoilla. Kuvissa 3.38- 3.41 on esimerkkejä eri tasoissa olevien lattiapintojen kohdalla ilmenneitä kosteusvaurioita. Kosteusvaurion syynä on tavallisesti ylemmän lattiapinnan tasossa oleva kapillaarikatko, jolloin sen alapuolisella osalla on etenkin tiilirakenteissa runsas kosteusrasitus.



Kuva 3.38- 3.39. Muuta lattiapintaa noin 40 cm alemmalla tasolla sijaitsevan varaston väliseinän alaosassa on suolakiteytymävyöhyke. Myös varaston lattian maalipinta on hilseillyt kosteuden vaikutuksesta. Seinärakenteen alkuperäinen kapillaarikatko sijaitsee ylemmän lattiapinnan tasolla, jolloin vauriot ovat syntyneet pääosin kapillaarikatkon alapuolelle.



Kuva 3.40- 3.41. Varaston massiivitiiliseinien alaosat ovat kastuneet läpeensä kapillaarisesti nousseen kosteuden vaikutuksesta. Oven karmi on upotettu osin rappauksen sisään ja sen alaosat ovat jääneet varastoon tehdyn betoniaskelman ja seinän väliin, mikä on aiheuttanut karmiin näkyvää mikrobikasvua.

Helposti liukenevien suolojen ollessa kyseessä on mahdollista, että rakenteen pinnalle tai pintarappaukseen kiteytyneet suolat liukenevat uudelleen ja imeytyvät takaisin rakenteeseen. Takaisin liukenemista voi tapahtua, kun sisäilman kosteus nousee ja seinäpinnan läheisyydessä kosteuspitoisuus ylittää suolojen liukenemisrajan. Uudelleen liukenemista tapahtuu myös silloin, kun rakenteeseen kulkeutuu runsaasti lisää kosteutta ja kiteytymisvyöhykkeen kohdalla huokosissa olevan veden suolakonsentraatio laskee. Suolojen veteen liukeneminen on riippuvainen kosteuden lisäksi myös lämpötilasta, vertaa taulukko 3.3, jolloin rakenteen lämmitessä huokosissa olevaan veteen mahtuu enemmän suoloja. Esimerkiksi kuvan 3.42 lattiapinnalle kiteytyneet suolat olivat seuraavalla kohdekäynnillä lienneet takaisin rakenteeseen.



Kuva 3.42. Lattiapinnalle kiteytynyttä suolaa.

Nykyään suuri osa vanhoista ja kosteuden kannalta hyvin riskialttiista rakenteista on jo korjattu vuosien mittaan ilmenneiden sisäilmaongelmien takia. Näihin rakenteisiin kuuluvat orgaanisella lämmöneristyksellä toteutetut maanvastaiset alapohjarakenteet. Orgaanisella täytöllä olevia alapohjarakenteita korjataan useimmiten rakennusten sisätilojen peruskorjausten yhteydessä. Silti näitä rakenteita on edelleen olemassa vanhoissa rakennuksissa, ja mikäli kosteutta pääsee orgaaniseen, usein jo valmiiksi lepotilassa olevia mikrobeja sisältävään lämmöneristekerrokseen, aktivoituu mikrobikasvusto jälleen ja tuottaa sisäilmaa heikentäviä epäpuhtauksia.

3.6 Perinteiset korjausmenetelmät

Suomessa on käytetty perinteisesti kosteusvaurioituneiden kellaritilojen korjauksissa korjaustapaa, jossa rakennuksen perustukset ja maanvastaisten seinien vierustat kaivetaan auki, rakenteet vedeneristetään ulkopuolelta ja asennetaan salaojitus. Korjauksella saavutetaan melko tehokas pintavesien hallintamenetelmä, mutta korjaus on toteutukseltaan kallis ja aikaa vievä, eikä tulos aina vastaa odotuksia. Rakenteissa, joissa on ongelmana kapillaarikatkon puuttuminen, ei ulkopuolinen vedeneristys poista ongelmaa kokonaan. Rakennuksen salaojitusta korjaamalla sekä ulkopuolisella vedeneristyksellä voidaan vähentää rakennuksen vierustan kosteusrasitusta ja edelleen kapillaarisen kosteuden siirtymistä, mutta maanvastaisissa seinärakenteissa voi esiintyä edelleen kosteuden aiheuttamia ongelmia.

Kaupunkien keskusta-alueilla monet rakennukset on rakennettu kiinni toisiinsa, jolloin maan alla sijaitsevien seinien korjaaminen ei ole ulkopuolelta mahdollista. Väliseinissä ja maanpinnan yläpuolisissa rakenteissa kapillaarikatkon rakentaminen on mahdollista rakenteiden leikkaamisen ja eristyskaistan asentamisen avulla, mutta menetelmää ei voida käyttää ulkoseinissä ilman seinien maanpinnan alla olevien osien esiin kaivamista. Tällöinkin seinän maanpinnan alapuolella oleva osuus pitää vedeneristää ulkopuolelta. Korjauksissa tulee myös huomioida maanpaineen vaikutus ja varmistaa kaivannon sekä rakennuksen stabiilius korjauksen aikana.

Yhtenä tyypillisenä keinona korjata kosteusvaurioituneet seinävaurioalueet on ollut rakenteen tai yleisimmin huoneilman koneellinen kuivatus sekä pintatasoitteiden uusinta ja maalaus, mikä on johtanut vaurioiden uusiutumiseen muutaman vuoden kuluessa korjauksesta. Toisena sisäpintojen korjaustapana on ollut rakenteen pinnoittaminen metallilevyillä, huokoisilla kuitulevyillä tai pinkopahveilla. Nämä ”korjaukset” voidaan luokitella kosteusongelman piilottamiseen, ja johtavat orgaanisten materiaalien kastumiseen ja homehtumiseen tai metallilevytettyjen rakenteiden osalta kosteuden nousemiseen levytetyn alueen yläpuolelle.



Kuva 3.43. Toisarvoisissa tiloissa kosteuden aiheuttamat vauriot voidaan peittää levyttämällä rakenteiden alaosat taustasta irti olevalla, tuulettuvalla levyllä. Kiteytyneet suolat varisevat vähitellen lattialle.

Mikäli levytettyä rakennetta käytetään, tulee varmistaa, että materiaalit ja toteutus-tapa eivät ole mikrobikasvun kannalta riskialttiita. Yhtenä etenkin toisarvoisiin tiloihin soveltuvana korjaustapana on teräs- tai alumiinitukien varaan asennettu, taustaltaan tuulettuva filmivaneri. Kuvassa 3.43 on esimerkki tällaisesta korjauksen toteutuksesta. Vaneri jätetään ala- ja yläreunastaan auki tuulettumisen varmistamiseksi. Rakenteen pinnalle kiteytyvät varisevat vähitellen lattialle, mistä ne voidaan siivouksen yhteydessä poistaa.

4. KIRJALLISUUSSELVITYS: MAANVASTAISTEN RAKENTEIDEN KOSTEUDEN HALLINTA SISÄPUOLISILLA KORJAUSMENETELMILLÄ

4.1 Johdanto

Olemassa olevan rakennuksen kosteus- ja vedeneristyksen parantaminen on ajankohtaista, kun rakennuksen kunto ja käyttötarkoitus eivät vastaa toisiaan ja rakenteissa esiintyvä kosteus aiheuttaa tilojen käyttäjille terveysriskin. Vedeneristyksen toteuttamiseen on monia tapoja, mutta niiden käyttämiselle asettavat rajoituksia sekä rakenteet että olosuhteet. Korjauksiin käytettävän materiaalin käyttöiän tulee olla riittävän pitkä, eivätkä korjaustoimenpiteet tai käytettävät materiaalit saa aiheuttaa vaurioita rakenteille tai epäpuhtauksia sisäilmaan.

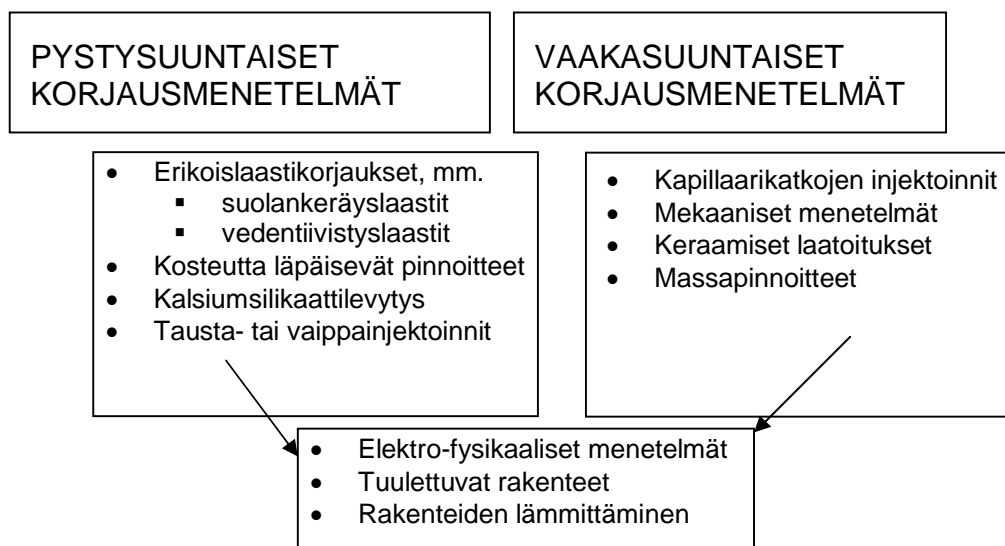
Kellarikerroksissa sijaitsevien tilojen hyödyntämisen yhteydessä on tullut tarve selvittää erilaisia rakennusten maanvastaisten rakenteiden kosteudenhallintaan soveltuvia sisäpuolisia korjausmenetelmiä. Tässä diplomityössä pyritään esittelemään näitä korjausmenetelmiä koti- ja ulkomaisen kirjallisuuden pohjalta sekä arvioimaan menetelmien soveltuvuutta suomalaisten rakennusten korjauksissa.

4.2 Sisäpuoliset korjausmenetelmät

4.2.1 Korjausmenetelmien jaottelu

Sisäpuoliset korjausmenetelmät voidaan jakaa niiden käytön sekä vaikutussuunnan mukaan vaakasuuntaisiin ja pystysuuntaisiin korjausmenetelmiin (kuva 4.1) tai toimintatavan perusteella vesihöyryä läpäiseviin tai tiivistäviin korjausmenetelmiin.

Osa korjausmenetelmistä on käytettävissä sekä seinä- että lattiarakenteissa. Näihin korjausmenetelmiin kuuluvat kuvan 4.1 mukaisesti elektro-fysikaaliset menetelmät, tuulettuvat rakenteet sekä rakenteiden lämmittäminen. Useimmille näistä menetelmistä on ominaista se, että niistä on olemassa variaatioita eri tahojen tekemän tutkimustyön ja korjauksissa käytettyjen materiaalien ominaisuuksien takia.



Kuva. 4.1. Sisäpuolisten korjausten jaottelu

Seuraavassa on esitelty lyhyesti pysty- ja vaakasuuntaisia korjausmenetelmiä, jonka jälkeen tutkimuksessa on syvennetty pisimpään käytössä olleisiin sekä kirjallisuusaineiston perusteella parhaiten toimiviin korjausmenetelmiin. Työssä on käyty lyhyesti läpi muita, tavanomaisiin rakennusteknisiin korjausratkaisuihin verrattavissa olevia korjausvaihtoehtoja.

4.2.2 Pystysuuntaiset korjausmenetelmät

Nykyisten rakennusmääräysten (C2 Kosteus. Määräykset ohjeet 1998) mukaan maanvastaisten seinärakenteiden maan alle jäävät seinäosat tulee vedeneristää ulkopuolelta. Nykyään yleisimmin käytetään joko bitumikermieristystä tai patolevyjä, jotka ovat syrjäyttäneet perinteisen bitumisivelyn. Yleistymässä on myös massamaisten siveltävien sekä ruiskutettavien vedeneristeiden käyttö, jotka on otettu mukaan vuonna 2009 voimaan tulleeseen perusmuurien vedeneristystä käsittelevään RT-ohjekorttiin (RT 83-10955 Perustusten ja perusmuurien vedeneristys).

Oikein ja huolellisesti toteutettu ulkopuolinen vedenpaineen kestävä vedeneristys kumibitumikermeillä tai massamaisilla vedeneristeillä on aina paras ja toimintavarmin vaihtoehto rakenteen kosteustekniikan kannalta. Epäjatkuvat vedeneristeet, kuten patolevyt, soveltuvat kohteisiin, joissa ei ole oletettavissa ulkopuolista paineellista kosteusrasitusta. Joissain korjauskohteissa ulkopuolinen vedeneristäminen on kuitenkin mahdotonta ja tarvitaan toimenpiteitä rakenteen kosteuden hallintaan sisäpuolelta.

Vanhoissa betonirakenteisissa perusmuureissa mahdollinen maanvastaisen seinän vedeneriste on ollut yleensä perusmuurin sisäpuolella. Yhtenä syynä näiden rakenteiden kosteusvaurioiden syntymiseen on betonin kutistumisen ja ulkopuolisten rasiusten myötä rakenteeseen syntyneet halkeamat, jotka mahdollistavat veden kulkeutumisen vedeneristeinä toimivan bitumisivelyn läpi. Mikäli perusmuurin vedeneriste puuttuu, tai se on vaurioitunut, voidaan sisäpuolisen vedeneristeiden uusimiseen tai korjaamiseen käyttää erilaisia vedenpitäviä laasteja tai tiivistäviä käsittelyjä. Korjaamiseen soveltuvis- ta tuotteista vedentiivistyslaastit ovat vedenpitävyydestään huolimatta vesihöyryä läpäi-

seviä, jolloin rakenteeseen pääsevä kosteus voi haihtua sisäilmaan ilman, että rakenteen pinnalla on havaittavissa irtovettä.

Tiilimuuratuilla rakenteilla vedeneristeen puutteet johtavat usein laajoihin kosteuden aiheuttamiin vaurioihin tiilirakenteen hyvän kosteudensiirtokyvyn sekä rakenteessa käytettyjen, kosteuden ja suolojen vaikutuksesta helposti vaurioituvien laastien takia. Keski-Euroopassa massiivitiiliseinien korjaamisessa käytetäänkin yleisesti suolarasitusta kestäviä laastikorjauksia sekä kosteusrasituksesta riippuen myös vedentiivistyslaastikorjauksia. Yhtenä korjausvaihtoehtona on verhota rakenne niin, että sisäpinnan taakse jää ulkoilmaan tuuletettu tuuletusväli, mutta tällöin varsinaisen rakenteen pinnalle pääsee edelleen kertymään suoloja, rakenne säilyy kosteana ja ajan kuluessa myös verhomuuraukseen voi kerääntyä kosteutta.

Kirjallisuudessa on esitettyä myös seinärakenteen ulkopinnan injektointi pystysuunnassa. Menetelmässä rakenteen sisäpintaan porataan porareikiä tasaisesti koko seinän alueelle ja niihin asennetaan vastaava injektointiaine kuin kapillaarikatkojen injektoinnissa. Porareikien kautta vaikuttava injektointiaine muodostaa rakenteeseen yhtenäisen tiivistyskerroksen, joka estää veden pääsyn rakenteen läpi.

Yhtenä korjaustapana on ollut reikien poraaminen seinärakenteen läpi ja rakenteen maanvastaisen pinnan ja maataytön reuna-alueen tiivistäminen juottamalla tiivistyslaastia tai muuta tiivistysainetta rei'istä rakenteen ulkopuolelle. Täyttö voidaan suorittaa menetelmästä riippuen paineettomasti tai paineellisesti.

4.2.3 Vaakasuuntaiset korjausmenetelmät

Vaakasuuntaiset korjaukset käsittävät maanvastaisiin alapohjarakenteisiin tehtävien korjausten ohella myös kantavien seinien ja pilarien alhaalta ylöspäin kulkeutuvan kosteuden rajoittamistoimet. Alapohjien osalta on esitetty lähinnä ilman rakenteen purkamista tehtävät korjaustoimet.

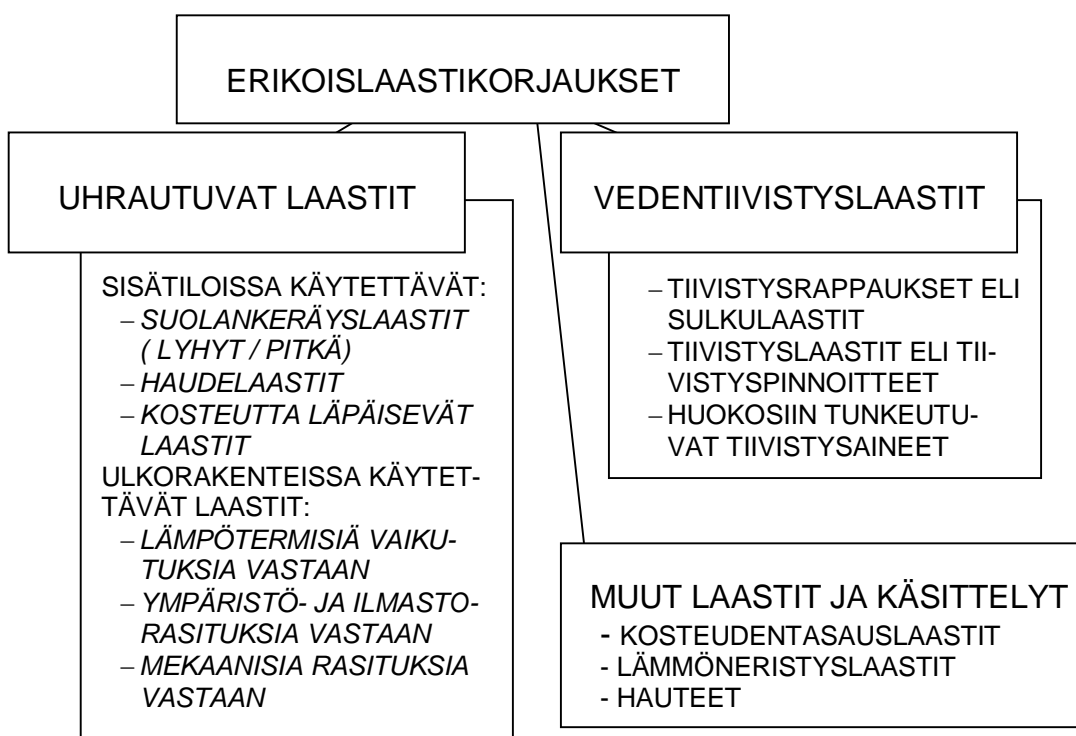
Seinärakenteen vaakasuuntainen kosteudeneristys voidaan tehdä mekaanisesti eri tavoilla sahaamalla tai poraamalla rakenteeseen ura, johon asennetaan tiivistävä materiaali, kuten levytiivistys tai massatäyttö. Toinen periaatteellinen tapa on porareikien kautta tehtävä injektointi, jossa on valittavana monia eri tavoilla vaikuttavia injektointiaineita ja injektointimenetelmiä. Muita korjausmenetelmiä ovat mm. rakenteiden lämmitys tai elektro-fysikaaliset menetelmät.

Olemassa olevien kantavien seinien ja pilarien korjaustoimenpiteet ovat yksi haastavimmista korjausrakentamisen tehtävistä. Työ on tehtävä yläpuolisia rakenteita vaurioitamatta, mutta kuitenkin niin, että rakenteen kosteustekninen toiminta saadaan parannettua. Toimenpiteet suoritetaan rakennuksen perustusten välittömässä läheisyydessä, missä kuormitukset ovat suurimmillaan.

4.3 Erikoislaastikorjaukset

4.3.1 Laastikorjausten pääryhmät

Erikoislaastikorjaukset käsittävät kaksi pääryhmää, uhrautuvat laastit sekä vedentiivistyslaastit. Näiden lisäksi maanvastaisten rakenteiden korjauksissa voidaan käyttää erilaisia lämmöneristyskyvyltään tai kosteudentitomiskyvyltään parannettuja laasteja sekä suolojen poistoon tarkoitettuja hauteita. Alla olevassa kaaviossa (kuva 4.2) on esitetty erikoislaastikorjausten jaottelu, joista tässä tutkimuksessa käsitellään sisätiloissa käytettävät uhrautuvat laastit sekä vedentiivistyslaastit.



Kuva 4.2. Erikoislaastikorjausten jaottelu

Saksalaisessa käsitteistössä erotellaan uhrautuvat laastit sekä suolaa keräävät saneerauslaastirappaukset omiksi kokonaisuuksiksi ja molemmilla on omat WTA²-ohjeistukset. Tässä tutkimuksessa saneerauslaastit eli suolankeräyslaastirappaukset on sisällytetty uhrautuva laasti –käsitteen alle samankaltaisten ominaisuuksiensa takia. Erona suolankeräyslaastirappausten ja uhrautuvien laastien mukaisella suolaa keräävällä laastilla on käyttöikä sekä käyttötapa.

Uhrautuvia laasteja koskevan WTA-ohjeen [33] mukaan uhrautuvien laastien ominaisuuksiin kuuluu niiden lyhyt käyttöikä alle kuukaudesta muutamiin vuosiin sekä

² WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, on alkujaan saksalainen yhdistys, joka on sittemmin laajentunut kansainväliseksi rakennusten korjausmenetelmien tutkimusta ja kehitystä tukevaksi yhdistykseksi. (eng. International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Monuments Preservation)

helppo uusittavuus. Uhrautuvia laasteja on useita niiden eri käyttötarkoitusten mukaan. Niitä voidaan käyttää suojaamaan rakennetta kosteutta, suoloja, sääolosuhteita, mekaanista rasitusta ja likaantumista vastaan. Pääpiirteissään niiden tehtävänä on tuhoutua suojatessaan allaan olevaa rakennetta. Suolankeräyslaastirappauksilla on useiden vuosien, tyypillisesti jopa vuosikymmenien käyttöikä, jonka kuluessa laastiin kiteytyneet suolat vähitellen täyttävät rappauksen huokokset.

Vedentiivistyslaasteja käytetään estämään nestemäisen veden kulkeutuminen rakenteen läpi. Tiivistyslaastit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään, tiivistysrappauslaasteihin, vedentiivistyspinnoitteisiin sekä rakenteen huokosiin tunkeutuviin tiivistyslaasteihin. Tiivistyslaastien kehityksessä on ollut merkittävänä tekijänä sementtipohjaisten laastien käyttäminen betonisten juomavesialtaiden, jätevesiverkostojen ja muiden patorakenteiden tiivistämisessä. Samat laastit on otettu käyttöön maanvastaisten rakenteiden korjaamisessa rakenteiden läpi kulkeutuvaa kosteutta vastaan.

Julkisivukorjauksiin on kehitetty erilaisia lämmöneristyskyvyltään tavallisia laasteja parempia laasteja. Lämmöneristyslaastirappauksille on ominaista sementtisidoksen ja huokostilan kautta korkea vesihöyryn läpäisevyys. Ne soveltuvat myös vähäisessä määrin suolarasitettujen alustojen rappauksiin, sillä ne voivat rajoitetussa määrin kerätä suolaan itseensä. Mikäli lämmöneristyslaastilla pyritään parantamaan rakenteen lämmöneristävyyttä, tulee U-arvoa määritettäessä huomioida rakenteen kosteuspitäisyys, sillä kosteana rappauksen lämmöneristävyys heikentyy.

Kosteudentasauslaastit sekä kosteutta läpäisevät ovat korkean vesihöyryn läpäisevyyden omaavia laasteja, joita käytetään suolankeräyslaastien tavoin kosteiden seinäpintojen korjaamiseen. Kosteutta läpäisevien laastien tarkoituksena on olla mahdollisimman vähän kosteuden etenemistä hidastavia laasteja ja samalla estää alustan vaurioituminen toistuvan kastumis-kuivumis –vaihtelun seurauksena. Kosteudentasauslaastikerroksella saavutettavia etuja ovat ulkonäölliset hyödyt, kuten tummien alueiden, kalkkikerääntymien ja kosteille pinnoille helposti ilmaantuvien mikrobikasvustojen poistuminen, jotka lisäävät tilojen käyttömukavuutta. [34]

Kirjallisuudessa ja lehtiartikkeleissa on esitetty täysin vastakkaisia mielipiteitä kosteudentasauslaastien toimivuudesta suola- ja kosteusrasitettujen rakenteiden korjaamisessa. Erwurthin [34] mukaan niiden vedentunkeutumissyvyys on 20 mm, jolloin laastin kosteudenhaihtumisrintama siirtyy laastikerroksessa kosteusrasituksen määrän mukaan. Siirtyvän kosteudenhaihtumisrintaman myötä rakenteen kosteuden siirtonopeus on suolankeräyslaasteja nopeampi perustuen lyhyempään diffuusiomatkaan laastin pinnalle. Kosteudentasauslaastin vesihöyryn läpäisevyys erittäin suuri ja parhaimmassa tapauksessa voidaan saavuttaa jopa sd-arvo 0,01 m.

4.3.2 Uhrautuvien laastien jaottelu

Uhrautuvia laasteja käsittelevän WTA-ohjeen [33] mukaan uhrautuvat laastit jaetaan niiden käyttötarkoituksen perusteella taulukon 4.1 mukaisesti sisällä ja ulkona käytettäviin, erilaisia rasituksia vastaan tarkoitettuihin laasteihin. Lyhenne OP tulee sanasta uh-

rautuva laasti (opferputz), I tarkoittaa sisätiloissa (innen) ja A tarkoittaa ulkona (außen) käytettäviä laasteja.

Uhrautuvien laastien toiminta perustuu siihen, että rakenteen pinta suojataan muuttamalla kosteuden haihtumisvyöhyke uhrautuvan laastin sisälle tai pinnalle, jolloin myös suolojen kiteytymisvyöhyke vaihtaa paikkaa. Laasteja voidaan käyttää myös vanhojen rappauspintojen päälle asennettavana suojakerroksena, jolloin vanha rappauspinta säilyy ja uusi rappaus altistetaan vaurioitumiselle. Arkojen rappaus- ja maalipintojen päälle asennettaessa uhrautuvat laastit tule erottaa suojattavasta pinnasta huokoisen paperin, tekstiilin tai muun helposti poistettavan erotusmateriaalin avulla. Uhrautuvat laastit ovat kapillaarisesti aktiivisia, millä varmistetaan kosteuden ja suolojen siirtyminen uhrautuvaan laastiin.

Yhtenä WTA-ohjeen uhrautuvien laastien alaryhmänä on suolaa keräävä rappaus (OP-I), joka yleensä asennetaan vanhan kosteus- ja suolarasitetun tiili- tai rappauspinnan päälle. Rappauksen käyttöikä on melko lyhyt, minkä aikana suolat kiteytyvät rappauksen sisään sekä pinnalle.

Toimintaperiaatteeltaan samankaltaisen, mutta huomattavasti pitkäikäisemmän rappauskorjauksen voi tehdä käyttämällä erillisen WTA-saneerauslaastiohjeen [35] mukaisia suolankeräysrappauslaasteja. Pitkäikäiseksi tarkoitettussa suolankeräyslaastikorjauksessa vanhat rappaukset poistetaan ja uudet rappauslaastit asennetaan puhdistettuun tiili- tai betonirakenteeseen.

Uhrautuvia haudelaasteja käytetään erityistapauksissa voimakkaan suolarasituksen alaisissa rakenteissa, joissa tarvitaan nopeaa suolojen siirtämistä suojattavasta pinnasta. Vesihöyryä läpäisevää laastia käytetään vain vähäisessä suolarasituksessa olevien kastuneiden rakenteiden korjauksessa. Haude- ja vesihöyryä läpäisevää laastia voidaan käyttää alustan suola- tai kosteuspitoisuuden alentamiseen ennen suolankeräyslaastien käyttämistä.

Taulukko 4.1. Uhrautuvien laastien jaottelu mukaellen WTA-ohjeen E-2-10-06/D taulukoita 1 ja 2 [33].

Laastityyppi	Tehtävä	Toimintatapa ja käyttö
OP-I Uhrautuva laasti rakenteen sisältä tulevia rasituksia vastaan	suolojen kiteytyminen haihtumisvyöhykkeelle; alustan ja laastin kiteytymisvaihtelun vähentäminen	nopea suolojen kulkeutuminen laastiin, suolojen kulkeutuminen ulos, suhteellisen lyhyt käyttöikä
OP-I-Suola (OP-I-Salz) Haudelaasti	suolojen kiteytyminen haihtumisvyöhykkeelle; alustan ja laastin kiteytymisvaihtelun vähentäminen, suolojen vähentäminen	käytetään erittäin suurella suolarasituksella olevien tiilirakenteiden vaurioihin sisätiloissa tai yhdessä vettä hylkivän pinnoitteen kanssa
OP-I-Kosteus (OP-I-Feuchte) Kastuneiden sisäseinien rappauslaasti	korkea tehokkuuksinen vesihöyrynläpäisevyys	vesivahinkojen korjaamiseen, paineellisen veden rasittamiin rakenteisiin tai maanvastaisiin tiilirakenteisiin
OP-A-PT Ulkopinnan rappauslaasti	puskurikerros lämpötermisiä vaikutuksia vastaan	vähentämään laajenemis-kutistumisprosessin, jäätymsulamis-, ja kastumis-kuivumisvaihtelun voimakkuutta ja esiintymistä, vähentämään kosteuden imeytymistä
OP-A-PS Ulkopinnan rappauslaasti	puskurikerros ulkoisia rasituksia vastaan: suolat, reaktiiviset kaasut, pöly ja noki, mikro-organismit	vähentämään äärimmäisiä ympäristö/ilmastorasituksia
OP-A-PM Ulkopinnan rappauslaasti	puskurikerros mekaanisia rasituksia vastaan	suojaa sokkelialuetta, porttikäytäviä, sisäänkäyntejä, pintoja suurien ihmisvirtojen läheisyydessä tai tuulen aiheuttaman eroosion vaikutuksilta

Taulukossa 4.2 on listattu uhrautuvia laasteja koskevassa WTA-ohjeessa esitetyt uhrautuvien laastien laatuvaatimukset. Niille on yhteistä korkea huokoisuus ja alhainen lujuus. Uhrautuvien laastien toiminnan lähtökohtana on helppo uusittavuus, jota alhainen, alustaa heikompi lujuus edesauttaa. Suolankeräyslaasteja koskevat laatuvaatimukset on esitetty niitä koskevassa WTA-ohjeessa 2-9-04/D ja niitä on käsitelty tutkimuksessa myöhemmin.

Taulukko 4.2. Uhrautuvien laastien laatuvaatimukset WTA-ohjeen E-2-10-06/D mukaan [33]

OP-I Suolankeräyslaasti	
huokoisuus	> alusta
irtotiheys	≤ alusta
vedenimeytyminen w	> 1 kg/m ² h ^{0,5}
puristuslujuus β _D	< 5 N/mm ²
kimmomoduli E	< alusta
taivutusvetolujuus β _{HZ}	< 0,5 N/mm ² ja < 50 % alustasta
OP-I- Salz Haudelaasti	
huokoisuus	> 60 tilavuus-%
irtotiheys	≤ 1,0 kg/cm ³
vesihöyrynläpäisevyys μ	< 10
vedenimeytyminen w	> 1 kg/m ² h ^{0,5}
puristuslujuus β _D	< 5 N/mm ²
kimmomoduli E	< alusta
kuivuminen	> 1 kg/m ² d
taivutusvetolujuus β _{HZ}	0,05 N/mm ² < β _{HZ} < 0,5 N/mm ² ja < 50 % alustasta
OP-I-Feuchte Vesihöyryä läpäisevä laasti	
huokoisuus	> 40 tilavuus-%
vesihöyrynläpäisevyys μ	< 15
vedenimeytyminen w	> 1 kg/m ² h ^{0,5}
puristuslujuus β _D	< 5 N/mm ² , < alusta
kimmomoduli E	< alusta
kuivuminen	> 2 l/m ² d
taivutusvetolujuus β _{HZ}	0,05 N/mm ² < β _{HZ} < 0,5 N/mm ² ja < 50 % alustasta
μ: vesihöyryndiffuusiovastusluku DIN 52615 mukaisesti (märkä-kuppi-koe) w: kapillaarinen vedenimeytyminen DIN 52617 mukaisesti	

4.3.3 Suolankeräyslaastit

Suolankeräyslaasteilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa sementtipohjaisia erikoisrappauslaasteja, jotka on kehitetty varastoimaan kosteuden vaikutuksesta rakenteisiin kulkeutuvat suolat huokosiinsa ja estämään rappauspinnan vaurioituminen. Rappausta nimitetään myös toiminnan perusteella uhrautuvaksi rappaukseksi tai uhrautuvaksi laastiksi, sillä rappaus pystyy vastaanottamaan suoloja vain sen aikaa, kuin sen huokosrakenteeseen mahtuu kiteytymään suoloja. Uhrautuva laasti –termiä tulisi kuitenkin välttää, jotta toiminnaltaan erilaisten laastien välinen ero pysyy selkeänä. Saksankielisessä

kirjallisuudessa sekä materiaalivalmistajien tiedoissa näitä erikoislaasteja kutsutaan saneerauslaasteiksi.

Suomessa saneerauslaasti -nimitystä käytetään myös monien muiden, toiminnaltaan erilaisten laastien yhteydessä, minkä takia sekaannusten välttämiseksi olen pyrkinyt käyttämään nimityksenä erikoislaastirappausta, WTA-saneerauslaastia tai suolankeräyslaastia. Suomen kieleen soveltuvoin nimitys näille laasteille on niiden toimintatapaan perustuen suolankeräyslaastit. Paikoitellen etenkin saksankielisestä aineistosta peräisin olevissa teksteissä sekä taulukoissa käytetään kuitenkin näistä laasteista nimitystä saneerauslaastit alkuperäislähteen mukaan.

Suolankeräyslaastien historia ja kehitys

Suolankeräyslaastit on alkujaan kehitetty rapattujen julkisivujen korjaamiseen kohteissa, joissa julkisivupinnat kärsivät kosteuden ja suolojen aiheuttamista rappausvaurioista. Samat materiaalit soveltuvat myös maanvastaisten rakenteiden sisäpuolisiin korjauksiin, sillä ongelmien syy on sama – kosteusliikkeen aiheuttama suolojen kiteytyminen rakenteen pinnalle, joka rikkoo pintarappausta sekä maalipinnoitetta.

WTA-saneerauslaastien kehitys alkoi 1970-luvun puolivälissä työmaaolosuhteissa, kun Meier ja Schuman, kaksi rappajaa tekivät kokeilemalla kehitystyötä eri reseptien ja lisäaineiden yhteensopivuudesta julkisivurappauslaastien kosteuden ja suolankestävyyden parantamiseksi [20, s. 315]. Alkujaan näillä erikoisrappauslaasteilla oli Saksassa vain muutama valmistaja, mutta nykyään eri tuotenimillä tarjottujen laastien valmistajia on parikymmentä. Sittemmin saneerauslaastit ovat saavuttaneet paikkansa Keski-Euroopassa tiilimuurattujen rakenteiden korjaamisessa niin sisätiloissa kuin julkisivurakenteissa.

Erikoisrappauslaastien käytön yleistyessä suunnittelijoiden ja valmistajien keskuudessa syntyi tarve yhteisen valmistajasta tai tuotteesta riippumattoman ohjeen saamiseksi, sillä olemassa oleva saksalainen rappauslaastiohjeistus, DIN 18550, ei kattanut näitä ominaisuuksiltaan tavallisista laasteista poikkeavia laasteja. Ensimmäinen rappauslaasteja käsittelevä WTA-ohje, ”Saneerauslaastien rakennusfysikaaliset ja tekniset vaatimukset” tuli voimaan 1985, mutta käytännön myötä huomattiin että vähimmäisvaatimukset eivät olleet riittäviä tai tarpeeksi tarkkoja. Vuonna 1991 voimaan tullut uusi ohje oli selkeämpi, sisältäen ohjeet rappausten toteuttamiseen sekä niiden tarkat tuote- ja valmistusvaatimukset. Sittemmin ohjeita on päivitetty vuosina 1999 ja 2004.

Saneerauslaastit on sisällytetty vuonna 2003 ilmestyneeseen uudistettuun rappauslaasteja koskevaan euronormiin, EN 998-1 Laastien spesifikaatiot. Osa 1. Rappaus-tasoitelaastit. Standardissa ei ole kuitenkaan määritelty saneerauslaasteilta vaadittavia ominaisuuksia yhtä tarkasti kuin WTA-ohjeessa ja mm. tartuntalaastin, huokoisen pohjalaastin ja laastien valmistuksen osalta ei ole annettu määräyksiä [36, 37].

Saneerauslaasti-nimekkeellä myytävien tuotteiden suuren määrän takia on päätetty, että WTA-ohjeen täyttävien saneerauslaastien nimeen lisätään lyhenne WTA merkiksi niiden laadusta. Kaikkien valmistajien laastit eivät kuitenkaan täytä nimessä olevasta

WTA-merkinnästä huolimatta ohjeen vaatimuksia, minkä takia on tehty erillinen WTA-laatusertifikaattijärjestelmä. Sertifikaatin saavat WTA:n testit läpäisevät rappauslaastit.

Suolankeräyslaastien koostumus ja toiminta

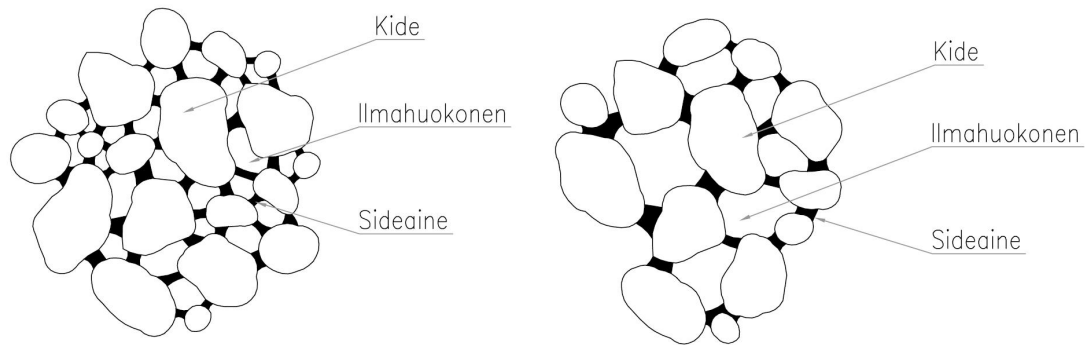
Suolankeräyslaastien ominaisuuksiin vaikutetaan valitsemalla laastin ainesosat haluttujen ominaisuuksien mukaan. Sideaineen valinnan, huokostilavuuden lisäämisen ja kapillaarihuokosten määrän vähennyksellä voidaan saavuttaa oleellisesti parempi pakkasen ja suolojen kestävyys. Myös mekaanisia ominaisuuksia voidaan parantaa laastin ainesosien valinnalla.

Suolankeräyslaastien koostumus on Frössel'n mukaan jostakin seuraava: sideaineessa on hydraulista kalkkia 5%, valkosementtiä 25% ja harmaata sementtiä 75% sekä laastin lisäaineessa on kevyttäyteainetta 25%, kvartsihiekkää 30% ja kalkkiahiekkaa 45% [20, s.316]. Näiden lisäksi on tuotekehityksen tuloksena osassa tuotteita lisäaineena vettähyökkiviä ainesosia, suolojenkestävyyttä parantavia aineita ja ilmatilavuutta lisääviä huokostimia. Taulukossa 4.3 on esitetty suolankeräyslaastien valmistuksessa käytettyjä aineita. Rooman kalkki on kipsivapaata, nopeasti sitoutuvaa hydraulista kalkkia.

Taulukko 4.3. Suolankeräyslaasteissa käytettyjä aineita

Suolankeräyslaastien ainesosat	
Sideaine	trassi- tai roomankalkki, sementti
Täyteaine	kalkki- ja dolomiittimurskahiekka, kvartsihiekkä (raemuoto, -jakauma ja hienoaine säädetty)
Lisäaine	hydrofobisuutta sekä vedenpitävyyttä parantavat aineet, käytettävyyttä sekä tartuntaa parantavat aineet, ilmahuokostimet (fysikaalis-mekaanisesti sekä kemiallisesti vaikuttavat)

Suolankeräyslaastin tulee kestää pohjan suolautuminen sekä korkea kosteusrasitus, minkä takia sideaineena käytetään ainoastaan hydraulisesti sitoutuvaa sementtilaastia eli karbonaattisesti sitoutuvat kalkki-saneerauslaastit eivät sovellu tähän käyttöön. Perinteiset karbonaattisitoutuvat kalkkilaastit ovat lujuuksiltaan heikkoja, niiden huokosrakenne on kapillaarinen, minkä johdosta niillä on voimakas suolojen ja kosteuden siirtämiskyky. [20, s.316] Näistä ominaisuuksista johtuen perinteiset kalkkilaastit vaurioituvat hyvin nopeasti suolarasitetuissa rakenteissa.

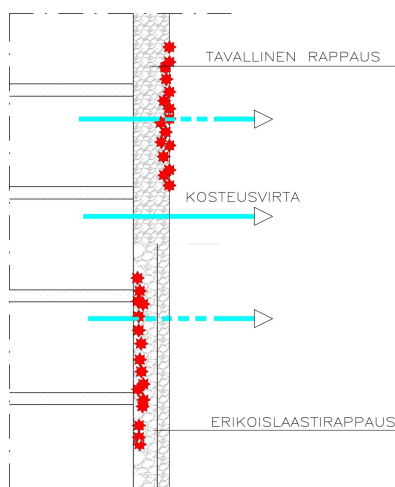


Kalkkisementtilaastissa on paljon kooltaan pieniä huokosia ja huokoisuus on noin 12 %

Suolankeräyslaastissa on suhteellisen vähän huokosia, mutta ne ovat kooltaan suuria ja huokoisuus on yli 40 %

Kuva 4.3. Suolankeräyslaastirappauksen ja tavallisen kalkkisementtilaastirappauksen huokosrakenteen ero [20, s.315].

Suolankeräyslaastien huokoinen laastikerros toimii huokostilavuuden, huokosrakenteen ja huokosten vedenhylkivyyden takia kapillaarisen kosteusliikkeen katkaisevana kerroksena. Rakenteesta rappaukseen siirtyvä kosteus kulkeutuu laastikerroksessa muutamien millimetrin verran kapillaarisesti, kunnes huokosten kapillaarinen imukyky heikentyy ja kosteus alkaa haihtua ja etenee kohti rappauksen pintaa diffuusion vaikutuksesta. Haihtumisen yhteydessä rappauksen huokosiin kiteytyy suoloja. Tavallisessa kalkkisementtilaastirappauksessa kosteus kulkeutuu kapillaarisesti rappauksen pintaosiin, jolloin kosteuden haihtumisen yhteydessä kiteytyvät suolat rikkovat rappauksen pintaa ja irrottavat maalipinnoitteen alustastaan. Vaurioitumisprosessissa on yleensä mukana tiivis maalipinta, joka hidastaa kosteuden haihtumista, niin että rakenteen kosteuspiitoisuus ja samalla suolojen määrä kasvaa maalipinnan takana.



Kuva 4.4. Suolankeräyslaastirappauksen ja tavallisen kalkkisementtilaastirappauksen kosteusteknisen toiminnan ero suolarasitetussa rakenteessa. Punaiset tähdet kuvaavat suolakiteiden muodostumiskohtaa rappauksissa.

Suolankeräyslaastien toiminnan edellytys on, että rappauksen pintakäsittely on hyvin vesihöyryä läpäisevä. Mikäli käytetään liian tiivistä maalia, ei kosteus pääse haihtumaan riittävästi ja rappauksen huokokset alkavat kyllästyä vedellä ja seurauksena on rappauspinnan vaurioituminen.

Suolankeräyslaastien yhteydessä käytettävä käsitteistö ja WTA-laastien laatuvaatimukset

WTA-saneerauslaastiohjeessa ei suositella yksittäisten laastien käyttämistä korjauksissa, vaan ohjeissa lähdetään tuoteperheajattelusta, jossa käytetään suolaa keräävistä erikoiskorjauslaasteista nimitystä saneerauslaastijärjestelmä, mikä on otettu myös ohjeen nimeksi. Saneerauslaastijärjestelmän tai suomalaisittain suolankeräyslaastijärjestelmän kullekin osalle, alustalle, tartuntapohjarappaukselle, pohjalaastille, saneerauslaastille sekä viimeistelypinnalle, on esitetty omat vaatimukset (taulukko 4.3).

Suolankeräyslaastikorjauksia tehtäessä käytetään yllä mainittujen kerrosten lisäksi alustan tasoittamiseen erillistä tasoituslaastia tai nestemäisen veden läpäisyn estämiseen tiivistäviä laasteja. Näiden eri laastikerrosten selkeän erottelun kannalta on suositeltavaa käyttää niitä käsiteltäessä käsitteistönä toiminnan ja ominaisuuksien perusteella seuraavia termejä:

- Alusta (puhdistettu tiilimuuraus tai betonipinta)
- Tasoitus- ja oikaisulaasti (voidaan käyttää myös sulkulaastia)
- Vedentiivistyslaasti (sulkulaasti tai vedentiivistyspinnoite)
- Tartuntalaasti
- Huokoinen pohjalaasti (täyttölaasti)
- Huokoinen pintalaasti
- Tasoite
- Viimeistelypinta (maalaukset tai värillinen pintalaasti)

Standardissa SFS-EN 998-1 on termien ja määritelmien osalta käsitelty laasteja vain yleisellä tasolla, joten yllä esitetty jaottelu on standardia tarkempi. Suolankeräyslaasteista on standardissa käytetty suoran suomennoksen mukaisesti nimitystä saneerauslaastit, jotka kuuluvat standardin jaotellussa ominaisuuslaasteihin. Ominaisuuslaasteilla tarkoitetaan laasteja, joiden koostumus ja valmistusmenetelmä on vapaasti valittavissa haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Myös lämmöneristyslaastit (standardissa eristelaasti) kuuluvat ominaisuuslaasteihin. [36]

Sisäpuolisissa korjauksissa ei koskaan tarvita täydellistä, kaikki yllä mainitut rappauskerrokset kattavaa korjausratkaisua. Käyttämällä suunnitelmissa selkeitä käsitteitä tuotenimien yhteydessä voidaan varmistua siitä, että työmaalla käytetään oikeita materiaaleja oikeassa järjestyksessä korjauksia suoritettaessa. Järjestelmään kuuluvista laasteista suolaa keräävinä rappauskerroksina toimivat huokoiset pohja- ja pintalaastit. Nestemäisen veden kulkeutumista estävinä kerroksina toimivat sulkulaastit sekä vedentii-

vistyslaastit (-pinnoitteet). Erityinen huomio tulee kiinnittää tartuntalaastin kosteuden ja suojojen kulkeutumista hidastavaan vaikutukseen.

Taulukossa 4.4 WTA-saneerauslaasteille esitetyt kiinteän laastin laatuvaatimukset koskevat laboratoriokoekappaleita. Kohteesta otettujen koekappaleiden tulee täyttää irtotiheys- ja huokoisuusvaatimukset, mutta erilaisista reunaehdoista johtuen muut suu-reet saavat alittaa hiukan. WTA-ohjeessa esitettyjen laatuvaatimusten lisäksi laastien tulee täyttää mm. kiteytymis- ja suolarasitustestit. Näissä testeissä suolarasitus on paljon suurempi kuin rakenteissa tyypillisesti esiintyy.

Taulukko 4.4. WTA-saneerauslaastijärjestelmän laatuvaatimukset WTA 2-9-04/D mukaisesti.

Osa I Tartuntalaastin vaatimukset	
Puolipeitto:	
vedentunkeutumissyvyys	ei vaatimuksia
Kokopeitto:	
vedentunkeutumissyvyys 1 tunnin jälkeen	> 5 mm
vedentunkeutumissyvyys 24 tunnin jälkeen	koepalanpaksuus mm
Osa II Huokoisen pohjalaastin vaatimukset	
vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ	< 18
ilmahuokostilavuus	≥ 20 tilavuus-%
kapillaarinen kostedenimeytyminen w_{24}	> 1,0 kg/m ²
vedentunkeutumissyvyys 24 h	> 5 mm
tasoislaastin huokoisuus	> 35 tilavuus-%
pohjalaastin huokoisuus	> 45 tilavuus-%
puristuslujuus	\geq kuin saneerauslaastilla
Osa III Huokoisen pintalaastin vaatimukset	
vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ	< 12
tuoreen laastin ilmahuokostilavuus	> 25 %
kapillaarinen kostedenimeytyminen w_{24}	> 0,3 kg/m ²
vedentunkeutumissyvyys 24 h	5 mm (3..7 mm vuoden 1991 ohje)
tuoreen laastin huokoisuus	> 25 %
kiinteän laastin huokoisuus	> 40 %
kiinteän laastin irtotiheys	< 1,4 g/m ³
puristuslujuus 28 vrk	1,5..5 N/mm ²
taivutuslujuus 28 vrk (vuoden -91 ohje)	< 3
Osa IV Viimeistelypinnan vaatimukset	
Diffuusiovastuskerroin S_d (ulko- ja sisäolosuhteissa yksittäisillä maalikerroksilla)	< 0,2 m
Vedenimeytymiskyky (ulko-olosuhteissa, sisätiloissa ei vaatimuksia)	< 0,2 kg/m ² h ^{0,5}
Pintarappausten kapillaarinen vedenimeytyminen Ulko-olosuhteissa mineraalisen pintatasoitteen oltava vettähyllivä DIN 18550 mukaisesti	< 0,5 kg/m ² h ^{0,5}

Suolarasituskokeessa koekappale asetetaan alapinnaltaan suolaliuokseen, joka on valmistettu sekoittamalla 1 litraan ionipuhdistettua vettä 35 g natriumkloridia, 5 g natriumsulfaattia ja 15 g natriumnitraattia [35]. Ennen kokeen suorittamista koekappaleen sivujen pinnat on käsitelty vettäläpäisemättömiksi. WTA-saneerauslaastien tulee kestää suolarasituksessa yli 10 vuorokautta vaurioitta. Tavallinen kalkkisementtilaastikoekappale vaurioituu suolarasituskokeessa yleensä noin tunnin kuluttua.

Ohjeessa ei ole asetettu tartuntalaastille erillisiä laatuvaatimuksia, mikäli sen peittoaste on alle 50 %. Suuremmalla peittoasteella käytetyille tartuntalaasteille on asetettu vaatimuksia, jotta varmistetaan niiden ja suolankeräyslaastien toiminta kosteutta ja suo-
loja läpäisevänä laastina.

Huokoista pohjalaastia voidaan käyttää joko tasoituslaastina ja/tai voimakkaan suolarasituksen alaisissa kohteissa suolaa keräävänä kerroksena. Huokoista pohjalaastia käytettäessä voidaan pintalaastikerroksena käyttää 15 mm laastikerrosta. Ilman pohjalaastia tehtävissä korjauksissa pintalaastikerroksen minimipaksuus on 20 mm, joka voidaan tehdä yhtenä noin 20 mm tai kahtena vähintään 10 mm paksuisena kerroksena. Suositusten mukaan laastikerrosten yhteisvahvuuden tulee olla enintään noin 40 mm.

Mikäli valmiin rappauksen pinnalle on asetettu erityisiä tasaisuusvaatimuksia, voidaan laastien päällä käyttää erillistä tasoitetta. Viimeistelypintana käytettävän maalin tai värillisen pinnoitteen sekä mahdollisen tasoitteen tärkein vaatimus on se, että ne eivät muodosta rappauskerrosten päälle tiivistä, vesihöyryn läpäisevyyttä liiallisesti hidastavaa kerrosta. Rappauskorjattujen seinien maalaukseen soveltuvia maaleja ovat silikaattimaalit, dispersiosilikaattimaalit sekä silikonihartsimaalit [20, s.328; 38]. Maalaukseen soveltuvat myös julkisivumaalauksiin käytetyt silikoniemulsiomaalit, jotka omaavat myös hyvin alhaisen vesihöyrynläpäisevyyden.

Suolankeräyslaastien käyttäminen rakenteiden korjauksissa

Kirjallisuuslähteiden mukaan korjauksessa käytettävät laastikerrokset on määriteltävä tapauskohtaisesti rakenteen suolapitoisuuden perusteella. WTA-ohjeessa on esitetty ohjearvoja tarvittaville laastikerroksille ja niiden vahvuuksille rakenteesta määritettyjen suolapitoisuuksien mukaan (taulukko 4.5). Ohjeen mukaan vähäisen suolarasituksen osalta riittää korjaukseksi 20 mm:n kerroksena levitetty huokoinen pintalaasti. Keski-suuren suolakuormituksen osalta suolaa keräävä pintalaasti levitetään kahtena kerroksena ja runsaalla suolarasituksella käytetään pintalaastin alla huokoista pohjalaastia, joka lisää rappauskerrosten suolansitomiskapasiteettia. Suolarasitus on runsasta jos suolapitoisuus on kloridien osalta yli 0,5 painoprosenttia, nitraattien osalta raja-arvona on 0,3 painoprosenttia ja sulfaateilla 1,5 painoprosenttia.

Taulukko 4.5. WTA-ohjeessa esitetyt rakenteen suolapitoisuuden ja tarvittavien erikoislaasteilla tehtävien korjaustoimenpiteiden ohjearvot. [35]

Suolarasitus				Toimenpide	Paksuus
klorideja	< 0,2	paino-%	kuormitus pieni - ei tarvita toimenpiteitä	Tartuntalaasti	≤ 0,5 cm
nitraatteja	< 0,1	paino-%		WTA-saneerauslaasti	≥ 2,0 cm
sulfaatteja	< 0,5	paino-%			
klorideja	0,2 - 0,5	paino-%	kuormitus keskisuu-ri - korjaustoimenpiteitä yksittäistapa-uksissa	Tartuntalaasti	≤ 0,5 cm
nitraatteja	0,1 - 0,3	paino-%		WTA-saneerauslaasti	1- 2 cm
sulfaatteja	0,5 - 1,5	paino-%		WTA-saneerauslaasti	1- 2 cm
klorideja	> 0,5	paino-%	kuormitus suuri - tarvitaan korjaus-toimenpiteitä	Tartuntalaasti	≤ 0,5 cm
nitraatteja	> 0,3	paino-%		WTA-pohjalaasti	≥ 1,0 cm
sulfaatteja	> 1,5	paino-%		WTA-saneerauslaasti	≥ 1,5 cm

Kerroksittain asennettavan laastin asennuksessa on tärkeää urittaa alemman laastikerroksen pinta, jotta saadaan parempi tartuntapinta laastikerrosten välille. Ennen uuden laastikerroksen asennusta on noudatettava laastivalmistajan käyttö- ja kuivamisaikaohjeita. Ennen pintojen maalausta on suositeltu noudatettavaksi 1 päivän odotusaikaa kutakin laastikerroksen millimetriä kohden (1 päivä/mm kerros laastia), etenkin yli 20 mm paksujen laastikerrosten osalta.



Kuva 4.5. Suolankeräyslaastirappausta on käytetty seinän alaosassa osittaiskorjauksena.

Suolankeräyslaasteja käytettäessä ei ole välttämätöntä uusia kaikkia sisäpinnan rappauksia, vaan onnistunut korjaustulos voidaan saavuttaa vaihtamalla kastuneeksi ja vaurioituneeksi todetun alueen rappaukset suolaakeräviin laastirappauksiin. Suositeltavaa on vaihtaa rappauksia hiukan kosteaa aluetta laajemmalle, jotta voidaan varmistua siitä, että laastikorjausta tehtäessä käytettävä vesi ei aiheuta imeytyessään rakenteessa olevien suolojen siirtymistä korjausalueen viereen. Kuvassa 4.5 on rakenteen alaosan rappaukset poistettu ja asennettu tilalle suolankeräyslaastirappaus.

Suolankeräyslaastien käyttämisessä tehtyjä virheitä

Suolankeräyslaastikorjausten onnistumisen ja toiminnan kannalta on tärkeää noudattaa annettuja kerroksia ja kerrosvahvuuksia sekä odotusaikoja. Näiden lisäksi rappauserosten tulisi kuivua kovettumisajan sisällä, joka on tyypillisesti 28 vuorokautta. [35] Rappaukset on jälkihoidettava liian nopean kuivumisen estämiseksi muovisuojauksen ja tarvittaessa vesisumutuksen avulla. Jotta laastien hydrofobinen toiminta alkaisi mahdollisimman nopeasti, tulisi korjattavan tilan ilmankosteuden olla alle RH 65 %. Mikäli kosteus on liian korkea, on suolojen pääsy rakenteen pinnalle mahdollista, sillä laastin sitoutumisessa ei pääse tapahtumaan tarkoituksenmukaista huokosrakenteen muodostumista. Etenkin kesäaikana tehtävissä korjauksissa voi korjattavan tilan ilmankosteus nousta rappaustyön jälkeen huomattavan korkeaksi. Tällöin rappausten kuivumista tulisi edesauttaa koneellisen kuivatuksen avulla tai tehostamalla tilan ilmanvaihtoa.

WTA-ohje ei suosittele erillisen kemiallisen suolansitomiskäsittelyn käyttöä korjauksissa, sillä sen vaikutuksesta helppoliukoiset suolat voivat muuttua vaikealiukoisiksi suolayhdisteiksi [35, s.13]. Tällöin niiden kulkeutuminen suolankeräyslaastiin veden välityksellä estyy ja seurauksena voi olla suolojen kertyminen rakenteeseen. Vastaavasti myös Frössel ei suosittele kemiallisia suolansitomista varten kehitettyjä korjauskäsittelyjä [20, s.312]. Osassa Saksassa markkinoilla olevien suolansitomiskäsittelyjen kemiallisissa prosesseissa voi syntyä liukoista natriumkloridia sivutuotteena, osassa käsittelyistä reaktiossa voi syntyä myrkyllistä lyijyheksafluorosilikaattia.

Weber on esittänyt suolankeräyslaasteja koskevassa artikkelissaan tyypillisimmät virheet, joita laasteja käytettäessä tehdään [39]. Myös Janotte on käynyt läpi suolankeräyslaastikorjauksia ja antaa ohjeita virheiden välttämiseksi [38].

Yleisimmät virheet suolankeräyslaasteja käytettäessä:

- Tiiliseinää ei ole puhdistettu (kuva 4.6) tai esivalmisteltu riittävän huolellisesti (kastelu).
- Tiilimuuraus on liian heikko eikä sillä ole riittävää lujuutta.
- Tartuntalaasti on asennettu liian paksuna kerroksena.
- Heikon huokoisen laastin sijaan on käytetty liian suuren lujuuden omaavaa yhteinäistä tasoituslaastia (saneerauslaastiin syntyy halkeamia).
- Saneerauslaastikerroksen paksuus vaihtelee.
- Saneerauslaastikerros on liian ohut, jolloin se voi kuivua liian nopeasti ja laastikerros ei sitoudu täysin ja sen lujuus jää alhaiseksi.
- Kaksikerroksisen laastin alemmaa kerrosta ei ole riittävästi avattu (auki kamppaaminen).
- Saneerauslaastia ei ole sekoitettu ohjeen mukaisesti (liian vähän ilmahuokosia).
- Saneerauslaastia on sekoitettu liian kauan, jolloin muodostuu suuri huokoisuus, joka heikentää laastin lujuutta.
- Saneerauslaastit asennetaan liian suuressa tai alhaisessa ilmankosteudessa (suositus RH 40..70 %).

- Pinnoitekerros omaa liian alhaista vesihöyrynläpäisevyyden ja / tai liian huonon vedenhylkivyyden.
- Kipsilaastia käytetään sähköasennusten paikkaamiseen.



Kuva 4.6. Osittaiskorjaus kostealle massiivitiiliseinälle. Alustan puhdistusaste on riittämätön. Korjausalueen yläpuoliset seinäpinnat on suojattu muoveilla töiden suorituksen ajaksi, millä estetään säilytettävän pinnan pölyntyminen, mikä helpottaa huomattavasti korjauksen jälkeistä siivousta.

Osa edellä käsitellyistä virheistä on selkeästi työtekniikkaan liittyviä ongelmia, joiden esiintymiseen voidaan vaikuttaa työntekijöiden ohjeistamisella ja huolellisella työn suorituksella. Alustan puhdistuksen osalta on erityinen huomio kiinnitettävä siihen, että vanha suolaa sisältävä rappaus sekä suolavaurioituneet saumalaastit poistetaan ja huolehditaan huolellisesta alustan puhdistuksesta ilman kosteutta, joka voi imeyttää suolaa takaisin rakenteeseen.

Ansorge esittää suolankeräyslaastirappauksen kestoikäksi 5..15 vuotta, jonka jälkeen se tulee uusiksi [40, s.43]. Kyseinen arvio koskee kuitenkin julkisivurappauksen kestoikää, joten päätelmiä sisäpuolisten korjausten kestoikästä ei voida tehdä. Lähteissä on myös kuvia kohteista, joissa korjattu julkisivupinta on täysin vaurioton 20 vuoden kulluttua korjauksesta. Yhtäläistä arviota suolankeräysrappauksen kestoikälle ei voida antaa, sillä rappauksen suolankeräyskyky ja siten käyttöikä riippuu rakenteen kosteusolosuhteista, suolarasituksen määrästä sekä rappauksen paksuudesta. Korjauksen käyttöikä määräytyy täysin kohdekohtaisesti. Kestoikään vaikuttaa huomattavasti rappauksen huokosrakenne ja huokostilavuus, joten rappauksen toteutuksella on suuri merkitys korjauksen onnistumisessa. Mikäli työn toteutuksessa on ongelmia, ei välttämättä saavuteta suunnitelman mukaista huokoisuutta ja rappauksen kestoikä jää lyhyeksi.

4.3.4 Hauteet, uhrautuvat haudelaastit ja muut suolanpoistomenetelmät

Hauteet

Hauteet ovat rakenteissa olevien suolojen poistoon kehitettyjä kapillaarisuuteen perustuvia käsittelyjä. Suolojen poistaminen rakenteista erilaisten hauteiden avulla edellyttää kolmen prosessin, liukenemisen, diffuusion sekä kiteytymisen, käynnistymistä. Haudemenetelmissä on erilaisia toimintatapoja: osassa käsiteltävä pinta esikastellaan joko osittain tai mahdollisimman syvälle ennen hauteen laittamista, hauteina voidaan käyttää sekä nestemäisinä että kuiva-aineina levitettäviä aineita. Hauteina käytettäviä aineita ovat yksinään tai sekoituksina käytettävät erilaiset savet, selluloosayhdisteet sekä muut aineet, kuten kalkki, piihöyry, kivivilla tai tekokuitusienet. [41]

Menetelmä perustuu periaatteessa siihen, että rakenteen suolat siirtyvät kosteuden mukana hauteeseen tai hauteen pinnalle alentaen korjattavan rakenteen suolapitoisuutta. Menetelmä soveltuu lähinnä historiallisesti arvokkaiden kohteiden korjauksiin, jossa suolarasitettua pintaa ei voida muulla tavoin korjata. Frössel'n mukaan haudekäsittelyt ovat aikaa vieviä ja kalliita, mistä johtuen ne soveltuvat lähinnä suhteellisen pienien pintojen ja rakennusosien käsittelyyn [20, s.501].

Haudelaastit

Erityisen suurta suolarasitusta vastaan tarkoitettuja uhrautuvia laasteja, haudelaasteja, käytetään pääasiassa suojaamaan koristemaalattuja seinä- ja kattopintoja tai patsaita. Näiden laastien käyttöikä on yleensä muutamia viikkoja ja tarkoituksena on poistaa rakenteesta suolaa, jolloin alla olevan pinnan suolarasitus vähenee.

WTA-ohjeen [33] mukaisten haudelaastien ominaisuuksia on esitetty taulukossa 4.2. Haudelaasteille on ominaista suuri, yli 60 tilavuusprosentin huokoisuus, minkä takia rappauksen vesihöyryn läpäisevyys sekä suolojen keräyskyky on huomattavasti suolan-keräyslaasteja suurempi. Haudelaastien käyttäminen on hyvin yleistä, mutta osassa kohteista tulokset eivät ole olleet hyviä [41]. Haudelaastien ominaisuuksiin kuuluu, se että käsittelyn aikana rappauksen pinta ei ole ulkonäöltään tasaisen siisti, vaan siinä voi esiintyä kosteusläiskiä sekä suolakiteytymiä.

Haudelaasteja voidaan käyttää myös alentamaan suolavaurioituneen tiilimuurauksen suolapitoisuutta ennen varsinaisen rappauskorjauksen suorittamista. Tällöin haudelaasti asennetaan muutamiksi viikoiksi rakenteeseen keräämään tiilirakenteessa olevat suolat, ja suolaa pinnalleen kuljettanut rappaus poistetaan ennen huokoisia suolaa kerääviä rappauslaasteja. Mikäli korjattavassa pinnassa on säilytettäväksi aiottuja maalauksia, tulee ennen korjauksiin ryhtymistä tehdä pieni koalue, jotta varmistetaan käsittelyn ja alustan yhteensopivuudesta.

Säilytettävän pinnan ja laastikerroksen välissä käytetään erotuskaistana huokoista paperia, kangasta tai vastaavaa erottavaa kerrosta, joka estää alustan vaurioitumisen laastikerrosta poistettaessa. Erotuskaistan tulisi olla mahdollisimman hyvin kosteutta ja suoloja läpäisevä, jotta suolanpoistaminen olisi tehokasta. Ennen korjauksia tulee dokumentoida tarkasti alla olevan pinnan maalaukset, jotta mahdolliset työnaikaiset vauri-

ot voidaan korjata. Ennen haudelaastien asennusta alustan rappaus saatetaan kastella, jotta saadaan kiihdytettyä suolan kulkeutumista.

Yhtenä haudelaastien käyttösovellutuksena on niiden käyttäminen merenpinnan noususta johtuneiden tulvien vaurioittamien rakennusten korjauksissa. [42] Haudelaasteilla voidaan poistaa suolaisen tulvaveden mukana rakenteisiin imeytyneet suolat ja vähentää rakenteen kuivumisen yhteydessä syntyvien suolavaurioiden määrää.

Muut suolanpoistomenetelmät

Muita suolanpoistomenetelmiä ovat sähköiset elektro-osmoosiin perustuvat käsittelyt, injektointihaudemenetelmät sekä olosuhteiden hallintaan perustuvat vaurioitumisen estämiseen tähtäävät menetelmät.

Vergès-Belmin ja Siedel [41] jakavat haudelaastien lisäksi käytettävät suojojenpoistomenetelmät kolmeen ryhmään:

- menetelmiin, joiden tarkoituksena ei ole poistaa suojoja, vaan joko tehdä niistä liikkumattomia tai estää niiden vaikutukset säätelemällä tilojen ilmanvaihtoa ja kosteutta
- menetelmiin, joiden avulla suojoja poistetaan rakenteista joko diffuusion, sähköisen kulkeutumisen tai konvektion avulla
- vielä kokeellisella asteella oleviin mikrobiologisiin reaktioihin tai mikroaalto-uunimenetelmiin.

Suolanpoistomenetelmiä on tutkittu EU:n rahoittaman DESALINATION-tutkimushankkeen³ yhteydessä. Tutkimushankkeen tarkoituksena on ollut saada lisää tietoja suojojen kulkeutumisesta ja erilaisten suolanpoistomenetelmien käytön rajoituksista ja mahdollisuuksista.

4.3.5 Vedentiivistyslaastit

Yleistä

Vedentiivistyslaasteja käytetään maakosteuden, ei-paineellisen veden sekä paineellisen veden rasittamien tiili- ja betonirakenteiden sisäpuoliseen korjaamiseen, joiden ulkopuolisen vedeneristyksen korjaaminen ei ole mahdollista. Vedentiivistyslaastit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään, vedentiivistysrappauksiin eli sulkulaasteihin, vedentiivistyspinnoitteisiin sekä huokosiin tunkeutuviin tiivistyslaasteihin sivun 49 kuvan 4.2 mukaisesti. Kaikki tiivistyslaastit ovat sementtisineaineisia. Erona niillä on erilainen kerrosvahvuus: vedentiivistysrappauksissa käytetään kerrosvahvuudeltaan vähintään 10 mm kerroksena levitettävää rappauslaastia, kun taas vedentiivistyspinnoitteet sekä huokosiin tunkeutuvat laastit levitetään 2..3 mm paksuisena kerroksena.

³ Assessment of Desalination Mortars and Poultices for Historic Masonry Instrument. Tutkimushankkeen tiedotuskanavana toimii kotisivut Internetissä www.bk.tudelft.nl/desalination

Tiivistyslaastien jaottelu voidaan tehdä laastien ainesosien mukaisesti mineraalisiin ja polymeerivahvistettuihin sementtilaasteihin. Tiivistyspinnoitteet voidaan jakaa edelleen kahteen ryhmään, mineraalisiin laasteihin (jäykkä) sekä polymeerivahvistettuihin laasteihin (elastisiin).

Saksalaisissa lähteissä vedentiiivistysrappauksista käytetään nimitystä sulkulaastit (sperrputze) ja vedentiiivistyslaasteista nimeä tiivistysslammi (dichtungschlämme). Suomenkieleen soveltuva nimitys tiivistysslammin sijaan on vedentiiivistyspinnoite. Paksumpina kerrosvahvuuksina asennettavia sulkulaasteja käytetään tyypillisimmin massiivitiilirakenteiden korjaamisessa alustan tasaamiseen ja vedentiiivistämiseen. Usein sulkulaastirappauksen päälle asennetaan varsinaiseksi vettäpidättäväksi kerrokseksi ohuempi vedentiiivistyspinnoite suojarappauksineen. Vedentiiivistyspinnoitteita käytetään sulkulaastirappausta useammin betonirakenteiden sisäpuolisissa korjauksissa.

Mineraalisten vedentiiivistysrappauksien ja vedentiiivistyspinnoitteiden toimintatapa on sama, molemmat estävät nestemäisen veden tunkeutumisen rakenteen läpi. Laastien käyttötapa on verrattavissa jo 1900-luvun alusta lähtien käytössä olleisiin vesitiiviisiin betoneihin, joissa sementtikiveen muodostuu vesitiiviitä huokosia. Tavallista sementtilaastia parempi vesitiiviyys saavutetaan soveliaan huokosrakenteen, sementtipitoisuuden ja alhaisen vesi-sementtisuhteen avulla [43, s. 95].

Korjattava rakenne säilyy kosteana korjauksen jälkeenkin, mikä on huomioitava jälkikäteen tehtävissä kosteuskartoituksissa, kosteusmittauksissa sekä tilojen kalustuksessa. Paineellista vettä vastaan tehtävissä tiivistyskorjauksissa on tiivistyskerroksen kestettävä 1,5 barin vedenpaine.

Historia ja käytön ohjeistus

Tiivistäviä pinnoitteita on käytetty jo 1900-luvun alusta lähtien julkisivujen rappauksissa. Vesirakentamisessa betonia tiivistävät lisäaineet ja pinnoitteet ovat olleet käytössä kauan. Vastavia tiivistyspinnoitteita on otettu käyttöön myös maanvastaisten rakenteiden sisäpuoliseen tiivistämiseen yhä enenevässä määrin [40, s.42-43; 44, s.236]. Ensimmäiset mineraaliset tiivistyslaastit tulivat markkinoille 1950-luvulla ja 1970-luvulla kehitettiin muovilisäaineiset (polymeerivahvistetut) joustavat tiivistyslaastit [44, s. 215].

Tiivistyslaastien käytön ohjeistus on korjausten pitkstä perinteestä huolimatta vielä kesken. Saksan rakennemääräyksissä kosteutta koskeva vuonna 2000 uudistettu DIN 18195 ei määrittele tiivistyslaastien käyttöä lainkaan maanvastaisten rakenteiden korjaamisessa. Aiheesta on julkaistuja joitakin ohjeita vuosien mittaan eri tahojen toimesta (mm. WTA ja Deutschen Bauchemie e.V), mutta niissä on kuitenkin merkittäviä puutteita etenkin käyttökohteissa. [43, s. 97-98] Kirjallisuudessa on esitetty tiivistyslaastien käyttäminen seinien sisäpuolisen tiivistämisen lisäksi myös alapohjalaattojen vedeneristeenä maakosteutta vastaan [23s.132; 44, s.236-237]

Suomessa keväällä 2009 voimaan tulleessa perusmuurien vedeneristystä koskevassa RT-ohjekortissa vedentiiivistyslaastit on otettu hyvin lyhyellä maininnalla mukaan yhtenä rakenteiden korjausvaihtoehtona. On todennäköistä, että vedentiiivistyslaastit tulevat

mukaan myös parhaillaan työn alla olevaan, paineellista vedeneristystä koskevaan RT-ohjekorttiin.

WTA on ohjeistanut maanvastaisten rakenteiden jälkikäteen tehtäviä tiivistyskorjauksia, mutta kyseisen ohjeen seinäpintojen sisäpuolisia toimenpiteitä koskevat menetelmät sisältävät vain tiivistyspinnoitteilla tehtävät korjaukset [45]. Tiivistysrappauslaasteja on ohjeessa käytetty vain rakenteiden rajapintojen korjaamiseen, vaikka ne ohjeessa esitetyn taulukon mukaan soveltuvat myös seinäpintojen tiivistämiseen (taulukko 4.6).

Taulukko 4.6 Vedentiivistyslaastien ohjeelliset kerrosvahvuudet WTA-ohjeen 4-6-05/D [45] mukaan

Kosteusrasitus	Tiivistyspinnoitteet		Tiivistysrappaukset	
	Kokonaiskerros- vahvuus	Kerros määrä	Kokonaiskerros- vahvuus	Kerros määrä
Maakosteus	2 mm	2	20 mm	2 - 3
Paineellinen vesi	3 mm	3	30 mm	3

Osittain tiivistyslaasteja koskevan ohjeistuksen luomista on voinut vaikeuttaa se, että on olemassa useita erilaisia sisäpuoliseen korjaamiseen soveltuvia tiivistyspinnoitteita. Tuotteiden erilaisuudesta riippumatta pitäisi pystyä luomaan jonkinlainen ohjeisto, jossa käytäisiin läpi sisäpuolisten tiivistyspinnoitekorjausten lähtökohdat ja jättää tarvittaessa suunnittelijoiden ratkaistaviksi eri materiaalien väliset erot ja vaikutukset korjausten suorittamiseen.

Edellä mainittujen rappaus- ja pinnoitustuotteiden lisäksi markkinoilla on etenkin betonirakenteille tarkoitettuja laastikäsitteilyjä, joissa rakenteen pinnalle levitetty sementtipohjaisen tuotteen lisäaineet reagoivat kosteuden ja betonin mineraalien kanssa. Reaktiossa huokosiin muodostuu vedentiiveyttä parantavia kiteitä. Osalla tuotteista materiaali-toimittajat kertovat kiteytymisen jatkuvan läpi koko rakenteen.

Tiilimuuratuilla rakenteilla sulkulaasti asennetaan suoraan puhdistetun tiilipinnan päälle yhtenä tai kahtena kerroksena. Tiivistyspinnoitteen asentaminen suoraan tiilipinnan päälle ei ole suotavaa, sillä rakenteen epätasaisuuksista johtuen laastipintaan voi jäädä epäjatkuvuuskohtia. Suositeltavampaa on käyttää ohuiden tiivistyspinnoitteiden alla tasoituslaastikerrosta.

Tiivistysrappaukset eli sulkulaastit

Sulkulaastit (Sperrputze, Sperrmörtel) ovat vesihöyryä läpäiseviä sementtipohjaisia laasteja, jotka kuuluvat saksalaisessa laastiluokituksessa luokkaan PIII. Sulkulaasteja käytetään sekä sisä- että ulkopuolisissa eristyksissä maakosteutta sekä ei-paineellista vettä vastaan. Niiden huonona puolena on sementtilaasteille ominainen korkea halkeiluherkkyys. Sulkulaasteja käytettäessä on tärkeää saavuttaa hyvä tartunta alustaan, mikä useimmiten saadaan käyttämällä tartuntapohjalaasteja. Laastin tarvittava kerrosvahvuus riippuu käytettävästä tuotteesta sekä rasituksesta, yleensä kerrosvahvuus vaihtelee 10..20 mm. [20, s. 217-218]

Sulkulaastien tiivistävä vaikutus johtuu niiden pienestä huokoisuudesta. Käyttämällä tiettyjä lisäaineita sekä raekokojakaumaa voidaan saavuttaa kovettuneella laastilla hyvin tiivis huokoskoostumus. Koska sulkulaasteilla on hyvin korkea hienoaineksen määrä, voi niiden pintaan muodostua tietyillä kerrosvahvuuksilla kutistumishalkeamia. Kutistumishalkeamien syntymistä voidaan ehkäistä käyttämällä ohuempia kerrosvahvuuksia, mikä taas johtaa useiden kerroksien asentamiseen, jotta saavutetaan tarvittava kokonaiskerrosvahvuus. Halkeamien syntymisriskiä voidaan vähentää noudattamalla kerrosten välisiä kuivumisaikoja ja suojaamalla laastipinnat liian nopealta kuivumiselta.

Sulkulaastit valmistetaan sementtिलाastista, johon sekoitetaan suhteessa 1:2 tai 1:3 hienojakoista hiekkaa, jonka raekoko alle 3 mm ja jonka hienoainespitoisuus (raekoko < 0,25 mm) on 20 paino-%. Laastin vesi-sementtisuhde tulisi ohjeiden mukaan rajoittaa 0,5:een. Lisäksi osassa tuotteita käytetään erillisiä laastin tiiveyttä lisääviä tiivistysaineita, jotka rajoittavat huokosten muodostumista laastiin tai vähentävät vesipakoisuutta.

Paksut sulkulaastit levitetään vähintään kahtena kerroksena. Ensimmäisen kerroksen kuivuttua riittävästi, mutta ollessa edelleen mattakostea, suoritetaan toisen laastikerroksen asennus. Mikäli pohjalaasti on kuivunut kokonaan, on käytettävä erillistä tartunta-pohjalaastia, jotta varmistetaan rappauskerrosten välisen tartunnan muodostuminen ja vedentiiivistävyyden saavuttaminen.

Sulkulaasteilla ei saavuteta vastaavaa vesitiiveyttä kuin ulkopuolelle asennettavilla bitumi-paksukalvopinnoitteilla, bitumikermieristyksellä ja patolevyillä. Sulkulaastien toimintaperiaate perustuu siihen, että sulkulaastin läpi pääsee vain vähäinen määrä kosteutta. Yleensä sulkulaasteja käytetäänkin rakenteiden ulkopinnassa bitumipaksupäällysteiden, muovi- ja bitumilevyjen alla tai rakenteen sisäpinnoilla mineraalisten tiivistyslaastien (slammien) pohja- ja tasoituslaastina. Sulkulaastien ”paremmuus” tiivistysslammeihin nähden perustuu niiden oleellisesti paksumpaan kerrosvahvuuteen. Sulkulaastit ovat vähemmän herkkiä vaurioitumaan iskujen vaikutuksesta, alustan pienet epätasaisuudet on helpompi tasoittaa ja liian nopean kuivumisen vaara on pienempi kuin tiivistysslammeilla.

Tiivistyslaastit eli tiivistyspinnoitteet

Rakenteen sisäpuolisessa tiivistämisessä vuotovesiä vastaan käytettävien vedentiiivistyspinnoitteiden vähimmäiskerros-paksuus on 2 mm:ä. Tarvittava kerros-paksuus määritellään korjattavan rakenteen tiiviyksasteen ja vedenpaineen perusteella. Rakenteen korjauksessa käytettävien vedentiiivistyspinnoitteiden ominaisuuksia voidaan muokata käyttämällä lisäaineita. Esimerkiksi ”turvottavien ” lisäaineiden avulla voidaan parantaa laastin vedentiiivistävyyttä [43, s.95] tai lisäämällä muovipohjaisia lisäaineita voidaan saavuttaa parempi joustavuus ja sitä kautta parempi halkeilunkestävyys.

Erilaisten ominaisuuksien takia tiivistyspinnoitteet on suositeltavaa jakaa kahteen ryhmään, mineraalisiin (jäykkiin) sekä polymeerimodifioituihin (elastisiin) tiivistyslaasteihin. Ruhnau et al. mukaan joustavasta tiivistyslaastista käytetään myös nimitystä dispersio-sementti-pinnoite sekä muovi-laastiyhdistelmä [43, s.95]. Taulukossa 4.7 on kä-

sitelty jäykkien mineraalisten sekä elastisten polymeerimodifioitujen laastien ominaisuuksia keskittyen niiden eroihin.

Taulukko 4.7 Jäykkien ja elastisten vedentiivistyspinnoitteiden merkittävimmät erot ominaisuuksissa mukaillen [20, tab. 5.9 s. 225]

Ominaisuus	Tiivistyspinnoite, mineraalinen (jäykkä)	Tiivistyspinnoite, polymeerimodifioitu (elastinen)
huokosjakauma		
< 1 mm	≥ 45 tilavuus-%	≤ 45 tilavuus-%
< 0,09 mm	≤ 55 tilavuus-%	≥ 55 tilavuus-%
sitoutumisaika		
alkaa	≥ 1 tunti	-
loppuu	≤ 12 tuntia	-
kutistuminen	≤ 2,0	-
halkeamansilloituskyky	-	≥ 0,4 mm
vesihöyrynläpäisevyys μ	≤ 200	≤ 2000
vedenläpäisevyys	vettäläpäisemätön	vettäläpäisemätön
kapillaarinen kosteuden imeytyminen	≤ 0,1 kg/m ² h ^{0,5}	-
tartunta-alustaan	≥ 1,0 N/mm ²	≥ 0,5 N/mm ²

Mineraalisten tiivistyslaastien materiaaliominaisuudet muistuttavat saneerauslaasteja tai sulkulaasteja ja ne omaavat polymeerimodifioituja tiivistyslaasteja paremman vesihöyrynläpäisevyyden. Jäykkä tiivistyslaasti koostuu hydraulisesti sitoutuvista mineraalisista ainesosista, joista veteen sekoitettuina saadaan hienojakoinen laasti. Mineraalisella laastilla on huomattavasti pidempi sitoutumisaika verrattuna polymeerimodifioituun tiivistyspinnoitteeseen. Materiaalien merkittävin ero on niiden vesihöyrynläpäisevyydessä sekä elastisuudessa. Kuvassa 4.7 on nähtävissä ruiskuttamalla asennettu mineraalinen vedentiivistyspinnoite kuivumisen jälkeen. Kuivasta pinnoitteesta on otettu näyte kuivakalvonpaksuuden selvittämiseksi.



Kuva 4.7. Ruiskuttamalla asennettu vedentiivistyspinnoite, josta on tarkastettu kuivakalvonpaksuus. Tiivistyslaastit valmistetaan hyvin hienojakoisesta sementistä, mikä on nähtävissä valmiin pinnan sileytenä.

Jäykät tiivistyslaastit voidaan pohjatöiden jälkeen asentaa suoraan kantavan rakenteen pintaan. Ne kiinnittyvät myös kosteille alustoille ja ovat yksinkertaisia työstää. Materiaalin heikosta elastisuudesta ja huonosta silloituskyvystä johtuen niitä on suositeltavaa käyttää vain vähän liikkuville alustoille ja ehjille pinnoille. Rakenteiden liittymissä on suositeltavaa käyttää elastisia tuotteita, jotta varmistetaan korjauksen onnistuminen. Ruhnau et al. esittävät, että joidenkin materiaalitoimittajien ohjeissa on rajoituksia uuden betonin pinnoittamiseen vedentiiivistyslaasteilla. Uusien betonien kuivumisen aikaisen kutistumisen aiheuttaman halkeilun takia pinnoitus voidaan tehdä vasta 6 kuukauden kuluttua valusta. [20, s. 227; 43, s.96]

Rakenteeseen tunkeutuvat tiivistyspinnoitteet

Rakenteen pintaan asennettavien laastimuotoisten tiivistyspinnoitteiden lisäksi rakenteiden korjaamisessa on käytetty etenkin betonirakenteilla laasteja, joissa on kosteuden vaikutuksesta kemiallisesti reagoivia ja betonin huokosiin tunkeutuvia ainesosia. Materiaalivalmistajien mukaan näissä yleensä ohuena kerroksena harjaamalla levitettävissä laasteissa on tehoaineita, jotka pystyvät tunkeutumaan lähellä betonin pintaa oleviin huokosiin ja tiivistämään huokokset vettä läpäisemättömiksi. Muutamien tuotteiden osalta tiivistävän vaikutuksen kerrotaan etenevän läpi koko rakenteen. Osassa käsittelyistä tiivistyslaasti poistetaan tietyn vaikutusajan jälkeen ja pinta käsitellään vesihöyryä hyvin läpäisevällä maalipinnoitteella.

Tiivistävien laastikorjauksien käyttäminen

Tiivistyslaastien käytön ja valinnan yhteydessä on huomioitava laastien erilaiset ominaisuudet. Polymeerimodifioidut tiivistyslaastit ovat vedentunkeutumisen kannalta kaikkein tiiveimpiä sekä sopivat myös heikolle ja halkeilleelle alustalle. Niiden vesihöyrynläpäisykyky on tiivistyslaasteista heikoin, minkä takia alustaan voi alkaa kertymään kosteutta. Mineraaliset tiivistyslaastit sekä sulkurappaukset läpäisevät diffuusiolla siirtyvää kosteutta huomattavasti paremmin, jolloin alusta pystyy jossain määrin kuivamaan sisälle päin, jos rakenteen kosteusrasitus on ajoittain vähäisempää.

Tiivistyslaasteilla korjatun rakenteen taustan korkea kosteuspitoisuus on suositeltavaa huomioida sisätilojen kalustuksessa. Paineellisen veden rasittamissa rakenteissa tulee erityistä huomiota kiinnittää rakenteeseen tulevien kiinnikkeiden tai läpivientien asennukseen ja niiden tiiviiden varmistamiseen. Tiivistyslaastilla käsiteltyyn pintaan ei voida kiinnittää mitään orgaanisia, laholle tai homeelle alttiita materiaaleja. Korjausten yhteydessä tulee siis välttää puisten jalkalistojen tai rakennuslevyistä tehtyjen kaapistojen asentamista kiinni korjattuun seinäpintaan. Puisia jalkalistoja voidaan käyttää, mikäli niiden taustapinnat suojataan puunsuoja-aineella, listat asennetaan hiukan irti seinäpinnasta ja seinäpinnassa käytetään kosteuden kulkua hidastavaa tai estävää vedenerist- tai epoksikäsitelyä jalkalistan kohdalla.

Haack et al. [44, s.236-237] mukaan sisäpuolisen tiivistämisen yhteydessä tulee kiinnittää erityisesti huomioita tiivistyspinnoitteen pohjaan. Muurausten saumat ovat usein vajaita etenkin alimpien vaakasaumojen osalta ja pinnoissa voi olla halkeamia, tapetteja ja vanhoja laasteja. Vedentiivistyslaastit asennetaan puhtaalle betoni- tai tiilipinnalle, joten pinnoista täytyy poistaa kaikki vanhat rappaukset ja tasoitteet samoin kuin maali- tai tapettiliisterikerrokset. Tällä varmistetaan riittävän lujan tartuntapohjan saavuttaminen.

Pystysuuntaisen vedentiivistyslaastin asentaminen seinärakenteeseen ei yksistään estä kapillaarista kosteuden nousua, jolloin rakenteessa oleva kosteus voi edelleen nousta rakenteessa kapillaarisesti. Vauriot voivat näkyä vasta, kun pitkäaikaisen kosteuden vaikutuksen takia liuenneet suolat kohottavat rakenteen suolapitoisuuden tiivistyslaastin vaikutuskohdan yläpuolelle. [43, s.97] Jos rakenne on käsitelty tiivistyslaastilla yläpuoliseen välipohjaan asti, voi kosteus vaurioittaa välipohjarakenteen reuna-alueita. Yhtenä vaurioreittinä on kosteuden siirtyminen betonisesta kellarin seinästä yläpuoliseen massiivitiiliseinään, jonne päästyään kosteus voi nousta nopeasti tiilirakenteen kapillaarihuokosissa.

Ongelman välttämiseksi tulisi käyttää tiivistyslaastien yläpuolella kapillaarisen kosteuden nousun katkaisevaa injektointi-, tms. kerrosta. Kapillaarikatkon avulla estetään kosteuden ja suolojen siirtyminen tiivistyslaasteilla tehdyn korjausalueen yläpuolelle ja muodostetaan seinään tiivistyslaastin ja injektointivyöhykkeen muodostama yhtenäinen tiivistysvyöhyke, jonka taustapinta on ajoittain kosteampi.

Vedentiivistyslaastikorjauksissa useimmiten ongelmiksi muodostuvat rakenteiden liitoskohdat, kuten maanvastaiseen seinään liittyvä kantava väliseinä tai putkiläpiviennit. Näiden ongelmakohtien korjaamiseen WTA-ohje [45] antaa periaatteelliset ratkaisut. Väliseinärakenne voidaan erottaa maanvastaisesta seinästä purkamalla väliseinän reuna-alue, ja viemällä tiivistyslaastikerros yhtenäisenä maanvastaisen seinän alueella. Toisena vaihtoehtona on väliseinän liittymäkohdan injektoiminen ja tiivistyslaastikerroksen kääntäminen 20 cm verran väliseinäpinnalle. Putkiläpivientien osalta läpivienti voidaan tiivistää injektoimalla viistosti sivuilta tai poistaa putkiläpiviennin ympäriltä betonia tai tiilimuurausta, jonka jälkeen rakenteen pintaan asennetaan tiivistyslaastikerros ja rakenne tasoitetaan rappauslaastilla seinäpinnan tasoon. [45]

Vedentiivistyslaastit ovat vesihöyryä läpäisevä, minkä vuoksi niiden käyttöä on suositeltu rajoitettavaksi tiloissa, joissa ei ole erillistä huoneilman kuivatusta tai muuta varokeinoa kosteustasapainon rajoittamiseksi [43, s. 97]. Lähteessä on esitetty, että seinäpinnoille tiivistyvän kosteuden välttämiseksi on yleensä välttämätöntä asentaa tiivistyslaastin lisäksi saneerauslaasti. Mikäli tilan ilmanvaihto on riittävän tehokas ja pystyy poistamaan rakenteesta haihtuvan kosteuden sekä tilan lämpötila pysyy vakiona, voidaan näkyväksi pinnaksi jättää maalattu tiivistyslaastipinta tai valkosementistä valmistettua tiivistyspinnoitetta käytettäessä laastipinta. Tiivistyslaastipinta voidaan myös maalata vesihöyryä hyvin läpäisevällä maalilla.

4.4 Mineraalilevypinnoitus

4.4.1 Yleistä

Keski-Euroopassa useiden yhteistyötahojen toimesta EU:n tuella tehdyssä INSUMAT-tutkimuksessa⁴ kehitettiin historiallisten rakennusten lämmöneristyksen sisäpuoliseen parantamiseen soveltuvia materiaaleja. Tutkimuksessa keskityttiin kapillaarisesti aktiiviseen kalsiumsilikaattilevyyn, jonka käyttämisestä oli saatu jo aikaisemmin hyviä kokemuksia. Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää optimaalinen materiaali, jossa yhdistyvät hyvä lämmöneristävyys sekä materiaalissa tapahtuva kosteusliike nestemäisen veden ja vesihöyryn osalta, niin että sisäpuolinen lämmöneristys voidaan toteuttaa rakennusfysikaaliselta kannalta turvallisesti. [46]

Tutkimuksessa käytetyn kalsiumsilikaattilevyn ainesosina ovat kalsiumoksidi, piioksidi, selluloosakuidut ja vesi. Kalsiumsilikaattilevyt valmistetaan märkäpuristamalla raaka-aineista sekoitetusta massasta levyjä, jotka paineistetaan ja kuivatetaan haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Keski-Euroopassa sisäpuoliseen korjaamiseen ja lämmöneristämiseen soveltuvia kalsiumsilikaattilevyjä on useiden materiaalitoimittajien valikoimissa. Eri valmistajien ilmoittamissa materiaaliominaisuuksissa on jonkin verran vaihtelua: osa levyistä on tarkoitettu ainoastaan lämmöneristeeksi, kun taas osa soveltuu erittäin kosteille alustoille hyvän kosteuden siirto- ja varastoimisominaisuutensa takia. Markkinoilla olevissa kalsiumsilikaattituotteissa on joitakin eroja valmistuksessa käytettyjen materiaalien, erityisesti lisäaineiden ja levyjen ominaisuuksien osalta, minkä takia levyjen käytön yhteydessä tulee huolehtia oikean tyyppisen levyn käyttämisestä.

4.4.2 Mineraalilevytyksen toimintatapa

Mineraalilevypinnoitusta voidaan käyttää kiviaineisten seinien sisäpuolisena lisälämmöneristeenä ja kosteiden seinärakenteiden pinnoitteena. Levytyksen avulla seinän pintalämpötila nousee, jolloin kosteuden kondensoitumista ei esiinny. Levytys läpäisee erittäin hyvin vesihöyryä ja se pystyy tasapainottamaan hygroskooppisuutensa takia sisäilman kosteutta.

Taulukossa 4.8 on esitetty muutamien levyvalmistajien tuotetiedoista kerättyjä materiaaliominaisuuksia. Tuotteiden 1 ja 3 ominaisuuksiin kuuluu erittäin hyvä veden imu- ja siirtokyky, minkä takia ne soveltuvat asennettavaksi muita kosteammille alustoille. Tuotteet 4 ja 5 ovat yksinomaan sisäpuoliseen lämmöneristämiseen käytettyjä tuotteita. Levyn 2 osalta ei ole ilmoitettu kapillaarisuusarvoa, joten levyn toiminta kapillaarisen kosteuden rasittamilla rakenteilla ei tiedetä. Kaikkien kalsiumsilikaattilevyjen pH-arvo on hyvin korkea, minkä takia levyissä ei ole homeen kasvun vaaraa ja ne soveltuvat hyvin kosteisiin olosuhteisiin.

⁴ INSUMAT - Development of specially designed insulation materials for building renovation, lisätietoa tutkimuksesta Internetissä <http://www.insumat.org>.

Taulukko 4.8. Eri kalsiumsilikaattituotteiden materiaaliominaisuuksia

	tiheys kg/m ³	lämmön- johtavuus [W/mK]	huokoi- suus paino-%	vesi- höyryn- vastus [-]	kapillaarinen ve- denimeytyminen	pH	puristus- lujuus [N/mm ²]
KaSi1	290	0,06	>90	5/6	270 paino-% , 71 kg/m ² s ^{0,5}	10,5	1,5
KaSi2	220	0,065	>90	6/4,5	0,776 kg/m ² s ^{0,5}	10	1,0
KaSi3	300	0,0626	84,2	4,6	830 kg/m ³ 77,54 kg/m ² h ^{0,5}	10,5	0,85
KaSi4	130	0,04	-	3/6	>185 kg/m ³ 0,417 kg/m ² s ^{0,5}	9,5	0,36
KaSi5	115	0,045	>95	3	-		0,315

Ulkopuolelta rakenteen läpi siirtyvän kosteuden rasittamalla rakenteilla levytys toimii kosteutta vastaanottavana kerroksena, joka luovuttaa kosteutta sisäilmaan vesihöyryä läpäisevän pintakäsittelyn läpi. Kalsiumsilikaattilevyt voidaan asentaa tiilimuuraukseen liittyvän puurakenteen ympärille ilman, että on vaaraa puurakenteen vaurioitumisesta.

Tehtyjen tutkimusten perusteella levyjen kiinnityslaastilla on huomattavasti levytystä alhaisempi lämmöneristävyys sekä vesihöyrynläpäisevyys. Tästä johtuen kiinnityslaastikerros toimii talvikaudella sisäpuolelta kulkeutuvan vesihöyryn sulkevana kerroksena hidastaen kosteuden siirtymistä syvemmälle seinärakenteen sisälle. Kondensoitumista tapahtuu yleensä sisäpuolisen lämmöneristyksen tapauksessa eristeen kylmällä puolella olevassa reunassa, missä sisäpuolelta tuleva kosteusvirta kohtaa kylmän pinnan. Kiinnityslaastin estäessä kosteuden siirtymisen, varastoituu kosteus kalsiumsilikaattilevytykseen. [47] Materiaalin kosteuden siirto- ja varastoisominaisuuksien avulla kondensoitunutta kosteutta voi jakautua levyyn suuria määriä ja kuivua vähitellen sisäilmaan.

4.4.3 Mineraalilevytyksen käyttäminen korjauksissa

Kalsiumsilikaattilevytys on hyvä korjausvaihtoehto rakenteille, joissa on ollut alun perin orgaaninen sisäpuolinen lämmöneristys. Levytyksellä saadaan vanhaa rakennetta vastaava kerrospaksuus helpommin kuin kosteutta kestävien rappauslaastikerrosten avulla ja lisäksi mineraalilevytyksen hyvät kosteustekniset ominaisuudet edesauttavat hallitsemaan rakenteen läpi kulkeutuvaa kosteutta sekä tasapainottamaan sisäilman kosteuden määrää. Kalsiumsilikaattilevyjä on saatavissa useita eri paksuuksia, 20..200 mm, jolloin rakenteiden korjaamisessa voidaan huomioida olemassa olevat säilytettävät rakenteet ja vaikuttaa levyn paksuuden valinnalla rakenteen lämmöneristävyyteen.

Kalsiumsilikaattilevytyksen toimintaa suolarasitetuilla tiilirakenteilla ei ole erikseen tutkittu. Huomioiden materiaalin suuri huokostilavuus, on todennäköistä, että levytys toimii jossain määrin suoloja keräävänä puskurina. Levyjen kiinnityslaasti voi kuitenkin

toimia suolojen kulkua estävänä kerroksena, minkä takia suolojen varastoimisen osalta tarvitaan lisää tutkimustietoa.

Yhtenä vaihtoehtona on asentaa ennen kalsiumsilikaattilevytystä rakenteen pintaan suoloja keräävä laastikerros, jolla voidaan varmistaa suolojen varastoituminen rakenteeseen. Laastikerros toimii myös oikaisu- ja tasoituslaastina, jolloin levytyksen asennus on helpompaa. Tätä korjausvaihtoehtoa ja sen toimivuutta ei saatujen tietojen mukaan ole kuitenkaan tutkittu. Betonirakenteilla suolan kehittyminen on yleensä vähäistä ja riski suolan aiheuttamasta levyjen kiinnityslaastin irtoamisesta on vähäinen.

4.4.4 Mineraalilevytyksen asennus

Ennen asennustyötä sisäpuoliset pinnoitteet, kuten heikot rappaukset, tapetti- ja maali-kerrokset poistetaan. Kalsiumsilikaattilevyt kiinnitetään puhdistettuun, imukykyiseen kiviaineiseen seinään sementtilaastilla sekä tarvittaessa myös mekaanisin kiinnittimin. Materiaalitoimittajien asennusohjeissa on pieniä eroja esikäsitteilyiden sekä levyjen kiinnityksen osalta [48, 49, 50, 51, 52]. Asennuksessa tulee huolehtia siitä, että levyjen taustapintaan ei jää ilmapälejä vaan koko rakenteen taustapinnalla on yhtenäinen kiinnityslaastikerros.

Osa materiaalitoimittajista ohjeistaa käyttämään alustan esikäsitteilyssä pintadesinfiointiainetta tai homeenkasvua estävää ainetta ennen levytyksen asentamista. Levyjen pinnat on käsiteltävä pohjusteella ennen asennusta sekä päälle tulevia maali-, rappaus- tai tasoitekerroksia. Tiililadonnalla asennetut levypinnat ylitasoitetaan, jonka jälkeen voidaan asentaa viimeistelypinnaksi vesihöyryä hyvin läpäisevä maali. Joissain tapauksissa pinnoitteeksi voidaan asentaa myös ohut, vesihöyryä läpäisevä paperitapetti, jonka paino on 90..110 g/m². Uudelleen pinnoituksissa tulee huomioida, että pintojen korjauksien yhteydessä vanhat pinnoitteet tulisi poistaa, jotta rakenteen vesihöyryn läpäisevyys säilyy.

4.5 Seinäkorjausten pintakäsittely

Kaikille maanvastaisten rakenteiden seinäpintojen korjauksille on yhteistä se, että mahdollinen pintakäsittely on tehtävä erittäin hyvän vesihöyrynläpäisevyyden omaavalla maalilla tai esimerkiksi värilaastilla. Tyypillisesti pintakäsittelyyn soveltuvia maaleja ovat julkisivumaalaukseen käytetyt silikoniharts-, silikoniemulsio- sekä dispersiosilikaattimaalit. Maalia valitessa tulee huomioida tilan käyttötarkoitus ja valita asuin- tai toimistokäytössä oleviin tiloihin mahdollisimman vähän liuottimia sisältäviä maaleja.

Haluttaessa korkeampaa vesihöyrynläpäisevyyttä, voidaan pinta jättää kokonaan käsittelemättä, sillä useimmat suolankeräyslaastien pintarappauslaastit sekä tasoitteet ovat valkosementistä tehtyinä väriltään valkoisia. Vaihtoehtoisesti pinta voidaan käsitellä värilaastilla. Suolankeräyslaasteilla pintakäsittelyn vesihöyrynläpäisevyydelle on WTA-ohjeissa annettu maksimiarvoksi $sd \leq 0,2$ m, millä varmistetaan rappauksen toimivuus.

4.6 Mekaaniset menetelmät

4.6.1 Yleistä

Mekaaniset menetelmät ovat vanhimpia jälkikäteen tehtäviä tiilimuurien tiivistystoimenpiteitä kapillaarisesti nousevaa kosteutta vastaan. [53, s.46] Mekaanisia menetelmiä kutsutaan saksalaisessa kirjallisuudessa myös muurin erottamiseksi, koska rakenne hal-kaistaan vaakasuunnassa. Vanhin mekaaninen korjaustapa on rakenteen alaosan purka-minen ja uudelleen muuraaminen kapillaarikatkon asentamisen jälkeen. Kehittyneempiä tapoja ovat kromiteräslevyn lyöminen sekä muurisahausmenetelmä.

*Taulukko 4.9. Mekaaniset menetelmät jälkikäteen tehtävissä vaakasuuntaisissa tiivistyk-
sissä [43, tab 2.21]*

	Levynlyöntimene- telmä	Mekaaniset muuri-, voima- ja muurisahaus menetelmät	Muuriketjusaha- menetelmä	Timanttisahaus- menetelmä
Käytettävissä seuraavissa muuratuissa rakenteissa	yksi- ja kaksi- kuoriset tiiliseinä	yksi- ja kaksi- kuoriset tiilisei- nät	yksikuoriset tiiliseinä	yksi- ja kaksi- kuoriset tiilisei- nät, betoni
Tiilimuurauksen maksimipak- suus, cm	toimittajan ohjei- den mukaan, 100-200	ei rajoitusta	toimittajan oh- jeiden mukaan, 100-130	ei rajoitusta
Erityiset valmis- telut	läpimenevä laas- tisauma	läpimenevä laastisauma, molemmipuoli- nen työalue	läpimenevä laastisauma, laastinkiinteys MG2	ei ole
Erotustapa	eristyslevyn lyönti	voimasahaus, vaijerisahaus - kuiva tai märkä	voimasahaus - kuiva	vaijerisahaus - kuiva tai märkä
Eristyslevy	teräslevy	bitumikaista, teräslevy, muovilevy	bitumikaista, teräslevy, muovilevy	bitumikaista, teräslevy, muovilevy
Eristyslevyn asennustapa	lyömällä tai puris- tamalla	liu'uttamalla, liittämällä	liittämällä	liittämällä
Kuormitusta siirtävä rakenne saadaan	ei tarvita erityisiä toimenpiteitä, voimien siirtoa ei rikota	kiilaamalla, pu- ristamalla	kiilaamalla, puristamalla	kiilaamalla, puristamalla
Sidosaine / täy- teaine	täynnä	kutistumaton tiivistyslaasti	kutistumaton tiivistyslaasti	kutistumaton tiivistyslaasti

Mekaanisten menetelmien periaate on yksinkertainen. Korjattava tiilimuuraus ava-
taan alaosasta purkamalla, sahaamalla, poraamalla tai jyrsimällä, minkä jälkeen rakoon
asennetaan erotuskerros, esimerkiksi muovinen erotuskaista tai metallista tehty levytys.
Taulukossa 4.9 on esitetty Ruhnau et. al. esittämät mekaanisten menetelmien jaottelut ja

soveltavuuden eri rakenteisiin [43, s.105, tab. 2.21]. Taulukosta puuttuu mekaanisiin menetelmiin kuuluvat tiilien vaihtaminen sekä porausmenetelmät, minkä lisäksi sahausmenetelmissä on jonkin verran päällekkäisyyttä verrattuna tutkimuksessa käsitelyyn menetelmäjakoon. Keski-Euroopassa kaksikuorisiksi seinärakenteiksi sanotaan toisistaan esimerkiksi lämmöneristeellä erotettuja seiniä, jotka ovat esimerkiksi eri rakennuksia toisistaan erottavia seiniä.

4.6.2 Tiilien vaihto

Tiilien vaihtaminen on yksi vanhimmista ja edelleen Keski-Euroopassa käytössä olevista vaakasuuntaisen kapillaarikatkon rakentamismenetelmistä. Se soveltuu parhaiten maanpinnan yläpuolella olevien seinärakenteiden korjaamiseen, sillä muussa tapauksessa korjaus edellyttää ulkopuolisen kaivannon tekemistä ja maanpinnan alapuolisten osien vedeneristämistä, mikä lisää huomattavasti korjausten kustannuksia. Menetelmän käyttäminen edellyttää tilojen täydellistä remontointia ja se voi aiheuttaa joitakin vaurioita yläpuolisille rakenteille.

Kosteudesta ja suolavaurioista kärsineen seinän alaosa puretaan osissa koko seinän paksuudelta ja asennetaan purkukohtaan kapillaarisen kosteuden nousun katkaisevaksi kerrokseksi tiivistysfolio tai teräslevy. Yleensä purku tehdään noin metrin pituisissa osissa ja tiivistys limitetään noin 20 cm. Eristyksen jälkeen tiilet muurataan takaisin ja jatketaan purkamalla seuraava osa. [20, s.126; 53, s.47]

Käytännössä rakenteen paksuudesta, muurauksesta ja kuormituksesta riippuen seinärakenteen purkutyö on mahdollista tehdä eri tavoilla, esimerkiksi puretaan puolet seinän vahvuudesta koko seinän pituudelta, asennetaan tiivistyskerros ja muurataan rakenne ehjäksi. Laastin kovettunutta ja kuormitusten siirtymisen varmistuttua puretaan rakenteen alaosa toiselta puolelta ja tehdään vastaavat toimenpiteet. Tällaisessa toteutuksessa kapillaarikatkoon tulee kuitenkin saumakohta rakenteen sisälle/keskelle. [53, s.47]

Tiilimuurin vaihtamisen huonona puolena on sen suuri työmäärä sekä työn vaativuus. Purku on tehtävä huolellisesti, niin että rakenteen vakaus ja kantavuus säilyy ja yläpuolisiin rakenteisiin ei synny halkeamia. Frössel esittää, että purkutyö tehtäisiin käsin ja vain vaikeimmassa osassa eli purkutyön aloituksessa käytettäisiin paineilmasarjaa ensimmäisen läpimenon tekoon [20, s.126].

Menetelmän hyvänä puolena on se, että vaihtamalla tiilet poistetaan rakenteesta suo-laantuneet tiilet ja korjauksen jälkeen rakenne säilyy kuivempana hygroskooppisten suo- lojen poistuttua rakenteesta. Umpeen muurauksessa tulee varmistaa, että kosteuden ja suo- lojen vaurioittamia tiiliä ei käytetä uudelleen, jotta uusilta vaurioilta vältytään. Menetelmää voidaan käyttää myös yksittäisen suola- ja kosteusrasitetun kohdan korjauksessa.

4.6.3 Levynlyöntimenetelmä

Levynlyöntimenetelmässä lujuudeltaan heikkoon, koko rakenteen läpi menevään laastisaumaan lyödään tai puristetaan kapillaarikatkokerrokseksi teräslevyjä. Teräslevyjen tulee olla poimutettuja sekä riittävän paksuja, jotta levyt kestävät paremmin lyömisen.

Korjaukset tehdään kerrallaan vain pieneen osaan seinää, tavallisesti noin 1 metrin matkalle. Lyöntimenetelmää kutsutaan Saksassa yleisesti myös törmäysmenetelmäksi.

Lyöntimenetelmä aiheuttaa jonkin verran rakenteiden vaurioitumista tärinän vaikutuksesta. Menetelmä soveltuu etupäässä käytettäväksi rakennuksiin tehtävien suurien korjausten yhteydessä sen rakenteita vaurioittavien vaikutusten takia. Menetelmää ei voida käyttää kaikissa rakenteissa, sillä käyttö edellyttää rakenteen läpi menevän yhtenäisen laastisauman.

4.6.4 Muurisahausmenetelmä

Muurisahausmenetelmää on Frössel'n [20] mukaan käytetty kirjallisten todisteiden mukaan jo vuonna 1906. Menetelmässä sahataan seinän alaosa läpi koko rakenteen rakenteeseen sopivalla laitteistolla. Kuvassa 4.8 on esimerkki sahaukseen käytetystä, renkaiden varassa työnnettävästä laitteesta. Sahaus tehdään osissa, niin että rakenteen kantavuus säilyy. Sahaus voidaan suorittaa kuivasahauksena, mutta useimmiten terää jäähdytetään vedellä, mikä myös vähentää sahauksesta syntyvän pölyn määrää. Sahauksella tehtävän uran korkeus on laitteistosta riippuen vähintään 5..6 mm:ä ja enintään 10..13 mm:ä. Sahattavan seinän paksuus määräytyy käytettävän laitteiston mukaan.

Uraan asennettavan eristyskerroksen tulee olla korkealujuuksista, kulutusta ja kuormitusta kestävä, kuten kemiallisesti vastustuskykyinen muovi, bitumipäällystetty alumiini- tai lyijyfolio tai korroosionkestävä ruostumaton teräs. Saksassa eniten käytettynä ovat lasikuidulla vahvistetut muovilevyt tai HD-polyetyleenilevyt, joiden vahvuus on 1,5..2,0 mm:ä.

Levytiivistyksen asentamisen jälkeen uraan asennetaan 15..25 cm:n välein kuormitusta kestäviä kiiloja koko uran pituudelle ja leveydelle kuormituksen siirtymisen varmistamiseksi. Uran umpeen valamisessa on käytettävä alkalinkestävää laastia [20, s.128-130], jonka tulisi olla mahdollisimman vähän kutistuvaa.



Kuva 4.8. Muurisahausmenetelmässä käytettävä työnnettävä ketjusaha.

Teränjäähdytykseen käytetty vesi voi aiheuttaa leikkausalueelle myöhemmin kuivumisen yhteydessä suolankerääntymistä, mikäli rakenteessa on helposti liukenevia suoloja. Jos rakennepakkuus on suuri ja joudutaan sahaamaan seinän molemmilta puolilta, eivät sahauskohdat välttämättä ole täysin samassa tasossa. Tällöin on vaarana, että eristyskerrokseen tulee epäjatkuvuuskohtia tai kuormitus jakautuu epätasapainoisesti. [53, s.49]

Hyvänä puolena on se, että levyeristyksillä tehtävistä kapillaarikatkokerroksista saadaan sekä kapillaarisesti että diffuusiolla siirtyvän kosteuden sulkevia. Yleensä kapillaarikatkon tekeminen ei yksinään riitä, vaan suolavaurioituneet rappaukset tulee korjata kapillaarikatkon tekemisen jälkeen.

4.6.5 Pora(ydin)menetelmä eli porausmenetelmä

Porausmenetelmässä rakenteeseen porataan timanttiterällä vaakasuoraan porareikäriivi, johon asennetaan kapillaarikatkoksi tiivistyskerros. Porausmenetelmää on kutsuttu myös sen keksijän mukaisesti Massari-menetelmäksi sekä erään toteuttajayrityksen mukaisesti myös isoporamenetelmänä. Suomenkieleen soveltuvin nimitys on porausmenetelmä. Porareiän halkaisija vaihtelee rakennusaineen ominaisuuksien sekä käytettävän tiivistysmateriaalin mukaan ja voi vaihdella suuresti. Esimerkiksi Massari-menetelmässä yleisin reikäkoko on noin 30..40 mm:ä, kun taas isoporamenetelmässä reiän halkaisija on noin 110 mm:ä.

Massari-menetelmässä puhdistetut reiät täytetään kutistumattomalla, silikonihartsilla parannetulla mineraalisella tiivistyslaastilla tai muovilla. Täyttö voidaan tehdä myös sulkubetonilla. Tiivistysaineen kovettumisen jälkeen voidaan porata toiset reiät samaan korkeuteen, niin että saadaan yhtenäinen katkaiseva kerros.

Reikien suuresta määrästä ja timanttiterien käytöstä johtuen porausmenetelmällä tehtyjen kapillaarikatkojen toteutus on melko kallista. [20, s.126-127] Pientä porareikäkokoä käytettäessä porattavien reikien määrä voi olla jopa kolminkertainen verrattuna suurempiin porareikiin, millä on suora vaikutus korjauksen kustannuksiin.

4.6.6 V-leikkaus

Suhteelliseen pitkään Keski-Euroopassa käytössä olleisiin menetelmiin kuuluu myös V-leikkausmenetelmä. Poraus- ja muurinsahausmenetelmiä kehittyneemmässä menetelmässä seinän alaosaan sahataan 10..30 asteen kulmassa seinän puolivälin yli ulottuva ura. Ura on noin 2 cm:ä korkea ja ulottuu jonkin verran seinän keskilinjan yli, niin että seinän kantavaa osaa jää jäljelle vähintään 40 %. [20 s. 127] Kuvassa 4.9 on esimerkki tehdystä korjauksessa, jossa timanttisaha on kiinnitetty seinällä olevaan kiskoon ja rakenteeseen sahataan ura kapillaarikatkon asennusta varten.



Kuva 4.9. V-leikkausmenetelmässä timanttisaha voidaan laittaa kiinni seinään asennettavaan kiskoon.

Kirjallisuuslähteiden mukaan ennen uran täyttämistä sen leikkauspinnat käsitellään vettähylykiviksi. Käsitteilyllä pyritään estämään täyttö- sekä tiivistyslaastin veden imeytyminen tiilimuuraukseen tai betoniin, jotta varmistetaan laastin riittävän hitaasta sitoutumisesta. Ura täytetään korkealaatuisella, sementtipitoisella alhaisen vesisementtisuhteen omaavalla täyttövalubetonilla, joka muodostaa veden pysäyttävän kerroksen.

Valun kovettumisen jälkeen, olosuhteista ja täyteaineesta riippuen noin 14..15 tunnin kuluttua, voidaan sahata ura seinän toiselta puolelta niin että se ulottuu ensimmäisen uran läpi asti. V-leikkausmenetelmällä saavutetaan rakenteeseen yhtenäinen kapillaarisen kosteuden nousun katkaiseva kerros.

Menetelmän etuna ja kustannuksia laskevana tekijänä on se, että rakenteiden työnäikaiseen tuentaan ei tarvita terästukia tai muita apukeinoja. Korjausten kustannuksia lisää kuitenkin seinien käsittely molemmilta puolilta. Frössel [20, s.127-128] ei suosittele käyttämään menetelmää suurilla rakennevahvuuksilla tai kaksikuorisilla tiiliseinillä. Suurilla seinäpaksuuksilla rakenteen leikkaaminen tai sahaaminen on hyvin työlästä ja toisaalta yläpuoliset kuormitukset voivat olla suuret.

4.6.7 Mekaanisten menetelmien käyttö

Mekaaniset menetelmät vaativat ennen korjauksiin ryhtymistä suunnittelua korjausten toteutuksesta sekä laajuudesta. Korjaukset koskevat rakennusten perustuksien läheisyydessä olevia rakenteita, joissa kuormitukset ovat suurimmillaan. Tällöin on tärkeää arvioida käytettävän korjausmenetelmään aiheuttamat riskit rakenteen kantavuudelle.

Mekaanisia menetelmiä käyttäen tehty kapillaarikatko on toimintavarmen vaihtoehto kosteustekniikan kannalta, sillä kapillaarikatkomateriaalilla voidaan saada täydellinen

kapillaarisen ja diffuusion avulla kulkeutuvan kosteuden katkaiseva kerros. Injektointikäsittelemenetelmille ominaista riskiä diffuusion avulla liikkuvasta kosteudesta tai kapillaarikatkovyöhykkeen epäjatkuvuuskohdista ei hyvin toteutetuilla mekaanisilla menetelmillä ole.

Tiilimuurin vaihtaminen ja törmäysmenetelmä eivät ole nykyaikana enää kovinkaan varteen otettavia korjausvaihtoehtoja. Poraus- ja sahausmenetelmien käyttämistä edesauttaa menetelmiä varten kehitetyt laitteistot ja kalustot, joiden avulla ne soveltuvat hyvin käytettäväksi myös nykyisin tehtävissä korjauksissa.

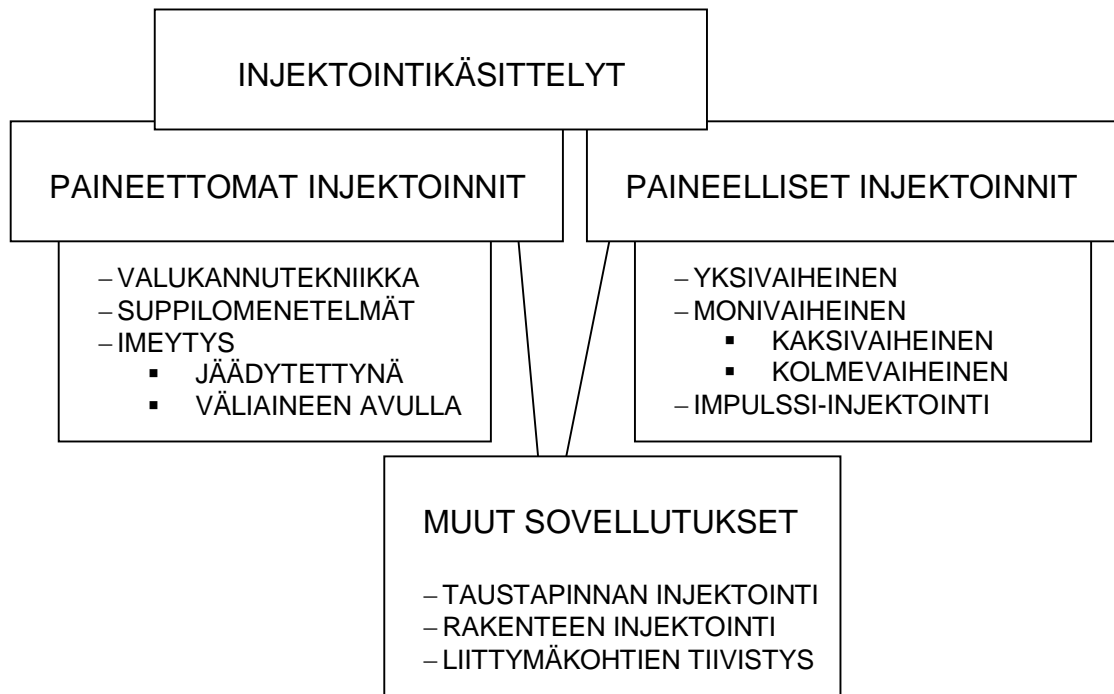
Suomessa menetelmiä ei ole käytetty kovinkaan paljoa, mistä johtuen ammattitaitoisia korjauksen suorittajia sekä kokemuspohjaista tietoa menetelmän soveltamista kohteisiin on vähän. Myöskään kapillaarikatkon sahausta varten kehitettyjä muurisahauslaitteistoja ja niiden apuvälineitä Suomessa ei ole. Erilaisia timanttiporaus- ja sahauskallustoja on tarjolla, mutta niitä ei ole juurikaan käytetty kapillaarikatkojen tekemiseen. Tietotaidon puute muodostaa selkeästi esteen mekaanisten menetelmien käyttöönottamiselle Suomessa.

4.7 Injektointikäsitteelyt

4.7.1 Yleistä

Injektointikorjaukset ovat mekaanisten menetelmien ohella toinen päämenetelmä rakenteiden jälkikäteen asennettavien kapillaarikatkojen muodostamiseen. Injektointikäsitteelyllä tai injektoinnilla tarkoitetaan nestemäisen aineen tuomista rakenteeseen joko paineellisesti tai ilman painetta. Injektointimenetelmiä on käytetty Keski-Euroopassa (Saksassa) lähes 50 vuoden ajan [23, s.69]. Suomessa kokemuksia injektoinneista on parinkymmenen vuoden ajalta.

Tavallisimmin injektointia käytetään seinärakenteiden vaakasuuntaisen kapillaarikatkovyöhykkeen muodostamiseen. Injektointikäsitteelyjen päämenetelmät ovat paineeton injektointi sekä paineellinen injektointi, joista molemmissa on olemassa vielä omat alaryhmänsä. Injektointia voidaan käyttää vaakasuuntaisen kapillaarikatkon lisäksi maanvastaisten seinien jälkikäteen tehtävään tiivistämiseen injektioimalla koko seinäpintaan tai sen taakse maataytön puolelle tiivistävää ainetta. Injektointia voidaan käyttää myös yksittäisten vesivuotokohtien, kuten halkeamien, putkiläpivientien tai muiden rakenteiden epäjatkuvuuskohtien tiivistäminen [45, s.12]. Kuvan 4.10 kaaviossa on esitetty injektointikäsitteelyjen jaottelu eri toteutustapojen mukaan.



Kuva 4.10. Injektointikäsitteelyjen jaottelu

Injektointikäsitteelyt toteutetaan poraamalla rakenteeseen vaakatasoon tai alaviistoon suunnattuja porareikiä vaakasuuntaisiin riveihin. Reikien välinen etäisyys vaihtelee 80..150 mm ja niiden halkaisija on käytetystä injektointitavasta riippuen noin 12..20 mm. Injektointeja toteutetaan yksivaiheisena eli yhdellä tiivistysaineella tehtävänä korjauksena tai monivaiheisena injektointina, jossa käytetään kahta tai kolmea eri aikaan rakenteeseen injektointavaa ainetta. Yleensä kaikki paineettomat injektoinnit ovat yksivaiheisia, kun taas paineellisissa injektoinneissa vaihteita voi olla yhdestä kolmeen.

Injektoinneissa on käytetty vuosien saatossa useita erilaisia aineita. Aineiden vaikutustavat ja leviäminen rakenteen huokosissa ovat erilaisia. Injektointiaineen sekä injektointimenetelmän valinnassa tulee huomioida injektointitavan rakenteen kosteuspiitoisuus.

4.7.2 Injektointiaineet, valinta ja vaikutustavat

Keski-Euroopassa on käytössä useita erilaisia ja eri tavoilla vaikuttavia injektointiaineita. Lähteiden mukaan injektointia suunniteltaessa tulee päättää, mikä injektointimenetelmä ja -aine ovat soveltuvimmat kyseessä olevaan korjauskohteeseen. Valinnassa tulee huomioida rakenteen materiaalien ja huokosten koon lisäksi myös aineiden yhteensopiavuus. [43, s.105-106].

Syynä Keski-Euroopan laajaan injektointiaineiden tarpeeseen on vanha rakennuskanta, jossa on käytetty useita erilaisia huokoisia, kiviaineisia rakennusaineita. Kaikki injektointiaineet eivät sovellu samalla tavoin eri materiaalien injektointiin, minkä takia kirjallisuudessa on painotettu etukäteen tehtävän tutkimuksen suorittamisen tärkeyttä. Tutkimuksen yhteydessä selvitetään mm. käytetty rakennusmateriaali, rakenteen läpikostumisaste sekä suolakuormituksen määrä. Eroja on myös siinä, minkälaista vau-

riokohtaa injektoidaan. Putkiläpivientien tiivistyksessä ja kapillaarikatkojen tiivistyksessä voidaan käyttää erilaisia aineita.

Kabrede & Spirgatis [23] ovat jaotelleet injektointiaineita kahteen luokkaan, mineraalipohjaisiin ja keinotekoisiiin. Mineraalipohjaisia injektointiaineita ovat bentoniitti, silikaatti ja sementti, kun taas keinotekoisia ovat esimerkiksi akryylihartsigeeeli, epoksihartsi ja polyuretaanihartsi. Osa kapillaarikatkojen injektointiin käytetyistä injektointiaineista on todettu kokeilujen jälkeen toimimattomiksi tai lyhytikäisiksi. Toimimattomiin injektointiaineisiin kuuluvat erityisesti bitumipohjaiset injektointiaineet sekä sementtiliuokset. Nykyään käytetään pääasiassa vesiliukoisia aineita tai hartseja orgaanisilla liuotteilla.

Rakenteeseen injektoitavan aineen täytyy levitä niin, että se muodostaa yhtenäisen tiivistävän kerroksen. Tiivistävä vaikutus voi syntyä eri tavoilla ja se on suoraan riippuvainen käytetystä injektointiaineesta. Lähteissä injektointiaineiden toimintatavat on esitetty seuraavasti [23, s.72; 43, s.105-106]:

- Aine leviää kapillaarihuokosverkostoon, niin että huokosien säde pienenee, jolloin injektointiaineen vaikutustapa on kapillaaritoimintaa hidastava. Rajatapauksessa kapillaarihuokokset täyttyvät kokonaan, jolloin vaikutustapa on kapillaaritoiminnan pysäyttävä.
- Aine leviää kapillaarihuokosverkostoon ja tekee kapillaarihuokosista vettä hylkiviä. Injektointiaine muodostaa huokosien pinnalle vesipakoisen kerroksen, jolla ei ole enää kapillaarisuutta, ainakaan klassisella hydrofobisoitumistekniikalla vaikuttaen.
- Molempia, kapillaarisen tiivistämisen ja hydrofobisoitumisen, vaikutustapoja käytetään yhtäaikaaisesti.

Kabrede & Spirgatis esittävät, että käytettävän injektointiaineen viskositeetin tulee soveltua injektoitavaan rakennusmateriaaliin. Lisäksi sen tulee olla materiaalin kanssa yhteensopiva, niin että se ei vaurioita rakennetta. [23, s.141-142] Injektointiaineet voidaan jaotella niiden koostumuksen perusteella taulukon 4.10 mukaisesti:

Taulukko 4.10 Erilaiset rakenteiden injektointiin käytetyt injektointiaineet [20, s.154]

Vesipohjaiset seokset	Vesipohjaiset liuokset	Sulatteet	Vesipohjaiset emulsiot	Orgaanisten aineiden liuokset
sementtineeste-seokset	alkalisilikaatit	parafiini	silikonimikroemulsio	silaanit/siloksaanit silikonihartsiliuokset
mikrosementtineeste-seokset	alkalisilikaattien ja alkalimetyylisilikonaattien yhdisteet	bitumi	bitumiemulsio	keinohartsiliuokset orgaaniset hartsit
hienoainesseokset				bitumiliuokset
	metyylisilikonaatit			piihappoetyyliesteri hydrofobisilla lisäaineilla

Taulukko osoittaa, kuinka monia eri aineita on käytetty vuosien saatossa kapillaarikatkojen injektoinnissa. On siis hyvin selkeästi perusteltavissa, miksi injektointikorjauksia suunnittelevien on tiedettävä aineiden vaikutustapa osatakseen valita oikean injektointiaineen markkinoilla olevista useista injektointimateriaaleista. WTA on antanut maanvastaisten rakenteiden jätkikäteen tehtäviä tiivistyksiä käsittelevässä ohjeessaan [45] muutamille injektointiaineille käyttösuositukset rakenteen kosteuden ja kosteusrasituksen mukaan. Taulukossa 4.11 on esitetty WTA-ohjeen mukaiset käyttösuositukset.

Taulukko 4.11 Injektointiaineiden käyttöalueet WTA-ohjeen 4-6-05/D [45] mukaan

Materiaali	Rakenteen olosuhde		Kuormitus injektoinnin jälkeen	
	kosteaa	vettäjohtava	maakosteus / lyhytaikainen vajovesi	paineellinen vesi / pitkäaikainen vajovesi
silikaatit ¹⁾	+	+	+	+ ³⁾
sementti ¹⁾	+	+	+	+ ⁴⁾
epoksihartsit ¹⁾	+ ²⁾	-	+	-
polyuretaanihartsit	+	+	+	+
akryyli- tai polyuretaanigeelit	+	+	+	+

1) ei muodonmuutoskykyä 2) vain kosteutta kestävät hartsit 3) vain sementtiyhdisteinä 4) vain silikaattiyhdisteinä

WTA:n antama ohje ei kuitenkaan ole yleispätevyytensä takia kovin hyödyllinen arvioitaessa eri injektointiaineiden käyttöä rakenteiden tiivistämisessä. Jaottelussa ei oteta kantaa rakenteen kosteuspitoisuuteen tai injektoitavan rakenteen materiaaliin.

Ruhnau et al. [43, s.106] ovat esittäneet injektointiaineita sekä niiden toiminta- ja vaikutustapoja taulukon 4.12 mukaisesti. Taulukossa on myös huomioitu injektointiaineiden huonoja puolia.

Taulukko 4.12 Injektointiaineita ja niiden vaikutustapoja [43, s.106]

Injektointiaine	Toimintatapa	Vaikutus
alkalisilikaatti-kalivesilasi	kapillaareja pienentävä	muodostaa laastin rapautumisen kautta helposti liukenevia suoloja, jotka kohottavat alkuperäistä suolapitoisuutta, seurauksena voi olla hygroskooppisia kosteusvaurioita - silikageelin katoaminen voi tuoda mukanaan uusia kosteusvaurioita
kaliummetyylisilikaatti	vettä hylkivä	suolapitoisuus voi nousta myöhemmin kemiallisten reaktioiden edetessä, käyttö suositeltavaa vain alhaisilla kosteuspitoisuuksilla
useiden tuoteryhmien yhdiste-tuotteet	kapillaareja pienentävä + vesipakoinen	suolapitoisuus voi nousta myöhemmin kemiallisten reaktioiden edetessä
silikonimikroemulsio	vettä hylkivä	vesiliukoinen, itse-emulgoituva erityisistä silikoniraa-ka-aineista perustuva liuos, joka paineenalaisena jakautuu huokosiin, käytettävissä myös korkeilla läpikostumisasteilla
orgaaniset hartsit	kapillaareja pienentävä + vettä hylkivä	esimerkiksi epoksihartsi tai polyuretaanihartsi, leviäminen ongelmallista, hartsin saostuminen huokosiin kestää kauan
akrylaattigeeli	kapillaarit tiivistävä	alhaisen viskositeetin vettä sitova akrylaatti, käytettävissä myös korkeilla läpikostumisasteilla
parafiini	kapillaarit tiivistävä	tiilimuuri täytyy kuivattaa etukäteen ja lämmittää vähintään 80 asteiseksi, jotta sulatettu parafiini jakautuu huokosiin

Bitumiemulsio

Bitumiemulsiota on käytetty etenkin Sveitsissä ja Etelä-Saksassa kapillaarikatkojen injektointiin. Bitumin käyttöä ei suositella käytettäväksi porareikäinjektioinneissa, sillä kokemusten perusteella emulsio ei juurikaan tunkeudu porareikien ulkopuolelle huolimatta paineellisen injektoinnin käytöstä [20, s.160].

Sementtimesteitys/-liima/-liete/mikrosementtiliuos

Sementtipohjaiset injektointiaineet ovat hienorakeisesta sementistä sekoitettu lietettä, jota kutsutaan myös mikrosementtiliuokseksi. Sementtipohjaisten liuosten ja lietteiden käyttäminen tiivistysaineena oli kapillaarikatkojen injektoinnin alkuaikoina yleistä, mutta menetelmien kehittymisen myötä muut, paljon tehokkaammat tiivistysaineet ovat

vähentäneet sementin käyttöä [18, s.496]. Sementtiliuos ei tunkeudu injektoitaessa riittävän syväälle rakenteen huokosiin, sillä liuoksen viskositeetti ja aineosien raekoko on liian suuri [20, s.160].

Sementtiliuosinjektointi soveltuu hyvin käytettäväksi monivaiheisessa injektointinnissa tiivistämään rakenteen huokosia, jolloin varsinaisen injektointiaineen menekki on pienempi. Liuoksen paremman leviämisen takia injektointi tulisi suorittaa paineellisena injektointina. Sementin tiivistävä vaikutus syntyy sementin hydrataatiossa syntyvästä sementtikivestä.

Alkalisilikaatit

Alkalisilikaatteja, natrium- ja kaliumsilikaatteja (eli vesilasi), on käytetty tiilimuurien kuivatuksessa muutamien vuosikymmenien ajan. Alkalisilikaatit saostavat rakenteen huokosiin silikageeliä, jonka seurauksena kapillaarihuokokset pienentyvät ja kapillaaritoiminta heikkenee. Rakenteen kuivaessa voi kuitenkin syntyä uusia nk. sekundaarisia kapillaarihuokosia, jotka syntyvät silikageelin vähentyessä veden poistumisen myötä. Tämä voi johtaa siihen, että kapillaariaktiivisuus lisääntyy ja rakenne alkaa kastua uudelleen. [18, s.496; 19; 20, s.160]

Kalium- tai natriumsilikaatin korkea alkalipitoisuus aiheuttaa, että reaktiossa ilman hiilidioksidin kanssa muodostuu suuria määriä alkalikarbonaatteja (potaskaa ja soodaa), jotka vesiliukoisina aineina lisäävät rakenteen suolarasitusta ja edelleen vaurioitumisriskiä. Lähteiden [18, s.496; 19; 20, s.160] mukaan useissa alkalisilikaattia sisältävissä injektointiaineissa on stabiilisuutta parantavia aineita sekä muita lisäaineita, joilla on pyritty estämään injektointiaineen haitallisia reaktioita. Mikäli injektointinnissa käytetään alkalisilikaattiyhdisteistä, tulee valita alhaisen alkalipitoisuuden silikaattiyhdisteitä, jotta suolankehitys olisi mahdollisimman vähäistä. Alkalisilikaatteja ei suositella edellä esitetyn perusteella käytettäväksi kapillaarikatkojen injektointinnissa.

Alkalimetyylisilikonaatti - kaliummetyylisilikonaatti

Alkalimetyylisilikonaatit ovat injektointiaineita, jotka pohjautuvat metyylipiihapon vesiliukoisiin suoloihin. Jo 1940-luvulta lähtien on käytetty rakennusten kunnostuksessa korkea alkalista, veteen kaikissa olosuhteissa sekoittuvaa alkalimetyylisilikaattia. Nykyisin yleisin alkalimetyyli-injektointiaineissa käytetty yhdiste on kaliumsuola.

Kaliummetyylisilikonaattia käytetään injektointiaineena suoraan tai yhdisteenä kaliumsilikaatin kanssa. Kaliummetyylisilikonaatti reagoi ilman hiilidioksidin kanssa ja muodostaa huokosiin hydrofobisuutta aiheuttavaa metyylipiihappoa sekä edelleen alkalikarbonaattia, joka lisää rakenteen suolarasitusta. Koska tiivistävän reaktion saavuttaminen edellyttää yhteyttä hiilidioksidiin, ei alkalimetyylisilikonaatteja suositella käytettäväksi kosteissa rakenteissa. Weber pitää aineen käyttörajoina 50 cm rakennepaksuutta sekä enintään 50 % kosteuspitoisuutta [19].

Alkalisilikaattien ja alkalimetyylisilikonaattien yhdistetuotteet

Alkalisilikaattien ja alkalimetyylisilikonaattien yhdisteitä on käytetty injektioinneissa muutamia kymmeniä vuosia. Injektointiaineen reagoidessa syntyy ensin alkalisilikaatin vaikutuksesta silikageelin erottumista, joka johtaa hetkellisen kapillaari-imun vähene-
misen kautta rakenteen kuivumiseen. Kuivuminen mahdollistaa alkalimetyylisilikonaatin reaktion käynnistymisen ja huokosten hydrofobisoitumisen.

Mikäli silikageelin häviämisen myötä muodostuu uusia kapillaarihuokosia, rajoittaa reaktiossa syntynyt metyyliipihappo kosteuden siirtymistä hydrofobisuutensa avulla. Yhdistelmätuotteiden huonona puolena on se, että ne muodostavat rakenteeseen reaktioiden edetessä suolaa. Siksi yhdistelmäinjektointiaineen vaikuttavien ainesosien määrä tulee optimoida rakenteeseen sopivaksi, jotta saavutetaan mahdollisimman hyvä tiivistävä vaikutus ja toisaalta mahdollisimman alhainen suolapitoisuus. [19]

Parafiinitivistys

Parafiinitivistys poikkeaa muista injektointimenetelmistä. Menetelmässä seinän alaosaan porattujen injektointireikien väli on noin 15 cm ja poraus tehdään hiukan alaviistoon. Tiiliseinien tai reikätiiliseinien ilmatilat täytetään kvartsihiekalla. Porareikiin asennetaan lämmityspuikot/sauvat ja seinät lämmitetään 180 asteisiksi. Lämmityksen seurauksena seinät kuivuvat ja kapillaarihuokokset ovat avoimia. Kuivatusaika on noin RH 60% kosteuspitoisuuden omaavassa yhden kiven seinässä noin 8-12 tuntia ja paksuimmilla, lähes metrin paksuisilla seinillä kuivatukseen voi kulua jopa 48 tuntia [20, s.144]. Kuivatuksen jälkeen porareitit täytetään nestemäisellä parafiinilla. Kuumat ja kuivat tiilet imevät kapillaarisuutensa takia juoksevan parafiinin, joka jakautuu arviolta 20 cm etäisyydelle porareitistä ja tiivistää tiilet täysin. [40, s. 73-75; 54]

Parafiini-injektointia on käytetty useita vuosikymmeniä. 1990-luvun alusta menetelmän käyttö on auktorisoitu ja laadunvarmistettu. Menetelmässä käytettyjä laitteistoja on patentoitu ja injektoinnissa on alettu käyttää sitä varten kehitettyä erikoisparafiinia, jossa on parafiinin ohella lisäksi vahaa sekä synteettisiä ainesosia. Nykyään parafiini-injektioita tehdään sekä paineettomasti imeyttämällä, että injektioimalla parafiinia paineellisesti alhaisella, 1..2 barin paineella patentoidun parafiinipumpun avulla. [54]

Parafiinitivistyksellä aineen kapillaarihuokokset saadaan vähintäänkin hydrofobisiksi sekä kokonaan täyttyneiden huokosten osalta täysin tiivistyneiksi. Parafiinitivistyksen huonona puolena on pidetty osassa injektointiaineita käytettyjen eläinrasvojen aiheuttamia hajuhaittoja lämmitetyissä tiloissa. Puhdas parafiini on hajuton ja väritön, joten ongelmaa esiintyy vain osalla injektointituotteista.

Silikonimikroemulsio

Silikonimikroemulsio on yksi uusimmista, hiukan yli kymmenen vuotta käytetyistä injektointiaineista. Erityisen pienikokoisten silikoniaineesien, tensidien avulla voidaan saavuttaa 100 % vaikuttava injektointimateriaali, joka on vesiliukoinen sekä itsestään emulgoituva. Nämä itsestään muodostuvat emulsiot ovat hienojakoisia ja niiden hiukaskoko voi olla noin 10^{-9} .. 10^{-10} m. Hienojakoisesta koostumuksesta johtuen aine leviää

hyvin kapillaarihuokosissa ja sopii erityisen hyvin tiilirakenteiden injektointiin kapillaarista kosteuden nousua vastaan. Muita hyviä puolia ovat suolattomuus ja kemiallinen aktiivisuus esimerkiksi alkalisissa reaktioissa. Vaikutusaineen muodostusta voidaan myös ohjata, millä on erityisen merkittävä vaikutus korkeilla kapillaarisen kosteuden alueilla. [19; 23]

Silikonimikroemulsion edut:

- vesiohenteinen
- itse-emulgoituva
- käyttö korkeilla läpikostumisasteilla
- ei suolankehitystä
- tilaa säästävä, sillä liuos laimennetaan vedellä työmaalla
- ei erityisiä valmisteleviä töitä, esimerkiksi rakenteen kuivatusta
- aktiivisuus alkaalisten ainesosien kanssa.

Silikonimikroemulsion pääasiallinen asennustapa on paineellinen injektointi joko yksivaiheisena tai monivaiheisena injektointina.

Orgaaniset hartsit

Orgaanisiin hartseihin kuuluvia injektointiaineita ovat epoksihartsit, polyuretaanihartsit, polyesterihartsit, akryylihartsit ja –geelit sekä erilaiset yhdistelmätuotteet. Orgaanisiin hartseihin kuuluvien injektointiaineiden ongelmana on niiden huono kosteudensietokyky, minkä takia kapillaarikatkojen injektoinnissa tulee käyttää kosteutta kestäviä epoksihartseja [55]. Pääasiallisin orgaanisten hartsien injektointitapa on paineellinen injektointi. [19]

4.7.3 Rakenteen kosteuspitoisuuden merkitys injektoinnissa

Rakenteen kosteuspitoisuudella on huomattava merkitys injektoinnin onnistumisessa. Painovoimaisessa injektoinnissa injektointiaine jakautuu rakenteen huokosiin painovoiman sekä kapillaari-imun vaikutuksesta, jolloin kuivissa rakenteissa huokosten täyttyminen on melko varmaa. Jos huokosverkostossa on paljon vettä, ei painovoimainen sekä kapillaari-imun vaikutuksesta tapahtuva injektointiaineen kulkeutuminen ole mahdollista.

Huokoisille materiaaleille on tunnettu niiden vesikapasiteetit, esimerkiksi täystiilille, joiden tiheys on 1850 kg/m^3 , on määritetty vesikapasiteetille arvo $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Samoille tiilille on annettu kyllästyskosteudeksi $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Täystiilien todellinen huokoistilavuus on siis 320 l/m^3 . Tähän perustuen materiaalissa on vapaata huokostilaa, vaikka rakenteen kosteuspitoisuudeksi mitattaisiin RH 100 %. [23. s.79]

Kabrede & Spirgatis [23, s.81] ovat esittäneet rakenteen kosteuspitoisuuden ja kapillaarisesti helppopääsyisten huokosten määrän yhteyden (taulukko 4.13). Taulukon perusteella on helppo päätellä, miksi paineellinen injektointi on paineettomia injektointi-

tapoja tehokkaampi injektointimenetelmä kastuneiden rakenteiden injektoinnissa. Taulukon perusteella voidaan tehdä seuraavia päätelmiä:

- Kapillaarisesti helppopääsyisten huokosien tilavuus, 133 l/m^3 , kapillaarisen läpikostumisasteen ollessa 30 % vastaa suunnilleen paineellisella injektoinnilla 80 % läpikostumisasteessa saavutettavissa olevaa yhteishuokostilavuutta (138 l/m^3), eli paineellisella injektoinnilla saavutetaan suurempi kapillaarihuokosten täyttöaste.
- Paineellista injektointia käytettäessä tarvitaan aina suurempi määrä injektointiainetta verrattuna paineettomaan injektointiin.
- Rakenteita kuivattamalla voidaan lisätä helppopääsyisen yhteishuokostilavuuden määrää ja saada lisävarmuutta injektoinnin onnistumiseen.

Taulukko 4.13 Huokostilavuuden riippuvuus läpikostumisasteesta [23, s.81]

Kapillaarinen kyllästyskosteus	Kapillaarisesti helppopääsyiset vapaat huokokset	Jäljelle jäävä yh- teishuokostilavuus
%	l/m^3	l/m^3
0	190	290
10	171	271
20	152	252
30	133	233
40	114	214
50	95	195
60	76	176
70	57	157
80	38	138
90	19	119
100	0	100

Frössel [20] suosittelee, että paineettoman injektoinnin käyttörajana pidetään enintään 70 % läpikostumisastetta rakenteen huokosissa. Ruhnau et al. pitää suositeltavana paineettoman injektoinnin käyttörajana rakenteen 50 % kosteuspitoisuutta [43, s.107]. Tätä suuremmilla kosteuspitoisuuksilla tulisi käyttää paineellista injektointia, jotta voidaan varmistua yhtenäisen kapillaarikatkon saavuttamisesta.

Kastuneita rakenteita voidaan tarvittaessa kuivattaa ennen injektointia joko lämmitämällä rakennetta sauvoilla tai mikroaalloilla. Kuivatus voidaan suorittaa myös poistamalla rakenteen pinnoitteet, lisäämällä tuuletusta ja antaa rakenteen kuivua luonnollisesti, kunnes se on kuivunut riittävästi injektoinnin suorittamista varten. [23, s.75]

4.7.4 Paineeton injektointi

Paineeton injektointi on ”perinteinen” ja ensimmäisenä käyttöön tullut injektointitapa. Menetelmää kutsutaan myös valukannutekniikaksi, imeytys- tai valutusmenetelmäksi. Injektointi suoritetaan valuttamalla porareikiin neste- tai laastimuotoisia injektointiaineita, jotka leviävät vähitellen kapillaarihuokosverkossa sulkien sen. Paineettoman in-

jektoinnissa tarvittava imeyttämisaika on injektointiaineesta riippuen päivän tai jopa viikon mittainen. Liuotteellisissa injektointiaineissa tarvitaan lisäksi odotusaika, jonka kuluessa liuote haihtuu, ennen kuin injektointireiät voidaan paikata ja korjata rakenteen pinnat.

Paineetonta injektointia varten on kehitetty erilaisia injektointiaineen määrää ja valumisnopeutta sääteleviä injektointisäiliöitä, joiden avulla injektointiaine imeytetään hitaasti porareijistä rakenteeseen. Yhtenä mahdollisuutena on jäädytetyn injektointiaineen käyttäminen, joka sulaessaan imeytyy hitaasti rakenteeseen. Injektoinnin apuna on käytetty myös reikäsuuttimia, kumisuojuksia sekä sydänlankoja, joiden avulla injektointiaineen imeytymisnopeutta voidaan hidastaa. [23, s.78] Kuvassa 4.11 on esimerkki paineettomasta injektoinnista valukannutekniikalla.

Uusimpia, pari kymmentä vuotta käytössä olleita sovellutuksia on impulssimenetelmä, jossa porareikiin asennetaan injektointilaitteeseen kytketyt suuttimet. Suuttimien kautta laite syöttää automaattisesti tasaisin väliajoin injektointiainetta porareikiin rakenteen imukyvyn mukaan lasketun ainemenekin mukaisesti. Injektointiaineen menekki on hyvin vaikeasti arvioitavissa. Kokemusten mukaan 1 m² poikkipinta-alaan massiivitiiliä kuluu noin 20..40 l injektointiainetta [23, s. 79].

Paineettomassa injektoinnissa injektointiaineessa tulee olla niin pieni hiukkaskoko, että hiukkaset mahtuvat tunkeutumaan rakenteen huokosiin pelkästään injektointiaineen nesteen välityksellä painovoiman ja imun vaikutuksesta. Myös rakenteen kosteuspitoisuus voi asettaa rajoituksia paineettoman injektoinnin käytölle. Paineettoman injektoinnin ongelmana voi olla liian nopeasti sitoutuva injektointiaine, jolloin porareikään kaadettu injektointiaine sitoutuu ennen kuin se ehtii levitä kapillaarihuokosissa. Tällöin reikään lisätty injektointiaine ei enää pääse tunkeutumaan reiän ympärillä hydrofobistuneeseen kapillaariverkostoon ja tiivistävä vaikutus ulottuu vain hiukan porareikien ulkopuolelle. Ongelma koskee erityisesti vesiliukoisia injektointiaineita. [23, s. 77]



Kuva 4.11. Porareikäinjektointi valuttamalla (imeyttämällä).

4.7.5 Paineellinen injektointi

Paineellisten injektointien jaottelu

Paineellisessa injektoinnissa injektointiaine ruiskutetaan rakenteeseen laastipumpun (kuva 4.12) ja injektointitulppien (kuva 4.13 ja 4.14) avulla menetelmästä riippuen alhaisella tai korkealla paineella. Alhaisen paineen menetelmissä käytetty paine on 2..10 baria, kun taas korkeapainemenetelmissä käytetyllä paineella ei ole ylärajaa. Kovin korkeita paineita ei suositella heikkolujuuksisille rakenteille niiden rakenteita mahdollisesti vaurioittavan vaikutuksen takia, minkä lisäksi hyvin korkea paine lisää työturvallisuusriskejä. [20, s. 145] Useimmat injektointiaineet ovat syövyttäviä, ja niitä käyttäessä tulee olla suojavarusteet, kuten silmäsuojat sekä kumihansikkaat. Tyypillisesti korkeita paineita käytetään betonirakenteiden injektointikorjauksissa.

Paineelliset menetelmät ovat paineettomia menetelmiä tehokkaampia, sillä painovoiman sijaan injektointiaine pakotetaan tunkeutumaan rakenteeseen. Myös paineellisissa injektoinneissa injektointiaineen hiukkaskoon tulee olla riittävän pieni, jotta ne voivat siirtyä kapillaarihuokosiin. Paineellisten injektointien hyviä puolia ovat injektoinnin nopea suorittaminen, parempi injektointiaineen määrän säätely sekä nopea leviäminen rakenteeseen. Paineellista injektointia varten rakennetta ei tarvitse kuivattaa ja sitä voidaan käyttää korkean kosteuspiitoisuuden omaavissa rakenteissa.



Kuva 4.12. Paineellisessa injektoinnissa käytettävä, paineilmalla toimiva laastipumppu.

Paineellisesta injektoinnista on useita sovellutuksia injektointiaineesta sekä materiaalin huokoisuudesta riippuen. Hyvin tiiviillä ja tasakoosteisilla materiaaleilla injektointi voidaan tehdä yksivaiheisena paineellisena injektointina. Jos materiaalissa on paljon ilmatiloja tai epäjatkuvuuskohtia, on suositeltavin tapa kaksivaiheinen injektointi, jossa ensin tiivistetään rakennetta injektoimalla ilmatilat täyteen hienojakoisella sementtilaastilla, jonka jälkeen suoritetaan varsinainen injektointi kapillaarihuokokset tiivistävällä aineella.

Erityisen kosteilla materiaaleilla injektointiaineen tiivistävän vaikutuksen syntymistä voidaan tehostaa injektoimalla rakenteeseen injektointiaineen jälkeen kiihdytintä. Tällöin puhutaan kolmevaiheisesta injektoinnista.

Yhtenä paineellisen injektoinnin toteutusvaihtoehtona on jo aikaisemmin paineettomien injektointien yhteydessä mainittu impulssi-injektointi. Impulssi-injektoinnissa käytetty paine on yleensä hyvin alhainen, joten menetelmä jaotellaan usein molempiin, sekä paineellisiin että paineettomiin, injektointimenetelmiin.

Impulssi-injektointi

Paineellinen injektointi voidaan suorittaa ajastetulla impulssi-injektoinnilla, joka on patentoitu injektointimenetelmä. Menetelmässä useita injektointitulppia kytketään yhtä aikaa injektointipumppuun, joka toimii automatisoidusti ja syöttää vähitellen injektointiainetta rakenteeseen [23, s. 79].

Impulssimenetelmän etuna pidetään sitä, että tiilirakenteessa olevien tyhjätilojen täyttämistä ei tarvita hitaasti imeytyvän injektointiaineen takia. Impulssi-injektoinnin hyvänä puolena pidetään sitä, että laitteen automatiikan ansiosta injektoinnin aikana työntekijät pystyvät tekemään muita toimenpiteitä. Impulssi-injektoinnin huonona puolena on se, että menetelmä ei huomioi rakenteen erilaisia kosteusasteita tai eroja huokoisuudessa. Kaikkiin samaan aikaan injektoitaviin reikiin, joita voi olla jopa 64 kpl, injektoidaan sama määrä injektointiainetta. [20, s. 147-149]



Kuva 4.13. Seinän alaosaan on tehty paineellisena injektointina kapillaarikatkovyöhyke. Vanhat rappaukset on poistettu vaurion yläpuolelle ulottuvana vyöhykkeenä. Patteriputket ovat korjauksen aikana paikoillaan, mutta suojattuna muovilla.

Paineellisen injektoinnin toteutus

Paineellisessa injektoinnissa työvaiheiden toteutus on käytetystä menetelmästä riippumatta hyvin samankaltainen. Kabrede & Spirgatis [23, s.141-145] ovat selostaneet kaksivaiheisen paineellisen injektoinnin työtappaa seuraavasti:

- Ensiksi valmistellaan työalue, poistetaan esteenä olevat patterit ja kalusteet, suojataan pinnat ja kalusteet.
- Porareikien tekeminen injektointivyöhykkeelle mahdollisimman vähän värähtelevällä ja materiaaliin soveltuvalla laitteistolla. Porareikien syvyys ja tiheys määritetään korjaussuunnitelmassa.
- Injektointi voidaan suorittaa yksi- tai moniosaisella injektointilaitteella. Laitteen tulee olla varustettu paineensäätimellä sekä sykähdyksen rajoittimella sekä sopia käytettävään injektointiaineeseen.
- Apulaitteina käytetään niin sanottuja pakkaajia (injektointitulppia), joita on tarjolla useita erilaisia injektointitavan mukaan.
- Injektointiaine asennetaan rakenteeseen, niin että se muodostaa yhtenäisen läpimenevän tason.
- Ennen injektointia porareivät puhdistetaan paineilman tai huuhtelun avulla ja reikiin asennetaan injektointitulpat. Tarvittaessa tulpataan / suljetaan vesivuotokohtat, avoimet saumat tai ilmatilat.
- Injektointi suoritetaan järkevällä paineella, joka on määritetty niin että rakenteeseen syntyy yhtenäinen tiivistysvyöhyke. Materiaalivirtaa voidaan kontrolloida avoimien pakkaajien avulla.
- Injektoinnin jälkeen pakkaajat irrotetaan ja pestään tai suljetaan rakenteeseen (kertakäyttöiset). Tarvittaessa suoritetaan jälki-injektointi.



Kuva 4.14. Injektoinnissa käytettävät injektointitulpat eli pakkaajat. Paineellisesti injektoitu sementtilaasti on levinnyt muurauslaastissa ja tullut laastisaumojen epäjatkuvuuskohtien kautta rakenteen pinnalle.

Injektoinnista suositellaan dokumentoitavaksi seuraavat asiat:

- Rakenteen kosteuspitoisuus ennen korjauksia
- Rakennepaksuus
- Pakkaajien sijainti ja määrä
- Lämpötilat (injektointiaine, materiaali ja ympäristö)
- Injektointiaine (tuotenimi, valmistaja, tuote-erän numero)
- Injektointiaineen reaktioaika
- Injektointipaine
- Materiaalimenekki/pakkaaja esim. /m²

Kaksivaiheinen paineellinen injektointi erään materiaalitoimittajan työohjeen mukaan.

Seinän alaosaan porataan halkaisijaltaan 18 millimetrin reikiä 10..12 senttimetrin välein 25..45 asteen kulmassa alaviistoon. Parhain tulos saavutetaan poraamalla reiät kahteen vaakasuuntaiseen riviin. Ennen porausta varmistetaan, että reiät läpäisevät vähintään kaksi muurauslaastikerrosta. Porareikien tulee ulottua noin 50 millimetrin päähän seinän vastakkaisesta pinnasta. Yli 1 metrin paksuisissa seinissä ja kulmissa poraus tulisi tehdä molemmilta puolilta mikäli mahdollista.

Porauksen jälkeen reiät puhdistetaan imuroimalla tai paineilman avulla ja niihin asennetaan laastin ja injektointiaineen täyttönipat. Koneellinen injektointi suoritetaan esimerkiksi DESOI:n pumppulaitteistolla.

Injektoitaessa ruiskutetaan ensin valmistajan ohjeen mukaan sekoitettu sementtipitoinen laasti noin 4..7 barin paineella porareikiin. Injektoitaessa on huolehdittava, että viereiset täyttönipat ovat suljettuina täytön aikana. Laastin sitoutumisen alkaessa nipat aukaistaan ja injektointilaastiin tehdään reiät halkaisijaltaan noin 6 millimetrin metallipuikkoa apuna käyttäen kuvan 4.15 mukaisesti.

Laastin annetaan sitoutua noin 3..4 tunnin ajan, jonka jälkeen injektoidaan valmistajan ohjeen mukaan laimennettu injektointiliuos. Liuos ruiskutetaan reikiin noin 15..20 barin paineella kahteen kertaan. Injektointikertojen välin tulee olla noin 1..2 tuntia.



Kuva 4.15. Injektointireikiin on laitettu metallitangot, joiden avulla sementtilaastiin jää reiät varsinaisen injektointiaineen asentamista varten.

4.7.6 Seinärakenteen tai rakenteen taustapinnan injektointi

Kapillaarikatkon injektointikäsitteistä on kehitetty maanvastaisten seinärakenteiden pystysuuntaiseen tiivistämiseen soveltuvat korjausmenetelmät. Seinärakenteen injektioinnissa koko korjattavan rakenteen pintaosa vähintäänkin puoleen väliin seinäpaksuudesta injektoidaan porarei'istä vastaavalla tavalla kuin kapillaarikatkovyöhyke.

Toisena käyttösovellutuksena on rakenteen taustapinnan injektointi paineellisesti rakenteen läpi porattujen reikien kautta rakenteen takapinnalle, eli maanvastaiselle puolelle. Tätä menetelmää kutsutaan yleisimmin Saksassa nimellä ”vergelung”, ”schleiervergelung” tai ”schleierabdichtung” sekä englanniksi ”curtain injection”, jotka voidaan suomentaa verhoinjektioinniksi sekä harso- tai vaipattiivistykseksi.

Osa lähteistä on erottanut menetelmät niin, että vergelung tarkoittaa seinäpinnan injektioimista ja schleierabdichtung (vaipattiivistys) käsittää rakenteen taustapinnan injektioinnin [56, s.11]. Näitä menetelmiä ei pidä sekoittaa paineelliseen injektointiin, vaikka niissä käytetyt laitteet voivat olla samoja.

Taulukko 4.13 Seinärakenteen ja rakenteen taustapinnan injektioinnissa käytettyjä aineita [43 s.100]

Rakenteen ja rakennuspaikan kosteus	Kosteusrasitus injektioinnin jälkeen	Injektointimateriaali
kostea	maakosteus	bentoniitti, silikaatti, sementti, kosteutta kestävä epoksiharts, PUR, akryylihartsigeeli
kostea	ei paineellinen vesi, paineellinen vesi	bentoniitti, silikaatti-sementti-yhdiste, PUR, akryylihartsigeeli
vettä johtava	ei paineellinen vesi, paineellinen vesi	bentoniitti, silikaatti-sementti-yhdiste, PUR, akryylihartsigeeli

Seinärakenteen tiivistys

Seinärakenteen tiivistyksessä rakenteeseen porataan tasaisin välimatkoin reikiä joko vaakasuoraan laastisaumoihin tai alaviistoon ulottaen reiät lähes koko rakenteen läpi. Koko seinä käsitellään porarei'istä injektioimalla kapillaarisen kosteuden siirtymisen estäväksi rakennekerrokseksi. Injektioinnissa voidaan käyttää paineetonta tai paineellista injektointia sekä vaihtoehtoisia injektointiaineita. Toteutusvaihtoehdot ovat täysin samat kuin kapillaarikatkon injektioinneissa. Kuvassa 4.16 on esimerkki seinärakenteen tiivistyksestä sementtipohjaisella laastilla tehtynä.



Kuva 4.16. Portaiden alla sijaitseva maanvastainen tiiliseinä on injektoitu valuttamalla injektointilaastia laastisaumojen kohdalta alaviistoon porattujen reikien kautta.

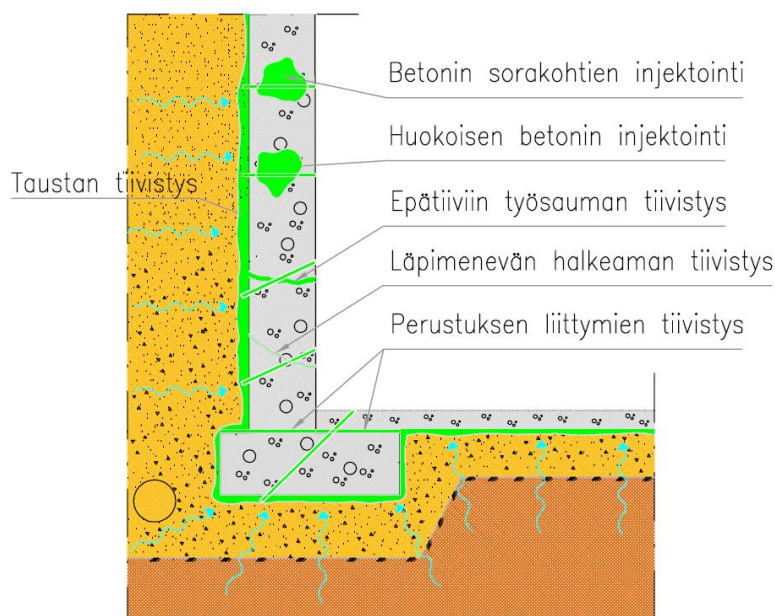
Rakenteen taustapinnan tiivistys

Rakenteen taustapinnan tiivistystä on käytetty sekä luonnonkivistä tehtyjen, etupinnastaan tiiliverhottujen maanvastaisten seinien, että betonirakenteiden tiivistykseen. Korjauksessa rakenteen läpi porataan tasaisin välimatkoin reikiä, joiden kautta taustapinnalle maatäyttön injektoidaan tiivistävää ainetta. Kuvassa 4.17 on periaatepiirustus rakenteen taustapinnan tiivistyksen suorittamisesta.

Käytännössä korjauksen tekeminen maanvastaiselta pinnaltaan luonnonkivistä koostuvaan seinään ei ole järkevää, sillä ulkopinta on epätasainen, rakenteessa voi olla onkaloita ja ilmatiloja, jolloin yhtenäisen tiivistyskerroksen saaminen on vaikeaa. Luonnonkivirakenteita voidaan juottaa ensin betonilla tiiviimmiksi, mutta Ansorgen mukaan korjauksen onnistuminen ei ole varmaa [40, s. 43]. Seinärakenteen yläosasta valutettu betoni ei välttämättä täytä kaikkia luonnonkiviladonnassa olevia ilmatiloja.

Betoniseiniä osalta rakenteen maanpuolinen ulkopinta on suora, jolloin varmuus yhtenäisen tiivistyskerroksen saamisesta on huomattavasti suurempi. Tiivistysaineen saaminen yhtenäiseksi ei ole täysin varmaa, sillä yhtenäisyyttä ei voi todeta millään tavalla. Toimintavarmuutta voidaan lisätä suorittamalla injektointi tiheään porattujen reikien kautta ja käyttämällä suurta ainemenekkiä. Ainemenekkiin vaikuttaa oleellisesti maatäytön huokosrakenne. Mikäli maatäyttö on tiivistä, on ainemenekki pienempi kuin suuren huokoisuuden omaavalla maa-aineksella. Toisaalta taustaan injektoitu aine ei kiinnity rakenteeseen, vaan jää pääosin irralliseksi kerrokseksi rakenteen ja maatäytön rajapintaan, mikä lisää korjauksen epävarmuutta.

Taustapinnan tiivistyksessä tiivistysaineena käytetään sekä mineraalisia aineita (bentoniitti, silikaatti, sementti) sekä muovipohjaisia aineita (akryylihartsigeeli, epoksihartsia ja polyuretaanihartsia [40, s.43]. Käytännössä tiivistysaineen tulee olla geelimäistä tai kosteuden vaikutuksesta turpoavaa, jotta voidaan varmistua yhtenäisen tiivistysvyöhykkeen saavuttamisesta.



Kuva 4.17. Rakenteen taustapinnan injektointi [20, s.280]. Injektoinnilla voidaan tiivistää samalla kertaa lukuisia rakenteen epätiivelyskohtia.

Hyvänä puolena taustapinnan tiivistyksessä on se, että taustan injektoinnin yhteydessä tiivistyvät myös rakenteessa olevat halkeamat, harvavalukohtat sekä liittymät, kuten on esitetty kuvassa 4.17. Taustapinnan injektointia voidaan käyttää myös alapohjien tiivistämiseen, mutta menetelmässä on useita epävarmuustekijöitä. Mikäli alapohjilaatan alla on hyvin läpäisevää maa-ainesta, ei injektointiaine leviä porareijistä sivusuunnassa laatan alle, kuten on tarkoitus. Jos alapohjilaatan alla on lämmöneristekerros, voidaan injektointi suorittaa betonilaatan ja lämmöneristeen väliin, jolloin leviäminen on varmempaa.

4.7.7 Injektointitapojen vertailu ja onnistumiseen vaikuttavat tekijät

Kapillaarikatkoinjektoinnit

Kapillaarikatkojen injektoinnin etuna mekaanisiin menetelmiin verrattuna ovat pienemmät muutokset rakenteen kantavuuteen ja sitä kautta pienemmät halkeiluriskit. Eroa on myös se, että rakenteessa olevat LVI- ja sähköasennukset eivät vaurioidu töitä suoritettaessa. Seinän alaosan rakennekerroksia, kuten rappauksia ei ole välttämätöntä poistaa, ellei niissä ole kosteudesta tai suoloista aiheutuneita vaurioita. Huonona puoleena ovat kosteusvaurioiden uusiutuminen, mikäli käytetyn injektointiaineen kosteuden

siirtymistä estävä vaikutus ei ole riittävä tai injektointiaine ei leviä kauttaaltaan rakenteeseen.

Seinärakenteen injektointikorjausten toimivuus

Rakenteen taustapinnan injektointia pidetään kirjallisuusaineistossa epävarmana menetelmänä, sillä tiivistystyötä tehtäessä ei voida olla varmoja siitä, että injektointiaine täyttää kauttaaltaan rakenteen taustapinnan. Menetelmä voi toimia rakenteissa, joissa täydellistä tiivistystä ei tarvita ja korjaukseksi riittää kosteuden kulkeutumisen osittainen rajoittaminen. Menetelmässä ei voida myöskään arvioida tai säätää materiaalimenekkiä etukäteen, vaan se on täysin riippuvainen tiivistettävän rakenteen ulkopuolen maakerrosten tiiviyydestä. Hienojakoisilla maalajeilla injektointiainetta kuluu huomattavasti vähemmän, mutta samalla injektointiaine leviää rakenteen taustapintaan pienemmälle alueelle [56, s.14].

Harsotiiivistyksen etuna on se, että kapillaarikatkovyöhyke saadaan rakenteen takapintaan, jolloin itse rakenne pääsee kuivamaan [43, s.101]. Rakenteen sisäpinnalle tai rakenteen keskelle injektoidun kapillaarikatkon osalta rakenne säilyy edelleen kosteana. Harsotiiivistyksen huonona puolena on suuri injektointiaineen menekki, minkä lisäksi aineen menekin arviointi on vaikeaa etukäteen. Rakenteen sisään tehtävän injektoinnin osalta ainemenekin määrittäminen on hiukan helpompaa, tosin niissä voi olla eri kohteiden osalta huomattaviakin eroja.

Molemmille koko seinäpintaa tiivistäville injektointimenetelmille on yhteistä se, että korjauksen jälkeen uusia yksittäisiä vesivuotoja voi ilmetä ja kyseiset kohdat joudutaan injektointiin uudelleen [56, s.15]. Injektointikorjauksia käytettäessä on suositeltavaa tehdä seinän sisäpintaan varmistus, jolla estetään mahdollisen edelleen rakenteen läpi kulkeutuvan kosteuden tai rakenteen kuivamisen yhteydessä tiilimuuratulle seinäpinnalle kulkeutuvien suolojen aiheuttamien ulkonäköhaittojen estämiseksi suolankeräyslaastirappaus. Betonipinnoilla suolankeräyslaastien käyttämisen sijaan voidaan seinän kosteutta kestävämpään tasoitekerros vaihtaa kosteutta paremmin kestävään sementtitasoi- teeseen. Molemmissa tapauksissa seinän pintakäsittelyn tulee olla vesihöyryä hyvin läpäisevä, vastaavasti kuin suolankeräyslaastien yhteydessä on esitetty.

Injektointikorjausten toimivuus

Injektointikorjausten toimivuutta epäillään, sillä ei ole mahdollista todeta injektointiaineen tunkeutumista rakenteeseen ilman rakenteen purkamista tai rakennetta rikkovien koekappaleiden ottamista. Useimmiten käytetyt injektointiaineet ovat värittömiä tai harmaita, joten niiden erottaminen laastisaumoista on lähes mahdotonta ilman suurentavia apuvälineitä. Toisena epäilyksen kohteena on injektoinnin pitkäaikaiskestävyys. Tiettyt injektointiaineet voivat rakenteessa käynnissä olevan kemiallisen reaktion seurauksena hävitä, jolloin niiden tiivistävä vaikutus lakkaa ja kosteuden nousu kapillaarisesti voi uusiutua.

Rakennushallituksen teettämässä tutkimuksessa on todettu injektoinnin vähentävän kapillaarista kosteuden nousua 90 % [12, s. 29]. Tutkimuksessa injektointi suoritettiin

imeyttämällä injektointiainetta koepilareihin sekä tekemällä imeytyskokeita myös yksittäisiin tiiliin. Koerakenteessa kokeiltiin injektoinnin säätelemistä erilaisista materiaaleista tehtyjen injektointisukkien avulla, jotka estävät injektointiaineen liian nopean imeytymisen.

Injektointikokeissa on todettu injektointiaineiden kulkeutuvan hitaasti tiilen huokosissa [12]. Injektointiaineen vaikutus laastisaumoissa tapahtuu tasaisemmin, ja on todennäköistä, että kapillaarikatkovyöhykkeen saavuttaminen tapahtuu helpoiten juuri kyllästämällä laastisaumat. Tähän tähtäävät myös saksalaisten lähteiden ja materiaalien käyttöohjeiden esittämät poraukset alaviistoon, joilla pyritään saavuttamaan useita laastisaumoja. Injektoimalla pyritään pääsääntöisesti muodostamaan kapillaarikatkovyöhyke laastisaumoihin, eikä niinkään itse tiiliin.

Paineeton injektointi valukannutekniikalla imeyttämällä on useiden lähteiden mukaan melko epävarma menetelmä [23, s.77; 43, s.107]. Porareikiin kaadetaan injektointiainetta, eikä pystytä seuraamaan paljonko ja kuinka nopeasti injektointiainetta kuluu. Oleellisesti järkevämpänä pidetään nk. suppilo- tai pullomenetelmää, jossa porareikään asennetaan tiiviisti suppilonmuotoinen säiliö, johon kaadetaan nestemäistä injektointiainetta. Suppilon tyhjentymisen myötä voidaan seurata injektointiaineen valumista ja lisätä injektointiainetta. Pullomenetelmässä reikään asennettuun telineeseen kiinnitetään ylösalaisin oleva pullo, josta on johdettu injektointiväliaineen avulla hitaasti injektointireikiin. Injektointiaine voidaan säiliöiden avulla jättää pitemmäksi aikaa valumaan. Viime aikoina käyttöön on tullut uusia säiliöitä, joissa voidaan esimerkiksi säätää injektointiaineen valumisnopeutta.

On esitetty epäilyksiä siitä, voiko kastuneisiin rakenteisiin saada tunkeutumaan injektointiainetta ilman rakenteen kuivattamista. Täysin läpimäräksi kastuneeseen ja vedellä kyllästyneeseen rakenteeseen injektointiaineen paineettomasti ei todennäköisesti tule onnistumaan ilman kuivatusta. Alhaisemmilla läpikostumisasteilla (enintään RH 50 % - 60 %) paineettomien injektointimenetelmien pitäisi toimia ja alentaa tiilimuurin kapillaarien imukykyä. Taulukon 4.13 perusteella voidaan päätellä rakenteen kosteuspitoisuuden vaikutusta injektoinnin onnistumiseen.

Lähteiden mukaan paineellisella injektoinnilla saavutetaan todistettavasti paineetonta injektointia suurempi kyllästysaste ja varmuus uusia kosteusvaurioita vastaan. Työmaalla tehtyjen havaintojen perusteella injektointiaineen tunkeutuminen rakenteeseen oli osittain nähtävissä rakenteen ulkopuolelta. Ruhnau et al. esittää, että paineellisen injektoinnin nopeampi läpikyllästys ja tarvittavan injektointiaineen määrän parempi kontrolloimismahdollisuus ovat argumentteja paineellisen injektoinnin puolesta [43, s.107]. Paineellisesti tehtävä injektointi toimii rakenteessa olevaa kosteutta syrjäyttävästi pakottaen veden siirtymään kapillaarihuokosista vapaisiin ilmahuokosiin. Etenkin vesiliukoisilla injektointiaineilla tehtävissä injektoinnissa rakenteessa olevan veden voidaan ajatella toimivan injektointiainetta laimentavana nesteenä, eikä injektointiaineen etenemistä estävänä vyöhykkeenä.

Injektointikorjausten riskitekijät

Kapillaarikatkojen injektoinnin riskitekijöitä voidaan listata seuraavasti [mukaellen 23, s. 77]

- liian suuri porareikien ja reikärivien välinen etäisyys
- rakenteen epähomogeenisuus ja tyhjätilat
- rakenteen korkea kosteuspitoisuus
- injektointiaineen vaikutuksen periaate
- injektointiaineen jakautuminen kapillaarihuokosissa
- vaikutustavan hidas kehittyminen (esim. hydrofobisuuden rakentumisen kesto)

Useiden menetelmien ja injektointiaineiden käyttäminen on aiheuttanut asiantuntijoiden kesken Saksassa ja myös Suomessa keskustelua joidenkin menetelmien toimivuudesta tai toimimattomuudesta. Frössel toteaa, että keskustelussa ei huomioida lainkaan esimerkiksi erilaisten injektointiaineiden vaikutuksen ja injektointitekniikoiden riippuvuutta toisistaan. Hänen mukaansa tulisi saada yleinen menetelmäohje, jossa kerrotaan millaisissa kohteissa mitäkin injektointiainetta ja injektointitapaa voidaan käyttää [20, s.101]. Vastaavia tarpeita on havaittu myös Suomessa, vaikka täällä käytetyistä menetelmistä on kokemuksia vain 15..20 vuoden ajalta.

4.8 Lattioiden korjaustapoja

4.8.1 Yleistä

Kosteiden maanvastaisten alapohjan betonilaattojen korjaustapaa valittaessa on aina mietittävä, miksi korjausta tarvitaan. Betonilaatan alaosasta tai rakenteen alla olevasta eristeestä tai maatyöstä mitattu korkea kosteuspitoisuus ei yksinään ole rakenteen korjausta edellyttävä tekijä. Ratkaisevampaa on se, mikä on betonirakenteen pintaosassa tai muovimaton alla vallitseva kosteuspitoisuus. Tällöinkin melko uusien tai juuri korjattujen rakennusten osalta tulee arvioida, mikä on esimerkiksi valutöistä aiheutuneen lisääntyneen rakennekosteuden vaikutus betonilaatasta mitattuihin korkeampiin kosteuspitoisuuksiin ja voiko syynä vaurioitumisen syynä olla rakenteen liian aikaisin tehty pinnoitus. Erityisesti tulee huomioida se, että vanhan alapohjan betonilaatan pinnoittamisen jälkeen tapahtuva lattiapinnoitteen vaurioituminen johtuu yleensä aina maaperästä tulevasta kosteudesta ja se voidaan todeta rakennekosteusmittauksin.

Jos rakennekosteusmittausten perusteella todetaan, että rakenteen kastumisen syynä on maapohjasta haitallisessa määrin kulkeutunut kosteus, ei se välttämättä johda koko rakenteen uusimiseen, vaan korjaustavaksi voidaan valita rakenteen pintakerroksen ja erityisesti lattiapinnoitteen uusiminen vesihöyryä paremmin läpäisevämmäksi. Kosteita betonialapohjia ei voida pinnoittaa tiiviillä pinnoitteilla, kuten muovi- tai kumimattoilla, ilman betonilaatan pintaan tulevaa kosteuden katkaisevaa sivelyä tai tuulettuvaa rakennetta.

Yhtenä tyypillisenä lattioiden vauriomekanismina on kosteuden siirtyminen kanta-
vasti seinärakenteesta alapohjarakenteen reuna-alueelle. Kosteutta voi siirtyä seinästä
lattiabetoniin niin paljon, että lattiapinnoite vaurioituu. Tämä kosteuden siirtyminen
tulee estää mahdollisuuksien erottamalla rakenteet erotuskaistoin sekä kosteutta siirtä-
mättömällä lattianrajan ilmatiiivistyksellä.

4.8.2 Laattalattia

Alapohjarakenteen kosteusrasituksen ollessa pieni, voidaan korjaustoimenpiteenä harki-
ta kostean betonilaatan pinnoittamista keraamisella tai kiviaineisella laatoituksella, jo-
hon jätetään muutaman millimetrin saumaraot. Keraaminen laatoitus kestää kosteusrasi-
tusta ja kosteus voi haihtua laatoituksen saumojen kautta sisäilmaan. Keraamisen laatoi-
tuksen käyttö kosteissa olosuhteissa edellyttää kuitenkin kosteutta kestävien tasoitteiden
ja kiinnityslaastien käyttöä, jotta vähennetään mikrobikasvustoille alttiiden kerrosten
syntymistä.

Ennen korjausta betonirakenteen pinnasta on poistettava vanhan pintamateriaalin
kiinnitysliimat sekä kosteutta kestävämmät (yleensä kaseiinia sisältävät) tasoitteet,
jotta varmistetaan laatoituksen tartunta alustaan. Toisena ja merkittävämpänä syynä on,
että niiden reagoidessa kosteuden kanssa syntyy sisäilman laatua heikentäviä ja tervey-
delle haitallisia epäpuhtauksia. Jos rakenteessa on kosteuden lisäksi suolarasitusta, voi
laatoituksen saumoihin syntyä suolan vaikutuksesta värjäytymää, joka korostuu etenkin
tummia saumalaasteja käytettäessä. Kyseessä on lähinnä esteettinen haitta.

4.8.3 Tuulettuva lattia

Toimintatapa

Tuulettuvia lattiarakenteita käytetään ehkäisemään alapohjien kosteuden aiheuttamia
sisäilmaongelmia. Menetelmässä poistetaan vanhat lattianpäällysteet tasoitteineen puh-
taaseen betonipintaan asti. Betonilaatan päälle tehdään luonnollisesti tai koneellisesti
tuuletettu ilmapäli. Tuuletuksen avulla alennetaan maanvaraisen laatan yläpinnan koste-
uspitoisuutta. Tampereen teknillisen korkeakoulun (nykyisin teknillinen yliopisto, TTY)
alapohjarakenteita koskevan tutkimushankkeen loppuraportissa on käsitelty tuulettuvan
lattiarakenteen kosteusteknistä toimintaa teoreettisesti [1].

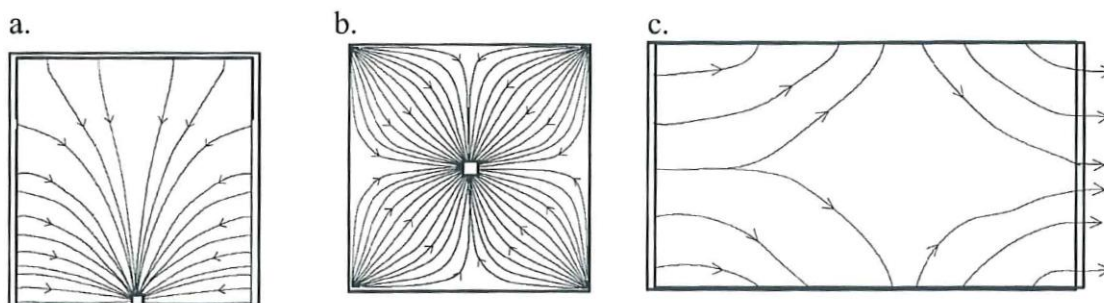
Tuuletusrako voidaan tehdä monella tavalla. Valmiita korjausratkaisuja tarjoavilla
yrityksillä käytetään muotoonpuristettua profiloitua muovilevytystä tai uritettua kumi-
mattoa, mutta tuuletusväli voidaan tehdä myös muilla rakenneratkaisuilla, kuten muoto-
teräksellä, teräskoolauksella, sepelillä, kevytsoralla tai geokomposiitilla. Tuuletusvälin
muodostavan materiaalin päälle asennetaan yleensä rakennuslevytys tai pintabetoni,
joka voidaan päällystää vapaavalintaisella materiaalilla. [1; 57; 58]

Mitoittaminen ja suunnittelu

Leivo & Rantala [1] ovat esittäneet tuulettuvan lattiarakenteen mitoitusperiaatteet ja las-
kentakaavat. Periaatteena on, että tuuletusvälissä liikkuvan ilman kosteus ei ylitä kyläs-

tyskosteuspitoisuutta, joka mahdollistaa homekasvun syntymisen. Tarvittavan tuuletusilman määrä riippuu ilmvälin suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta, tuuletusilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta sekä pohjamaan lämpötilasta ja alapohjarakenteen kosteustuotosta. Tehdyn mallinnuksen mukaan kapillaarisesti nousevan kosteuden aiheuttaman 80 mm:n paksuisen maanvaraisen laatan kohonneen kosteuden tuulettumiseen riittää K25-K40 –luokan betonilaatoilla 10 mm:n tuuletusväli. K20-luokan betonilla tuuletusvälin suuruudeksi on saatu mallinnuksessa noin 13 mm:n ilmväli. Mallinnuksessa on pidetty ilmvälin suhteellisen kosteuden raja-arvona RH 75 %. Betonilaatan paksuudesta, olosuhteista ja tuuletusmatkasta riippuen tuuletukseen voi riittää myös pienempi, 3-6 mm:n ilmväli. [1, s.102-103; 2]

Leivo & Rantala [1, s.44] ovat esittäneet periaateratkaisuja suorakaiteen muotoisten tilojen tuuletuksen järjestämiseen, joita on nähtävissä kuvassa 4.18. Tuulettavat tilat voivat olla myös suorakaiteesta poikkeavia, jolloin virtauksen järjestäminen koko lattia-alueelle on suunniteltava tilakohtaisesti. Myös materiaalitoimittajat suosittelevat ilmankierron suunnittelemista jokaiseen kohteeseen erikseen. Erityisen tärkeää on varmistaa, että koko alue tuulettuu ja nk. katvealueita ei pääse syntymään. Tuuletusväliin ohjataan tietyistä kohdista korvausilmaa ja asennetaan toisaalle alipaineistustuuletin, jonka teho mitoitetaan tarvittavan ilmanvaihtuvuuden mukaisesti.



Kuva 4.18. Tuuletusvälin ilmankiertosuunnitelmia [1]

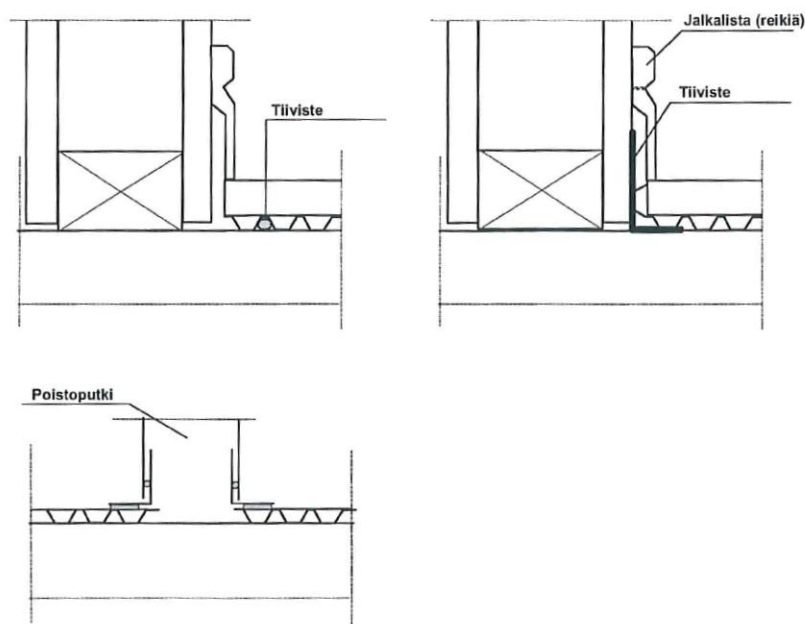
Suunnitelmallisen ilmankierron varmistamisen edellytyksenä on, että kaikki tuuletusvälin läpiviennit ja rakenteiden liittymäkohdat tiivistetään huolellisesti. Erityinen huomio tulee kiinnittää tiivistyksessä käytettäviin materiaaleihin. Tiivistysmateriaalien tulee olla pitkäikäisiä ja kestää myös rakenteiden liikkumisesta aiheutuvat rasitukset. Yksinomaan tuuletusvälin yläpuolisten rakenteiden liittymäkohtien tiivistäminen ei ole riittävä varmistus suunnitelmallisen ilmankierron saavuttamiseksi. Tuuletusväliin toimitella korvausilmaa myös maaperästä päin betonilaatan epätiivisyyskohtien kautta ja nämä raot tulisi tiivistää ennen tuulettuvan rakenteen asennusta. Kuvassa 4.19 on esitetty joitakin liittymien toteutusperiaatteita.

Tuulettuvan rakenteen suunnittelussa on huomioitava liittyvät rakenteet, kuten ovien kynnykskorkeudet, huonekorkeudet ja väliseinärakenteet. Useimmiten toimivin ratkaisu saavutetaan vanhaa lattianpintaa mahdollisimman vähän korottavilla ratkaisuilla, eli teräsprofiilin tai muovilevytyksen käyttämisellä, jolloin välttyään suurilta liittymäraken-

teiden korjaus- tai vaihtotoimilta. Pienen tuuletusvälin riskinä on kuitenkin liian heikko tuulettuminen, joka lisää homeenkasvun riskiä tuuletusvälissä.

Tuuletuksen varmistaminen

Pelkästään luonnollisella ilmanvaihdolla toimivan rakenteen ilmanvaihtuvuus on hyvin suurella todennäköisyydellä riittämätön. Tuuletuksen varmistamisen vähimmäisvaatimuksena on tuuletusvälin poistoilmakanavan liittämisen suoraan ulos johtavaan poistoilmanvaihtokanavaan alipainetuulettimen avulla. Tuuletuksen liittämisen olemassa olevaan ilmanvaihtojärjestelmään tulee tehdä likaiseen poistoon, jotta estetään mahdollisissa häiriötiloissa tuuletusvälin poistoilman pääsy muualle tiloihin. Parhain ja toimintavarmoin vaihtoehto rakenteen tuulettamiseen on kanavoida lattiarakenteen tuuletus täysin omana järjestelmänään, johon on yhdistetty myös suodatetun puhtaan korvausilman syöttö.



Kuva 4.19. Tuuletusvälin liittymien toteutustapoja [1]

Tuulettettu lattia voidaan pinnoittaa tarpeen mukaan puu- ja levyrakenteilla tai pinta-betonilaatan ja vapaavalintaisen pinnoitteen yhdistelmällä. Rakenteeseen voidaan asettaa myös lattialämmitys. Käytetty levytyyppi ja rakennekerrokset valitaan asennettavan lattiapinnoitteen ja ääneneristysvaatimusten mukaan. Paras tulos saavutetaan asentamalla tiivis muovimatto seinäylösnostoineen, jolloin saadaan mahdollisimman ilmatiivis rakenne ja tuuletus tapahtuu vain suunnitelluista kohdista. [57; 58]

Korjauksen vaikutus tilojen käyttöön

Rakennuksen käyttäjien tulee huolehtia, että ilmarakoja ei peitetä ja tai estetä muulla tavoin ilmankiertoa. Myös mahdolliset muutokset talon ilmanvaihtojärjestelmässä vaikuttavat tuulettuvan lattian toimintaan. Koneellisesti tuulettujen järjestelmien osalta tulee huolehtia koneiden huolloista sekä suodatimien puhdistuksesta. Erityinen huomio

tulee kiinnittää huoneilmasta korvausilman saavien tilojen suodattimien vaihtoon, sillä epäpuhtaat suodattimet vähentävät huomattavasti korvausilman saantia.

Muut tuulettumiseen perustuvat korjausratkaisut

Yhtenä tuulettuvan rakenteen sovellutuksena on maanvaraisen betonilaatan alapuolisen maataytön tuulettaminen tai alipaineistaminen vastaavin periaattein kuin radonkorjauksissa. Molemmissa vaihtoehdoissa ilman liikkuminen maakerroksessa tulee tehdä koneellisesti. Alipaineistamisen osalta alapohjarakenteen tulee olla mahdollisimman ilmatiivis huonetiloihin nähden, jotta voidaan varmistua riittävän alipaineen saavuttamisesta alapohjarakenteen yli. Tuulettamiseen perustuvassa vaihtoehdossa alapohjan tulisi olla vastaavasti yhtä lailla ilmatiivis, mutta alapohjaan ohjataan korvausilmaa erillisen suunnitelman mukaan.

Nämä menetelmät on helpointa toteuttaa alapohjarakenteen uusimisen yhteydessä, mutta mikäli vanhassa alapohjarakenteessa on ilmanliikettä helposti läpäisevä täyttökerros, voi korjaus olla mahdollista toteuttaa vanha alapohja säilyttäen. Tällöin korjauksessa varmistetaan rakenteiden liittymien ilmatiiveys sekä järjestetään alapohjarakenteen alipaineistus tai tuuletus radonkorjausohjeessa esitetyn imupistemenetelmän mukaisilla periaatteilla.

Tuulettuvaa rakennetta voidaan käyttää myös maanvastaisten seinärakenteiden korjauksessa. Seinärakenteiden osalta tuulettuvien korjausratkaisujen käyttö tulee ratkaista tapauskohtaisesti asiantuntevan suunnittelijan avustuksella. Korjauksen riskinä ovat rakenteen yläosassa tapahtuva kosteuden kondensoituminen sekä ilmaväliin mahdollisesti muodostuvat, tuuletuksen toimintaa häiritsevät suolakiteytymät.

4.8.4 Epoksi- ja akryylikäsittelyt

Mikäli maanvaraisen alapohjan kapillaarikatkerros puuttuu tai on puutteellinen, voidaan korjaustavaksi valita rakenteen uusimisen sijaan pinnoitekäsittelyt. Kostean betonilaatan pintaan asennetaan kosteutta heikosti läpäisevä kerros, kuten epoksi- tai akryylilakkaus. Epoksi- ja akryylipinnoitteissa on erilaisia vaihtoehtoja maalimaisista ohuista pinnoitteista muutaman millimetrin vahvuisiin massapinnoitteisiin [32]. Pinnoitteiden kosteuden ja kemikaalien kestävyudessa on eroja, ja vain osa markkinoilla olevista pinnoitteista sopii käytettäväksi kosteiden alapohjien pinnoittamiseen.

Pinnoite on lähes vesihöyryä läpäisemätön, jolloin rakenteen kosteustekninen toiminta muuttuu. Aikaisemmin kosteutta on päässyt kulkeutumaan vesihöyryinä jossain määrin sisäilmaan, mutta tiiviin kerroksen myötä rakenteen kosteusliikkeet tapahtuvat kerroksen alla. Käytännössä tiiviin pinnoitteen seurauksena sallitaan alapuolisen rakenteen olevan kostea. Tästä on seurauksena se, että kosteuden siirtyminen seinärakenteiden kautta voi lisääntyä, mikä tulee huomioida korjauksen toteutuksessa ja tehdä tarvittaessa ennalta ehkäisevät pinnoitekorjaukset seinien alaosiin.

Normaalisti kostean betonilaatan aiheuttamat sisäilmaongelmat johtuvat lattiapinnoitteena olevan muovimaton kiinnitysliiman vaurioitumisesta kosteuden vaikutuksesta. Lähes vesihöyryä läpäisemättömällä lakkapinnoitteella käsitellyyn alapohjan betonilaat-

taan voidaan asentaa lattianpinnoitteeksi muovimatto tai muu normaalisti kostealle alustalle soveltumaton pinnoite.

Epoksi- tai akryylipinnoitteet ovat hyvin kulutusta kestäviä sekä niissä on lukuisia väri vaihtoehtoja, minkä takia ne voidaan haluttaessa jättää myös viimeistelypinnaksi. Osa etenkin vesiliukoista pinnoitteista läpäisee jonkin verran diffuusiolla siirtyvää kosteutta, minkä vaikutuksesta alapohjalaatta pystyy kuivumaan vähäisessä määrin sisälle päin. Näiden pinnoitekäsittelyjen toimintaa ei ole testattu laajasti kosteusongelmaisten kohteiden korjauksissa.

Massamaisten päällysteiden käytössä havaittuja ongelmia ovat pinnoitteeseen syntyvät kuplat, jotka voivat olla halkaisijaltaan alle senttimetrin koosta useisiin sentteihin. Näiden kuplien syntyä ei tarkasti tiedetä, mutta on epäilty niiden syntyvät pinnoitteen läpi syntyvät osmoottisen paineen vaikutuksesta. Kun massapäällysteen kiinnitys alustaan on puutteellinen ja päällysteen kerrosvahvuus on pieni, aiheuttaa pinnoitteen yli syntynyt vesihöyryn osapainero pinnoitetta kiinnittävää voimaa suuremman voiman ja pinnoite irtoaa alustasta muodostaen kuplan. Useimmiten kuplien sisällä on vahvasti alkaalista vettä [43, s.247].

Ongelmaa esiintyy erityisesti ohuilla massapinnoitteilla sekä myös epoksimaaleilla. Paksummilla massapinnoitteilla kiinnittävä voima on suurempi, ja osmoottisten kuplien syntyminen riski pienempi. Osmoottisten kuplien esiintyminen on yleisempää liuotinhenteisillä tuotteilla [43, s.249], mikä johtuu niiden heikommasta vesihöyrynläpäisevyydestä verrattuna vesiohenteisiin tuotteisiin. Osmoottisten kuplien syntymistä voidaan estää huolellisella rakenteen pohjustustyöllä. On havaittu, että mikäli pinnoitteen alle jää epäpuhtauksia, on kuplien syntyminen riski huomattavasta suurempi. Jos rakenteen pinnalla on epäpuhtauksia tai vesiliukoisessa pinnoitteessa on suolayhdisteitä, voi asennushetkellä vallitseva suuri ilmankosteus liuottaa suolan. Pinnoitteen alle muodostuu tällöin pieni kuplan alku, johon alkaa kulkeutua diffuusiolla kosteutta ja muodostuneen kuplan sisältämän liuoksen konsentraatio alenee ja sen tilavuus kasvaa. Seurauksena on kuplan kasvaminen suuremmaksi. [59, s. 128-129]

4.8.5 Lattioiden tiivistys

Vanhoissa, 1900-luvun alun vuosikymmeninä rakennetuissa rakennuksissa alapohjassa on yleisesti käytetty kaksinkertaista betonilaattaa, jossa laattojen välissä on ollut kosteuskatkona bitumikerros. Vastaavanlaisella rakenteella voidaan tehdä myös kosteusrasitetun alapohjarakenteen korjaus. Saksalaisessa jälkikäteen tehtäviä tiivistyskorjauksia koskevassa WTA-ohjeessa [45] on esitetty, että alapohjien tiivistyksissä voidaan käyttää sementtipohjaisia tiivistyslaastijärjestelmiä, vesitiivistä betonia sekä kylmälevitettäviä bitumiemulsioita, nestemäisiä muovipinnoitteita sekä tiivistyslevyjä.

Tiivistyskorjauksessa tiivistävän kerroksen alapuolinen betonilaatta jää kosteaksi. Tiivistävä kerros toimii rakenteessa kapillaarikatkona sekä käytetystä materiaalista riippuen ainakin joidenkin materiaalien osalta diffuusiokatkona.

Vanhan lattian päälle tehtävä uusi betonivalu madaltaa huonekorkeutta, mikä aiheuttaa muutostarpeen myös tilojen välisille oville karmeineen sekä kevyille levyrakenteisil-

le väliseinille. Kiviaineiset väliseinät voi olla mahdollista säilyttää, mutta niiden osalta tulee huolehtia liittymärakenteen toteutuksesta, niin kosteuden kuin ilmatiiveydenkin osalta. Korjauksen hyötynä on korjauksen yhteydessä saavutettu alapohjan liittymien ilmatiiveyden parannus. Vanhan betonilattian päälle tehtävässä korjauksessa hyötynä on myös lyhyempi työaika, kun vanhaa rakennetta ei pureta.

4.9 Sähköiset kosteudenhallintamenetelmät

4.9.1 Yleistä

1970-luvulla kehitettiin ensimmäiset elektro-osmoosiin perustuvat maanvastaisten rakenteiden kuivatusmenetelmät. Järjestelmien toiminnassa on kuitenkin ollut puutteita, ja monissa lähteissä elektro-osmoosimenetelmät on luokiteltu toimimattomiksi ja niiden käyttöä ei suositella. Elektro-osmoosiin perustuvia menetelmiä on nimitetty myös elektrofysikaalisiksi sekä elektrokineettisiksi menetelmiksi.

Frössel'n mukaan elektrofysikaaliset kuivatusmenetelmät ovat toimineet joissakin tapauksissa, kun taas toisaalla järjestelmä ei ole toiminut halutulla tavalla. Toimivuuden ja toimimattomuuden syyt ovat epäselviä, eivätkä menetelmiä markkinoivat tahot osaa selkeästi kertoa menetelmän toimintatavasta ja –edellytyksistä. Frössel peräänkuuluttaa toimittajien taholta parempaa tiedottamista, jotta menetelmää kohtaan vallitseva epäietoisuus vähenisi. [20, s.101, 180]

4.9.2 Sähköosmoosi eli elektro-osmoosi

Yleisimmin tunnetut elektro-osmoosiin perustuvat menetelmät ovat aktiivinen ja passiivinen menetelmä. Aktiivisessa elektro-osmoosissa rakenteeseen ja maaperään asennetaan elektrodit, joiden välille aiheutetaan generaattorin avulla jännite, jonka suuruus säädetään vastamaan rakenteessa olevaa polaarisuutta. Tyypillisesti käytetty jännite on alle 24 voltia. Aktiivista menetelmää pidetään virtaakuluttavana ja se vaatii jatkuvaa menetelmän ja laitteiden toiminnan seuranta [60, s. 165]. Passiivisessa menetelmässä maahan ja rakenteeseen asennetut johtimet kytketään oikosulkuun, jolla pyritään neutralisoimaan rakenteessa olemassa oleva potentiaali.

Elektro-osmoosiin perustuvaa tiilirakenteiden kuivatusta on testattu Suomessa Teknillisen korkeakoulun tekemissä kenttäkokeissa Rakennushallituksen toimesta. Elektro-osmoosikuivatusjärjestelmä asennettiin vuonna 1991 valtion virastotaloon Helsingissä ja sen toimivuutta seurattiin 2,5 vuoden ajan. Seurannan perusteella rakenteen suola- ja kosteuspitoisuuksissa havaittiin alenemista, mutta lattian rajassa kosteuspitoisuus oli edelleen kapillaarisella alueella ja vauriot uusiutuivat seurannan aikana. Seurannan aikana ei saatu varmuutta siitä, kuivaako rakenne menetelmän avulla hygroskooppisen kosteuspitoisuuden alueelle. [28]

Teknillisen korkeakoulun tekemien laboratoriomittausten perusteella vedenkuljetus loppui lähes kokonaan konsentraation ollessa 0,4 mol/l. Kokeissa huomattiin myös tiilen vedenkuljetuskyvyn kasvavan noin 120-kertaiseksi, kun konsentraatiota pienennet-

tiin 0,4 -> 0,1 mol/l. Laboratoriokokeissa käytettiin kuitenkin huomattavasti suurempaa virtaa kuin menetelmän rakenteisiin asennettavissa sovelluksissa käytetään.

Sähköisten menetelmien testaamista ja tutkimusta tulisi lisätä, sillä epäonnistumisista huolimatta menetelmä on toiminut osassa kohteita. Tuoreimpia tutkimuksia on Tanskassa kehitetty sovellutus elektro-osmoosin tai elektrokineesin käyttö yksittäisten tiilien suolanpoistossa rappauksen ja seinämaalauksen läpi [61].

4.9.3 EOP- Vaihtuva sähköosmoosi

Yhdysvalloissa on kehitetty elektro-osmoosiin perustuva rakenteiden kuivatusmenetelmä EOP (Electro-Osmotic Pulse Technology) eli vaihtuva sähköosmoosi. Menetelmässä asennetaan positiiviset elektrodit betoniseinään tai lattiaan piikattuihin uriin ja negatiiviset elektrodit rakenteen ulkopuoliseen maahan. Sijainnin määrää rakenteelle ja maaperälle tehty vastustesti - tarkoituksena on saavuttaa betoniin tietty virrantiheys.

Elektrodien välille aiheutetaan tasavirralla jännite, joka koostuu positiivisesta sekä negatiivisesta virta pulssista sekä taukoajasta. Positiivisen pulssin kesto on pisin ja negatiivisen pulssin kesto aika lyhin, kokonaisaika tällä vaihtelulla on 2..10 sekuntia. Tuloksena on huokosnesteen virtaus keskimäärin yhteen suuntaan.

Menetelmää on testattu betonisten rakenteiden kuivatuksessa Yhdysvaltain armeijan rakennuksissa ja kokeista on ilmestynyt raportti vuonna 1997 [29]. Tutkimuksia on jatkettu laboratoriokokeiden ja kenttätutkimusten avulla, joista on julkaistu tutkimusraportti vuonna 2002 [62]. Tehdyissä laboratoriokokeissa määritettiin erilaisten vesisementtisuhteen omaavien betonikoeappareiden sähkönjohtavuutta suolaliuoksessa. Kenttätutkimuksessa rakennettiin kaksi tutkimuskellaria, toinen massiivibetonista valamalla, toinen betoniharkoista muuraamalla. Kellareiden ulkopuolisessa täytössä käytettiin eri materiaaleja, samoin seinärakenteissa tehtiin eri variaatioita. Tutkimuksessa seurattiin seinän kosteuspitoisuuden muutoksia ulkopuolista kosteusrasitusta lisättäessä sekä EOP-järjestelmän käytön aikana. Sittemmin menetelmää on käytetty useissa Yhdysvaltojen armeijan käytössä olevissa rakennuksissa sekä maantie- ja metrotunneleissa ja kahdessa patorakenteessa [63].

Toiminnan edellytykset

EOP-menetelmän toiminnan edellytyksenä on, että materiaalissa 1) on kapillaarihuokosia, joissa kosteus voi liikkua, 2) on määrätty pintavaraus, kuten savi, betoni tai vastaava materiaali, 3) on kyllästynyt kosteuspitoisuus, 4) olevan nesteen on oltava laimea elektrolyytti. Järjestelmän suunnitteluun vaikuttavat maaperän mineraalikoostumus, sen kosteuspitoisuus ja huokosveden kemialliset yhdisteet.

Kosteuden kulkeutumiseen vaikuttavat maaperän ja rakenteen ionien konsentraatio, materiaalit sekä sähkökentän voimakkuus, eli vaatimuksena on, että maa-aines ja pohjavesi toimivat elektro-osmoosin väliaineena, esim. saviperäinen maa ja suolaton pohjavesi. [62] Maaperän virranjohtavuus riippuu sen sisältämästä kosteudesta. Kun vesi poistuu elektro-osmoosin vaikutuksesta, pienenee myös sähkönjohtavuus. Vakiojännitteellä maaperän resistiivisyyden kasvu vähentää järjestelmän virtaa ja edelleen elektro-

osmoottista kosteuden kulkeutumista. Tutkimuksissa tehtyjen havaintojen mukaan elektro-osmoosi on savessa 100 kertaa voimakkaampi betoniin verrattuna.

Toimivuuden edellytyksenä on, että järjestelmän avulla saavutettu elektro-osmoottinen voima on yhtä suuri tai suurempi kuin vaikuttava hydrostaattinen paine. Järjestelmän avulla on mahdollista pysäyttää kosteuden siirtyminen rakenteeseen, tai siirtää kosteuden kulkusuunta rakenteesta katodille.

Menetelmän toimivuus tiilirakenteissa on vielä epäselvää. Sähkökentän muotoutumista epähomogeenisessa aineessa ei tunneta, ja sen kokeellinen määrittäminen on ongelmallista [63, s.18]. Parhaiten menetelmä toimii tasakoosteisissa rakenteissa, joissa myös ulkopuolinen maakerros on tasalaatuinen, jolloin on todennäköistä, että tiilirakenteissa menetelmän toimivuus on kyseenalaista. Betonissa olevat raudoitteet vaikuttavat jossain määrin sähkökentän toimintaa heikentävästi. Niiden vaikutusta kosteuden siirtymiseen tai menetelmän toimivuuteen ei ole selvitetty tehtyjen tutkimuksien yhteydessä.

Järjestelmällä saavutettava kosteudenkuljetuskyky vastaa noin 3 metrin hydraulista painetta. Menetelmässä käytetyn pulssin jännite on yleensä välillä 20..40 volttia, maksimina pidetään turvallisuussyistä 50 volttia. Järjestelmän käyttämä virta vastaa noin 60 watin hehkulampun virrankulutusta. [62, s.6] Järjestelmän käytön edellytyksenä on, että rakenteiden epätiiviysskohdat, joista vesi tunkeutuu sisään paineenalaisesti, tiivistetään ennen järjestelmän käyttöönottoa. Menetelmä ei voi poistaa paineellisesti rakenteeseen tunkeutuvaa vettä, mutta voi alentaa seinärakenteen kosteuspitoisuutta. Menetelmän on havaittu toimivan parhaiten rakenteen betonin vesi-sementtisuhteen ollessa 0,45-0,72. Kokeiden yhteydessä havaittiin myös, että menetelmän käyttö alensi rakenteen kosteuspitoisuutta noin 10 senttimetrin syvyyteen asti, kun taas lähempänä maatayttöä rakenne oli edelleen kyllästyneenä kosteudesta. [63 s. 101]

Vaikutukset

Elektro-osmoosin vaikutuksesta betonissa oleva kalsium irtoaa ja liikkuu katodille. Betonin pH-arvo muuttuu elektrodien läheisyydessä. Kemiallisten reaktioiden seurauksena anodin ympärille muodostuu hapan ympäristö ja vastaavasti katodille emäksinen alue. Esimerkiksi hiilidioksidin ja veden reaktiossa syntyy hiilihappoa (H_2CO_3), joka muodostaa edelleen muita pH tasoon vaikuttavia yhdisteitä.

Ennen EOP-menetelmän kehittämistä käytetyn, tasavirralla toimivan elektro-osmoosikuivatuksen toiminnan ja EOP:n tehokkaamman toiminnan syytä ei ole täysin ymmärretty. On arveltu sen johtuvan napaisuuden vaihtamisen aiheuttamasta muutoksesta elektrolyysin aikana tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin. Lisäksi systeemin uskotaan tasaantuvan lepovaiheen aikana. Näiden muutosten tuloksena vältetään epäsuotuisia sivuvaikutuksia, kuten hapon tuottamista ja lisääntynyttä anodien korroosiota. [29]

Elektro-osmoosi muuttaa ainakin paikallisesti betonin kemiallista koostumusta, mikä voi johtaa vaurioihin. Polaarisuutta vaihtavalla menetelmällä vähennetään näiden muutosten syntymistä, sillä vastakkaisen napaisuuden seurauksena myös kemialliset

reaktiot muuttuvat vastakkaisiksi, mikä vähentää saostumista ja myös vaurioiden syntymisen riskiä. [62, s.53]

Järjestelmän käyttöikä ei ole vielä pystytty todentamaan, sillä kohteisiin asennettujen sovellutusten määrä on vielä vähäinen. Järjestelmän toimittajien puolelta on ajateltu käyttöä noin 10 vuotta [62, s.99]. Käyttöikään vaikuttaa rakenteen kosteus- ja suolapitoisuudet, sillä elektrodeille saostuu käytön aikana suoloja, jotka heikentävä järjestelmän toimintaa. Saostuvien aineiden korroosiovaikutus voi myös tuhota elektrodin, jolloin niiden uusiminen on välttämätöntä.

4.10 Rakenteiden lämmittäminen

4.10.1 Menetelmän kehitys

Rakenteiden lämmittäminen, saksan kielellä temperierung (engl. Tempering) on rakenteiden lämmitys- ja kosteudenhallintamenetelmä, joka soveltuu erityisesti vanhojen historiallisten rakennusten lämmitykseen, sisäilmaolosuhteiden hallintaan sekä kosteusvauriokorjauksiin ja julkisivuvaurioiden ennaltaehkäisyyn. Sisäilman olosuhteiden hallinnan ohella menetelmä estää maanvastaisissa rakenteissa kosteus- ja suolavaurioiden syntymisen.

Ensimmäiset rakenteiden lämmitysmenetelmät on asennettu 1980-luvun alussa museorakennuksiin ja hyvien kokemusten ansiosta menetelmää on kehitetty osana laajaa kansainvälistä museorakennuksien, kirkkojen sekä historiallisten rakennuksien lämmityksen sekä sisäilmaolosuhteiden hallitsemisen tutkimushanketta⁵. Hankkeessa on selvitetty, miten rakennuksiin voidaan saada riittävä lämmitys sekä sopivat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilman että tarvitsee tehdä suuria muutostöitä, jotka vaikuttavat historiallisesti arvokkaiden rakennuksien ulkonäköön.

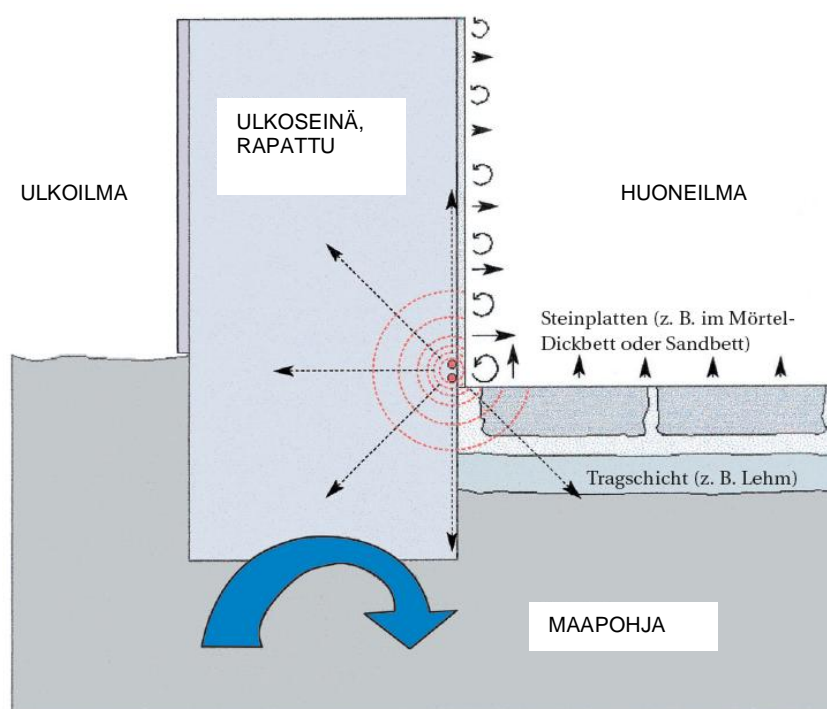
Menetelmä pohjautuu antiikin Rooman aikaisissa kylpylöissä käytettyyn lämmitystapaan, jossa lämmintä ilmaa kierrätetään rakenteiden sisään tehdyissä hormeissa. Vastaavalla periaatteella on lämmitetty (nk. ilmakeskuslämmitys) 1900-luvun alun tiilirakennuksia Suomessa. Tässä tutkimuksessa käsitellään menetelmän toiminta kokonaisuudessaan, sillä menetelmän kokonaisvaltainen käsittely mahdollistaa paremmin menetelmän toimivuuden ymmärtämisen. Maanvastaisten rakenteiden ohella menetelmä soveltuu käytettäväksi koko rakennuksen lämmittämiseen.

4.10.2 Menetelmän toiminta

Menetelmässä asennetaan tiili- tai luonnonkivirakenteisten ulkoseinien alaosan sisäpinnan rappaukseen sekä tarvittaessa ikkunanpieliin halkaisijaltaan 12..22 mm vesikiertoisia lämmitysputkia, jotka lämmittävät ensisijaisesti rakenteita ja rakenteiden lämmittyä myös sisätiloja. Lämmitysputket voidaan asentaa myös betonirakenteeseen joko upotettuna tai pintaan asennetun holkkarappauksen sisään.

⁵ EURO CARE EU-1383 PREVENT: Preventive Conservation, rakennusten säilyttävää konservointia ja ylläpitämistä varten tehty viisivuotinen tutkimushanke

Kellarikerroksen tiloissa lämmitysputket asennetaan väliseiniin sekä maanvastaisten ulkoseinien alaosiin. Rakenteiden lämpenemisen seurauksena rakenteet alkavat kuivua, sillä huokosiin mahtuu enemmän kosteutta. Kosteuden haihtumisrintama siirtyy syvemmälle rakenteeseen, minkä seurauksena kapillaarinen kosteuden nousu pysähtyy ja suojojen kulkeutumien rakenteen pinnalle estyy. Lämmitysveden kierto pidetään kellarikerroksen tiloissa käytössä vuoden ympäri, kun taas ylemmissä kerroksissa menetelmä pidetään käytössä vain talvikaudella. Kellarikerroksen kesän ajan lämmityksessä lämmitysveden enimmäislämpötilana pidetään $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rakenteen lämmittämisen avulla estetään kapillaarisen kosteuden nousu rakenteessa ja suojojen kulkeutuminen rakenteen pinnalle estyy.



Kuva 4.20. Periaatepiirros rakenteiden lämmityksen toiminnasta kapillaarisen kosteuden nousun estämiseksi. [64]

Kuvassa 4.20 on esitetty rakenteiden lämmityksen vaikutus kapillaarisen kosteuden nousuun. Aivan lattian rajaan asennetut kupariset lämmitysputket pitävät rakenteen lämpimänä ja lämpö jakautuu rakenteeseen johtumalla radiaalisesti (pitkät mustat nuolet) sekä sitoutuu putkien ympäristöön sylinterimuotoisesti (punaiset kehät). Osa lämmöstä nousee konvektiovirtausten vaikutuksesta rakenteen pintaa pitkin ylös. Rakenteeseen johtunut ja sitoutunut lämpö siirtyy säteilemällä huoneilmaan. Kosteuden nousu rakenteeseen estyy termisen kosteussulun vaikutuksesta (sininen nuoli).

Rakenteen lämpenemisen seurauksena sisäilman kosteuden kondensoitumista seinäpinoille ei ilmene. Ulkoseinärakenteen kohonneen lämpötilan seurauksena sisätilojen normaalin lämmityksen määrää voidaan vähentää, sillä ulkoseinien vierustalla sisäilman lämpötilaolosuhteet ovat viihtyisämpiä. Tasaisen lämmityksen ansiosta ei ilmene kylmi-

en pintojen aiheuttamia ilmapirtauksia ja edelleen vedontunnetta ulkoseinien läheisyydessä. [64]

Menetelmää on käytetty Keski-Euroopassa useissa kymmenissä museo- ja kirkkorakennuksissa 1980-luvulta lähtien. Historiallisten rakennuksien ohella menetelmää on Keski-Euroopassa käytetty myös uudemmissa kasvihuone- ja eläintarharakennuksissa. Menetelmää käytetään myös massiivitiilien julkisivujen korjauksissa. Lämmityksen ansiosta tiilirakenteisten ulkoseinien kosteusvaurioriski saderasituksen suhteen pienenee oleellisesti ja samalla rakenteen lämmöneristävyys paranee kuivumisen seurauksena. Julkisivupintojen osalta lämmityksellä voidaan samalla myös hidastaa pakkasrapautumista. Ulkoseinien sisäpintojen osalta merkittävä hyöty on, että sisäpintojen homehtumisriski poistuu käytännössä kokonaan pintalämpötilojen nousemisen seurauksena.

Rakenteiden lämmittämällä on Ruotsissa koekohteissa tehdyn selvityksen mukaan saatu 20 % pienempi energiankulutus verrattuna normaaliin patterilämmitykseen. Tutkimuksessa kahteen samassa paikassa sijaitsevaan ja samanlaiseen paviljonkirakennukseen asennettiin samaan aikaan perinteiden konvektiolämmitys sekä rakenteiden lämmitysmenetelmä, joiden energian kulutusta seurattiin vuoden ajan. [65] Pienempi energiankulutus johtuu todennäköisesti kuivemman ulkoseinän paremmasta U-arvosta, lämmönvarautumisesta rakenteeseen sekä paremmasta lämmönjakautumisesta. Huonona puolena on patterilämmitystä hiukan hitaampi lämmönkierron käynnistyminen yö- tai viikonlopun aikaisen energian säästämiseksi tehtävän lämmitystehon laskun takia. Menetelmän toiminnan kannalta olisikin parasta ohjata lämmityksen toimintaa ja tehoa pohjoisjulkisivun rappauksen alle asennetun lämpötila-anturin avulla, jolloin saavutetaan optimaalisin toiminta ja alhainen energiankulutus. [65, s.40]

Museoissa suosituksena on käyttää rakenteiden lämmittämisen lisäksi erikseen suunniteltua ilmanvaihtoa, jossa ilmanvaihto on säädetty hiukan alimittaiseksi tavanomaiseen ilmanvaihtoon verrattuna. Museoiden osalta hyvien sisäilmaolosuhteiden saavuttamisen avainsanoja ovat ”optimoitu rakennusvaippa / rakenteiden lämmitys / minimaalinen ilmanvaihto” [66, s.77], joiden avulla saavutetaan hyvät ja tasaiset sisäilmaolosuhteet, joita museorakennuksissa tarvitaan. Järjestelmän muita hyötyjä ovat tutkimuksen mukaan rakenteiden säilyminen muuttamattomina (ei tarvita ilmanvaihtokanavia), fysiologiset ja energiataloudelliset sekä kustannusedut. Kokemusten mukaan nykyaikaisilla koneellisilla ilmanvaihto-, lämmitys- ja kostutusjärjestelmillä ei saada aikaiseksi riittävän hyvää ja tasaista museaalisten rakennusten ja esineiden tarvitsemää sisäilman laatua. Koneelliset järjestelmät ovat myös huomattavan kalliita, vaativat jatkuvaa ylläpitoa ja huoltoa ja ne ovat riskialttiita toimintahäiriöille. [66]

Museaalisten rakennusten lisäksi rakenteiden lämmitysmenetelmää voidaan käyttää myös tavanomaisemmissa asuin- ja toimistorakennuksissa. Näissä rakennuksissa on tarvetta museorakennuksia suuremmalle ilmanvaihdolle sekä todennäköisesti kesäisin myös jäädytykselle. Jäädytys voidaan järjestää perinteisesti tuloilmaan kytkettynä tai erillisin jäädytyspalkkien avulla. Tutkimushankkeessa ei ole selvitetty mahdollisuutta lämmitysputkiston käyttämiseen tilojen jäädyttämisessä vastaavasti kuin maalämpöä käyttävissä rakennuksissa tehdään.

5. TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

5.1 Rakenteiden sisäpuolisessa korjaamisessa huomioitavia asioita

5.1.1 Rakenteen kosteus ja suolat

Yhtenä oleellisimpana asiana maanvastaisten rakenteiden korjauksessa on huomioida se, että tyypillisesti rakenne on jatkuvasti yhteydessä kosteaan maaperään. Maanvastaitten rakenteiden, niin lattioiden kuin seinärakenteiden, korjauksissa tulee siis kiinnittää erityistä huomiota rakenteiden pinnoitteisiin ja niiden ominaisuuksiin. Pinnoitteiden sekä pintarakenteiden tulee kestää alustasta sisäilmaan siirtyvän kosteuden sekä mahdollisten suolojen vaikutus vaurioitumatta.

Massiiviset tiilirakenteet ovat rakenteena hyvin kosteutta sitovia ja niiden kuivamisen kastumisen jälkeen vie kauan. Betonirakenteisiin kertyvän kosteuden määrä on jonkin verran vähäisempi, minkä lisäksi rakennevahvuudet on betonirakenteilla tavallisesti tiilirakenteita pienemmät. Betonirakenteilla koneellista kuivatusta voidaan tarvittaessa harkita, mikäli valitaan korjaustapa, jossa tulevaisuudessa rakenne on kuiva. Tiilirakenteen koneellinen kuivattaminen on mahdollista, mutta rakenteen sisällä olevan veden kulkeutuminen haihduttavalle pinnalle on hidasta perinteisten kondenssikuivaimien avulla. Säteilyyn tai mikroaaltoihin perustuvilla kuivaimilla rakenteen kuivumista voidaan nopeuttaa huomattavasti. Kuivumisen kestoon vaikuttaa suuresti vuodenaika, esimerkiksi talvella rakenteiden kuivuminen on huomattavasti kesäaikaa nopeampaa kuivan sisäilman vaikutuksesta. Mahdolliset rappaus- tai tasoitekerrokset pintakäsittelyineen hidastavat kosteuden haihtumista rakenteen pinnalta.

Useiden sisäpuolisten korjausmenetelmien osalta rakenteen kuivattamista ei tarvitse tehdä ennen korjaustoimenpiteitä, vaan korjauksen yhteydessä rakennetta jopa kastellaan lisää. Esimerkkinä tästä ovat rappauslaastikorjaukset. Heti laastikorjauksen suorittamisen jälkeen rakenteen kosteuspitoisuus kohoaa ennen korjausta vallinneesta tilanteesta, sillä osa rappauslaastien kosteudesta imeytyy rakenteisiin ja poistuu myöhemmin hitaasti rakenteesta sisäilmaan rappauslaastin läpi. Lisäksi rakenteeseen tuodaan lisää kosteutta jo ennen laastien asentamista alustan esikastelun yhteydessä. Esikastelua ei voida jättää työvaiheena pois, sillä kastelun avulla varmistetaan rappauslaastien tartunta alustaan.

5.1.2 Vauriot ja korjaustavat

Kirjallisuuslähteissä on esitetty, että joissain rakennuksissa suolavaurioiden syntyyn voi kulua useita kymmeniä, jopa satoja vuosia. Vaurioituminen on usein riippuvainen ra-

kennuksesta ja sen materiaaleista, rakennuspaikasta, ulkopuolisesta kosteusrasituksesta ja aikaisemmasta tilojen käytöstä. Käytöstä ja materiaaleista johtuen voi olla mahdollista, että lähellä toisiaan sijaitsevissa samanikäisissä rakennuksissa toisessa on vaurioita ja toisessa ei. Korjaustarve ja –menetelmä tulee määrittellä tapauskohtaisesti, kunkin kohteen rakenteissa esiintyvien vaurioiden ja kosteiden alueiden mukaan.

Suomalaisissa rakennuksissa tavattavat kosteuden siirtymisen aiheuttamat suolavauriot ovat verrattain vähäisiä saksalaisissa tai Keski-Euroopan kohteissa nähtävissä oleviin vaurioihin verrattuna. Tähän on syynä vanhempi rakennuskanta, ilmaston erot sekä rakentamisessa käytetyt erilaiset kiviainekset. Tällöin esimerkiksi tavanomaisissa suomalaisissa kohteissa ei ole tarvetta haudelaastien tai hauteiden käytölle. Muutamissa suomalaisissa vanhoissa rakennuksissa sekä etenkin lähellä merta sijaitsevissa kohteissa on kuitenkin havaittavissa jo merkittäväksi laskettavia kosteus- ja suolavaurioita, joissa voi olla tarpeen käyttää kovan suolarasituksen alaisiin kohteisiin käytettyjä korjausmenetelmiä.

Mikäli rakennuksessa nähtävissä olevia pieniä kosteusvauriomerkkejä, kuten vähäistä rappausvauriota, ei huomioida ja suoriteta korjauksia, tulee kosteuden nousu rakenteessa jatkumaan ja vaurioiden määrä lisääntymään vuosikymmenien aikana. Tällöin kannattaa jo varhaisessa vaiheessa panostaa vaurioiden etenemisen pysäyttämiseen huolehtimalla rakenteen kuivumisen mahdollistamisesta läpäisevien pinnoitteiden avulla sekä huolehtimalla tilojen riittävästä ilmanvaihdosta.

Useimmiten maanvastaisten seinä- ja lattiarakenteiden osalla kosteusvauriot aiheutuvat monesta eri syystä, jolloin on vaarana, että vaikka rakenteen korjaustapa on oikea, ei yksittäinen korjaustoimenpide poista ongelmaa. Vaaditaan useita samanaikaisia korjaustoimenpiteitä, jotta voidaan hallita useasta eri lähteestä rakenteeseen kulkeutuvaa kosteutta.

Maanvastaisten rakenteiden kosteusvaurioiden ollessa paikallisia ja sijaitessa väliseinien kohdalla, on selvitettävä voiko syynä olla kyseisellä kohdalla oleva tihkuttava putkivuoto. Ulkoseinien paikallisten vaurioiden syynä voi olla kyseisellä kohdalla sijaitseva syöksytorvi, jonka vedenohjaus on puutteellinen, tai mahdollisesti aikaisemmissa korjauksissa umpeen muurattu aukko, kuten halko- tai hiililuukku. Tällöin voi olla mahdollista tehdä korjaus ulkopuolelta vähäisin korjaustoimin. Maanvastaisten ulkoseinien kosteusrasitusta voidaan huomattavasti vähentää huolehtimalla sokkelikivien laastisaumojen kunnosta sekä rakennuksen vierustan vedenohjauksesta.

Joissain tapauksissa voidaan käyttää rinnakkain sekä ulkopuolisia että sisäpuolisia korjauksia. Etenkin vanhojen massiivitiilirakenteiden osalta rakenteen ulkopuolinen korjaus voi olla riittämätön, ja on suositeltavaa yhdistää ulkopuolen vedeneristyskorjaukseen kapillaarikatkon tekeminen sekä rakenteen alaosan erikoislaastikorjaus rakenteen kuivamisen seurauksena syntyvien suolavaurioiden estämiseksi.

5.2 Suomalaisiin oloihin soveltuvat korjausmenetelmät

5.2.1 Lämpö- ja kosteustekninen toimivuus

Suomalainen rakennuskanta eroaa muun Euroopan rakennuskannasta rakenteiden suuremman lämmöneristävyuden tarpeen vuoksi. Suomen rakennuskannassa on huomattava määrä betonirakenteisia taloja, joiden maanvastaisten seinien kosteuden- ja lämmöneristys on asennettu rakenteen sisäpuolelle. Kosteus- ja lämpötekniikan toiminnan kannalta ongelmana on etenkin maanvastaisten rakenteiden alaosissa sijaitsevat sisäpuoliset orgaaniset lämmöneristeet, esimerkiksi lastuvillalevytykset tai puukoolauksin tehdyt mineraalivillaeristykset. Mikrobivaurioille alttiit lämmöneristeratkaisut saattavat vaurioitua maaperästä siirtyvän kosteuden vaikutuksesta ja aiheuttaa vakavia sisäilmaongelmia.

Jos nämä eristeet joudutaan kosteusvauriokorjausten yhteydessä uusimaan, tarvitaan tilalle uusi lämmöneristys. Perinteisesti korjauksessa on käytetty vanhaa vastaavaa rakennetta vain pienin parannuksin, kuten erotuskaistojen avulla. Se ei kuitenkaan välttämättä riitä poistamaan ongelmia, vaan muutamien vuosien kuluttua vaurio voi uusiutua. Tutkimuksen perusteella merkittävästi järkevämpi korjausvaihtoehto on käyttää sisäpuolisena lämmöneristeenä mineraalilevytystä. Mineraalilevytys voidaan tarvittaessa yhdistää sisäpuolisten vedentiivistyslaastien käyttämiseen, mikäli vanhan rakenteen vedeneristyksessä on havaittu puutteita.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella selkeästi toimivimmiksi ja käyttökelpoisimmiksi kosteiden massiivitiilirakenteiden korjausmenetelmiksi nousivat kapillaarikatkojen injektioinnit sekä erikoislaastikorjaukset suolankeräyslaasteilla. Erikoislaastikorjausten osalta etuna on se, että kosteus- ja suolavaurioituneet rappaukset joudutaan joka tapauksessa uusimaan, jolloin rappauskorjaus ei ole merkittävässä määrin korjauskustannuksia lisäävä tekijä, mutta tuo kuitenkin huomattavasti lisävarmuutta rakenteen kosteustekniiseen toimivuuteen.

Hyvin vähäisessä määrin suolavaurioituneiden rakenteiden korjauksissa voidaan yhdistää injektointikorjaukset mineraalilevytykskorjaukseen. Tällöin injektioinnilla estetään kosteuden nouseminen rakenteeseen ja mineraalilevytys toimii rakennetta kuivattavana ja sisäilman olosuhteita tasaavana materiaalina.

5.2.2 Sisäilman laatu

Kellarikerroksen tiloissa on usein erilaista toimintaa ja käyttötapoja, joiden takia myös sisäilman laadulla on erilaisia vaatimuksia. Täysin maan alla olevissa tiloissa on tyypillisesti varasto- ja teknisiä tiloja sekä usein myös sosiaalitylöitä, jolloin sisäilman laadulle asetettavat vaatimukset ovat alhaisemmat. Vain osittain maan alla olevissa kerroksissa tilojen käyttötavat ovat usein tavanomaiset, ja tilat voivat olla asuin- tai liikehuoneistokäytössä. Tällöin yhtenä sisäpuolisten korjauksien toteuttamisen haasteena ovat sisäilmalle asetettavat vaatimukset.

Jo korjauksia ja tilaohjelmaa mietittäessä tulisi ottaa huomioon se, että korjausten jälkeenkään kaikissa kellarikerroksen tiloissa ei saavuteta välttämättä nykyisiä, uusia

rakennuksia, koskevia sisäilmaluokituksia täyttävää sisäilman laatua. Yhtenä sisäilma-
laatua kohottavana tekijänä sisäpuolisissa korjauksissa on se, että pystytään pintaraken-
teisiin kohdistuvien korjausten yhteydessä parantamaan rakenteiden liittymien ilmatii-
veyttä, jolloin pohjakerroksen tiloille tyypilliset ilmavuodot maapohjasta voidaan estää.

Rappauksien näkyvät vauriot keräävät usein pölyä ja epäpuhtauksia, jotka voivat
vähitellen aiheuttaa mikrobikasvua alustan ollessa kostea. Uusimalla rappaukset saa-
daan esteettisesti sekä kosteusteknisesti kuiva sisäpinta. Kosteat seinäpinnat aiheuttavat
kylmyyden tunnetta, mikä yhdistettynä tehokkaaseen ilmanvaihtoon voi tuntua tilojen
käyttäjistä epä mukavalta. Rappaus- ja mineraalilevytyskorjausten avulla voidaan nostaa
rakenteen pintalämpötilaa, mikä lisää viihtyvyyttä.

5.2.3 Korjausten suunnittelu

Ennen korjausten suorittamista tulee suorittaa kohteen tilanteen arviointi. Kirjallisuus-
lähteet painottavat, että ennen rakenteiden korjaamista tehtävässä selvityksessä tulee
varmistaa rakenteet, mitata rakenteiden kosteusjakaumat sekä selvittää suolamäärät eri
rakennekorkeuksilta. Selvityksen tarkoituksena on määrittää kosteusvaurion syy, eli
onko kyseessä kapillaarisen, paineellinen veden vai esimerkiksi sisäilman kosteuden
aiheuttamat vauriot. Kirjallisuuden mukaan on suositeltavaa määrittää kohteeseen sovel-
tuvimmat korjausmenetelmät kosteus- ja suolarasituksen perusteella.

Suomalaissa rakennuksissa suolavaurioiden määrä on yleensä hyvin pieni verrattuna
keskieurooppalaisissa kohteissa tavattaviin vaurioihin. Tämän takia useimmissa tapauk-
sissa ei ole välttämätöntä suorittaa suolamäärien tutkimuksia. Suolamäärien tutkiminen
on mahdollista kenttätutkimusten yhteydessä tehtävillä mittauksilla, mitä varten on tar-
jolla tarvittavat tutkimusvälineet sisältäviä kenttälaboratoriovälinesalkkuja. Suomalai-
sissa kohteissa suolojen tutkimista huomattavasti tärkeämpää on tehdä perusteellinen
kosteustekninen tutkimus korjattavissa tiloissa. Tutkimuksessa tarkastetaan korjattavat
rakenteet aistinvaraisesti vauriomerkkejä etsien, minkä lisäksi kaikki pinnat käydään
läpi pintakosteustunnistimen avulla kosteiden, mutta vielä vauriottomien alueiden sel-
vittämiseksi. Lisäksi tarkastetaan ulkopuolisten rakenteiden ja vedenpoiston toimivuu-
den yhteys sisätiloissa havaittaviin vaurioihin. Maanvastaisten rakenteiden korjaukset
on suositeltavaa tehdä ulkopuolelta, jos se on teknisesti sekä taloudellisesti mahdollista
ja voidaan olla varmoja korjauksen riittävydestä.

Sisäpuolisia korjauksia suunniteltaessa on tärkeää valita käytettävät menetelmät ja
materiaalit korjattavan rakenteen ja tilan käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi van-
hoihin massiivitiilirakennuksiin voidaan valita perinteisemmältä vaikuttavat rappaus-
laastikorjaukset, vaikka myös mineraalilevytys on yhtäläillä kohteeseen soveltuva kor-
jausratkaisu. Jälkikäteen asennettavien kapillaarikatkojen osalta mekaaniset menetelmät
ovat varmuudella toimivia, mutta voivat aiheuttaa halkeilua rakenteisiin kun taas injek-
tointikorjauksilla ei välttämättä saavuteta täydellistä yhtenäistä kapillaarikatkoa, mutta
korjauksella ei ole vaikutusta rakenteen kantavuuteen.

On tärkeää, että uusista korjausmenetelmistä tehdään kohteisiin tarkat suunnitelmat
ja työselostukset, jotta välttyään epäselvyyksiltä korjausta tehtäessä sekä urakkalasken-

tavaiheessa. Suunnitelmissa tulee määritellä myös liittymien toteutukset, jotta voidaan varmistua, että urakoitsijalla on riittävät tiedot korjausten suorittamiseen. Korjausten onnistumisen kannalta on erittäin tärkeää, että urakoitsija sekä myös työn tilaaja ymmärtävät miksi korjauksia tehdään. Lisäksi onnistuneen työn suorituksen varmistamiseksi urakoitsijan tulisi olla yhteydessä suunnittelijaan, mikäli purkutöiden jälkeen todetaan suunnitelmissa oletetusta poikkeavia rakenteita.

5.2.4 Sisäpuolisten korjausten heikkoudet

Sisäpuolisten korjausmenetelmien päälähtökohtana on se, että aina ei voida estää kosteuden kulkeutumista rakenteisiin, jolloin sitä hallitaan sisäpuolisten korjausten avulla. Rakenne voi olla ajoittain kostea tai joissain tapauksissa pintarakenteiden alla jopa märkä, mikä voidaan ajatella rakenteen ominaisuutena, johon ei voida vaikuttaa, tai toisin ajatellen korjauksen huonoksi puoleksi.

Sisäpuolisilla korjauksilla ei välttämättä pystytä poistamaan kaikkia ongelmia yhdellä korjauskerralla, huolimatta siitä, että korjaus on huolellisesti suunniteltu ja käytetty usean eri menetelmän yhdistelmää. Haasteena on määritellä suunnittelun aikana riittävä korjauslaajuus, jota tarkennetaan purkutöiden jälkeen työmaavaiheessa.

Suurimmassa osassa tällä hetkellä tiedossa olevia erikoislaasti- ja injektointikorjauskohteita korjauksilla on saavutettu hyviä ja onnistuneita lopputuloksia. Sisäpuoliset korjaukset voivat toimia myös väliaikaisena korjauksena, joiden avulla tilat saadaan käyttökuntoon ja siirretään rakenteen täydellisempi korjaus seuraavan laajemman peruskorjauksen yhteyteen.

Yhtenä korjaustoimenpiteiden toimivuuden analysointia vaikeuttavana tekijänä on kapillaarikatkojen injektointien osalta käytössä olevien imeytysmenetelmien ja injektointimateriaalien erilaisuus. Suomessa on pisimpään ollut käytössä paineettomat injektoinnit sementtilaastein sekä silikoni-injektointiaineilla. Paineellisella injektoinnilla tehdyistä korjauksista on Suomessa kokemuksia vasta muutamien vuosien ajalta ja korjattujen kohteiden lukumäärä on pieni verrattuna Keski-Euroopan suureen rakennuskantaan.

Sisäpuolisissa korjausmenetelmissä käytetyt materiaalit ovat suhteellisen arvokkaita johtuen niiden erityisominaisuuksista. Toisaalta hintaa nostaa muita rakennustarvikkeita vähäisempi menekki, minkä johdosta tuotantokustannuksien vaikutus on suurempi verrattuna tavanomaisempiin rakennusmateriaaleihin. Huomionarvoista on kuitenkin se, että pitkällä aikajänteellä sisäpuoliset korjaukset ovat kustannuksiltaan laajoja ulkopuolisia korjauksia edullisempia, vaikka joitain yksittäisiä kohtia jouduttaisiin paikkakorjaamaan myöhemmin.

Huonoksi puoleksi voidaan myös lukea rakenteiden edellyttämät kosteutta kestävä kiinnikkeet sekä rajoitukset kalusteiden sijoittelussa. Toisaalta nämä samat rajoitukset koskevat myös korjaamattomia kosteuden rasittamia rakenteita, joten osittain kyse on maanvastaisten rakenteiden ominaisuudesta.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Kosteusvauriokorjausten toteuttaminen sisäpuolisilla korjaustavoilla

Tutkimuksen tavoitteena oli laajentaa kirjallisuustutkimuksen avulla tietoisuutta maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinnasta sekä kosteusongelmaisten rakenteiden sisäpuolisista korjausmenetelmistä. Tarkoituksena on ollut esittää mahdollisimman laajat tausta- sekä perustiedot korjausmenetelmistä, jotta on mahdollista arvioida menetelmien käytettävyyttä erilaisten suomalaisten rakennusten korjauksissa. Tutkimusalue on kuitenkin hyvin laaja ja kattaa paljon erilaisia korjausmenetelmiä, minkä vuoksi vain muutama menetelmä otettiin lähempään tarkasteluun.

Suomessa aikaisemmin aiheesta julkaistuihin tutkimuksiin verrattuna tässä työssä on painotettu eri korjausmenetelmien ja materiaalien taustan sekä käyttötapojen esittelyä. Aikaisemmissa suomalaisissa tutkimuksissa ei ole käsitelty kovinkaan laajasti erikoislaastikorjausvaihtoehtoja, mikä on ollut kuitenkin Euroopassa jo pitkään käytössä ollut korjaustapa. Tutkimuksen perusteella erikoislaastikorjaukset ovat toimiva korjaustapa ja niillä voidaan hallita melko hyvin maanvastaisten kiviaineisten rakenteiden kosteuden aiheuttamia ongelmia.

Suhteellisen uusia, Suomessa tähän mennessä vähälle huomiolle jääneitä korjaustapoja ovat paineellisen injektoinnin käyttäminen kapillaarikatkojen injektoinnissa sekä mineraalilevytyksen käyttäminen rakenteen kosteuden hallintaan sekä maanvastaisten rakenteiden sisäpuolisena lämmöneristeenä. Molemmat korjaustavat soveltuvat tutkimuksen perusteella käytettäväksi suomalaisissa rakennuksissa. Mineraalilevytykset soveltuvat kellaritilojen lisäksi myös massiivitiilirakennusten ylempien kerrosten korjauksiin, mikäli halutaan parantaa rakennusten energiataloutta muuttamatta talon julkisivuja.

Eniten epävarmaksi ja lisäselvityksiä edellyttäväksi korjausmenetelmiksi jäivät tutkimuksen perusteella sähköiset rakenteiden korjausmenetelmät. Laajempaa tietoa EOP-menetelmän toiminnasta oli saatavissa hyvin vähän, minkä takia menetelmästä tarvitaan lisää tutkimustietoa ennen kuin menetelmän käyttöä laajemmassa mittakaavassa voidaan suositella.

Rakenteiden lämmittämismenetelmällä voidaan hallita joko yksinomaan pohjakerroksen rakenteiden kosteuden nousua tai käyttää menetelmää koko rakennuksen lämmitys- ja sisäilman olosuhteiden hallintaa. Menetelmän käyttö edellyttää pohjakerroksen tilojen lämmityksen eriyttämistä ylemmistä kerroksista, jotta järjestelmä pystytään pitämään käytössä vuoden ympäri. Seinän alaosien lämpötilaa kohottamalla kosteuden haihtumisvyöhyke saadaan siirrettyä rakenteen alaosaan lattiatason alapuolelle tapauk-

sisä, joissa rakenteiden vaurioitumisen syynä on kapillaarisesti nouseva kosteus. Menetelmä ei toimi sellaisenaan tapauksissa, joissa kosteutta kulkeutuu seinärakenteen läpi.

6.2 Sisäpuolisten korjausmenetelmien käytön haasteita

6.2.1 Haasteet Euroopassa

Tutkimuksessa esiteltyjä sisäpuolisia korjausmenetelmiä käytetään laajasti Keski-Euroopassa ja niitä käsitteleviä kirjoja sekä lehtiartikkeleita on julkaistu vuosien saatossa runsaasti. Osalla korjausmenetelmistä on pitkät perinteet ja osa niistä on uudempia, mikä on aiheuttanut asiantuntijoiden välillä keskusteluja menetelmien toimivuudesta ja keskinäisestä paremmuudesta. Eri korjausmenetelmien välillä on suuria eroja laadussa, vaikutusperiaatteessa, kestävyudessa sekä käyttörajoituksissa, mikä vaikeuttaa niiden vertailua.

Sisäpuolisten korjausmenetelmien kehityksen kannalta keskustelut ja väittelyt ovat hyvä asia, jos väitteiden tueksi pystytään esittämään myös tutkimustuloksia tai käytännön kokemuksia, joilla saadaan jaettua tietoa korjausmenetelmistä. Kiinteistöjen omistajia ja rakennusten ylläpitämisestä vastuussa olevia asiantuntijoiden väliset erimielisyydet voivat häiritä, sillä tarvittavien korjausten tekeminen voi viivästyä, jos korjauksen suorittamiseen saadut ehdotukset ja ohjeet ovat ristiriidassa etenkin arvokohteissa. Menetelmien toimivuuden arviointia vaikeuttaa se, että osa aikaisemmin huonosti toimineista korjaustavoista on kehitystyön myötä saatu toimimaan paremmin. Korjaushankkeiden toteuttamisen kannalta tulisi yhdenmukaistaa ohjeistusta sekä antaa suosituksia soveliaista korjaustavoista erilaisille rakenteille.

6.2.2 Haasteet Suomessa

Diplomityössä käsitellyille sisäpuolisille korjaustavoille on tarvetta myös Suomessa, vaikka olosuhteet ja osittain myös rakenteet poikkeavat Keski-Euroopan maista. Osaa työssä käsitellyistä menetelmistä on käytetty Suomessa vasta muutamien vuosien ajan kosteudesta kärsineiden maanvastaisten seinien korjaamiseen, kun taas osalla menetelmistä on jo parinkymmenen vuoden kokemukset.

Yhtenä suurimpana haasteena sisäpuolisten korjausmenetelmien käyttämiselle Suomessa on ollut puutteellinen tietoisuus menetelmistä, epäilykset niiden toimivuudesta ja korjauksen kannattavuudesta. Pitkäaikaista, kymmenien vuosien kokemusta ja kattavaa tietoa menetelmien käytöstä oikeissa kohteissa Suomessa ei vielä ole, huolimatta siitä, että tietoa korjausmenetelmistä on ollut jo yli 30 vuoden ajan.

Kokemusten keräämisen ja tiedonsaannin osalta olisi hyvä suorittaa seurantatutkimus, jossa kerättäisiin tietoja eri menetelmillä korjattujen kohteiden tilanteesta korjausten jälkeisinä vuosina. Arvioinnissa tulee kuitenkin huomioida se, että osassa tehdyistä korjauksista menetelmän käyttö on ollut sen tehneelle urakoitsijalle uutta, jolloin toteutusvaiheessa saatetaan tehdä epähuomiossa virheitä, jotka vaikuttavat korjauksen lopputulokseen.

6.2.3 Haasteet korjausten suoritukselle

Keski-Euroopassa menetelmien käyttö on yleistä ja toisaalta korjauksia tarvitsevia rakennuksia on huomattavasti enemmän, minkä takia markkinoilla on esimerkiksi lukuisia laasti- sekä injektointituotteiden valmistajia sekä korjauksiin erikoistuneita yrityksiä. Suomessa materiaalitoimittajien kannalta ongelmana on sisäpuolisessa korjauksessa käytettävien materiaalien vähäinen ja ajoittainen menekki, jolloin tuotteita ei kannata varastoida niiden vanhentumisen takia.

Tämä johtaa huolelliseen korjauksen valmistelun tarpeeseen. Urakoitsijoiden, suunnittelijoiden sekä rakennuttajien tulee osata varautua siihen, että materiaalilaukset tehdään ajoissa, jotta korjausaikatauluihin ei synny viiveitä pitkien toimitusaikojen takia.

Suomi on markkina-alueena hyvin pieni, minkä takia uusien toimijoiden saaminen ei ole helppoa ja toisaalta toiminta ei ole kovin kannattavaa. Sisäpuolisia korjausmenetelmiä kuitenkin tarvitaan, minkä takia tarvitaan suunnittelijoiden sekä maahantuojaisten yhteistyötä tietoisuuden lisäämiseksi.

Suunnitelmallisella korjauksella voidaan säästää hankkeen kokonaiskustannuksissa, vaikka korjauksia mietittäessä usein vähätellään suunnittelun merkitystä ja korostetaan sen kalleutta. Useimmissa tapauksissa korjaustavoissa on myös valinnanvaraa, millä voidaan vaikuttaa kustannusten suuruuteen. Eri korjausvaihtoehtojen välillä on kuitenkin eroja ja mahdollisia riskejä, jotka on tehtävä kiinteistöjen omistajille ja korjauksista vastaaville selviksi. Myös eri menetelmien mukaisten korjausten kustannuksilla ja korjaustyön kestolla voi olla suuria eroja.

6.2.4 Tulevaisuuden haasteet

Ilmaston muutoksen myötä on erittäin todennäköistä, että rakennuksien kosteusrasitukset lisääntyvät lämpimien talvien sekä kasvavien sademäärien vaikutuksesta, mikä on ymmärretty myös valtion hallinnon taholta. Ympäristöministeriön ilmaston muutosta käsittelevässä raportissa [67] on selvitetty ilmaston muutoksen vaikutuksia suomalaisen rakennuskantaan yleisellä tasolla.

Ilmaston muutoksen myötä rakenteiden kuivumiskyky joutuu koetukselle ja etenkin massiivitiilirakennuksien ulkoseinien talvikaudella tapahtuvat pakkasvauriot lisääntyvät kasvavan jäätymis-sulamissyklimäärän takia. Odotettavissa on myös pohjavedenpinnan nousua, mikä vaikuttaa suoraan maanvastaisten rakenteiden kosteuteen. Paikoitellen maanvastaisten rakenteiden alaosat saattavat joutua paineellisen vesirasituksen alaisiksi, jolloin rakenteisiin on pakko suorittaa korjauksia. Kohonneen ilmankosteuden myötä maanvastaisten rakenteiden kuivumiskyky heikentyy, mikä voi osaltaan vaikuttaa niissä esiintyvien vaurioiden määrään.

Nämä asiat tulisi ottaa huomioon jo nyt niiden rakennuksien peruskorjauksissa, jotka sijaitsevat lähellä merta, tai pohjavedenpinta on hyvin lähellä rakennuksen alinta lattiatasoa. Yhtenä hyvänä vaihtoehtona rakenteiden kuivumiskyvyn lisäämiseen ja vedeneristysten parantamiseen ovat tässä tutkimuksessa käsitellyt korjausvaihtoehdot.

6.3 Jatkotutkimukset

Sisäpuoliset korjausmenetelmät herättävät paljon kysymyksiä, joista kaikkiin ei vielä ole löydetty vastauksia. Yksi merkittävimmistä on korjausten pitkäaikaiskestävyys sekä toimivuus. Tätä varten olisi hyvä tehdä pitkän ajan seurantatutkimus jo korjattujen kohteiden osalta ja seurata niiden kuntoa esimerkiksi muutaman vuoden välein tehtävillä tarkastuksilla, joiden tulokset raportoitaisiin kymmenen tai viidentoista vuoden kuluttua. Tähän tutkimukseen olisi hyvä saada mukaan eri tavoilla tehtyjä korjauskohteita.

Yhtenä tutkimusaiheena voisi olla korjaushanke, jossa korjattava kohde dokumentoidaan erityisen tarkasti määrittämällä kosteus- ja suolajakaumat korjattavan rakenteen eri osissa ja uusitaan tutkimukset muutaman vuoden kuluttua tilanteen kehittymisen selvittämiseksi. Tällä voitaisiin saada selville erikoislaasti- ja injektointikorjauksen vaikutusta kosteuden ja suolojen kulkeutumiseen rakenteissa.

Lisätutkimusta tarvitaan myös kalsiumsilikaattilevyjen käyttämisestä suolarasiteuissa rakenteissa. Tulisi selvittää, siirtyykö levytykseen suolaa kiinnityslaastin läpi, tai aiheutuuko laastin suolarasituksessa vaurioita. Toisaalta suolankeräyslaastirappauksen ja mineraalilevytyksen toiminta päällekkäisinä rakenteina tulisi selvittää.

Lähdeluettelo

- ¹ Leivo, V., Rantala, J. Maanvastaisten rakenteiden kosteustekninen toimivuus. Tampere 2002, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikka, Julkaisu 120. 107 s.
- ² Leivo, V., Rantala, J. Maanvastaaiset alapohjarakenteet – kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. Tampere 2002, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikka, Julkaisu 121. 33 s.
- ³ Perander, T., Råman, T., Kanerva, M., Vahanan, R. Historiallisten kivirakenteiden laastit. Espoo 1985, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 341. 148 s.
- ⁴ Vahanan, R. Rappauslaastit historiallisten kohteiden restauroinnissa. Diplomityö. Espoo 1983, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööri-osasto. 133 s.
- ⁵ Virtanen, M. Kapillaarisen kosteuden nousun estäminen injektointimenetelmällä vanhoissa tiilirakenteissa. Diplomityö. Espoo 1987, Rakennushallitus, raportti 2:1988. 141 s.
- ⁶ RIL 174-5, Korjausrakentaminen V Perustukset-Pohjarakenteet. Helsinki 1991.
- ⁷ Sievola, J. Kosteusvaurioituneiden maanvastaisten seinärakenteiden sisäpuolisten laastikorjausten vaikutus sisäilman laatuun. Diplomityö. Espoo 2008. Teknillinen korkeakoulu, Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. 132 s.
- ⁸ Nyberg, J., Gandra, P., Sandqvist, H., Thavelin, O., Andersson, L., Häggstrand, P., Mattsson, B., Grönlund, Å., Wockatz, E., Bergström, L., Tidermann, S. Upstigande markfukt – lösningar och kompromisslösningar. Teknisk rapport. 1997. (Luettu Internetistä 6.12.2007)
- ⁹ von Konow, T. Saltvittring i tegel – saltvittringsmekanismer. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiedotteita 1003. 68 s.
- ¹⁰ Råman, T., Perander, T. Uudet laastit vanhoissa kivimuureissa. Espoo 1985, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tutkimuksia 342, VTT Offsetpaino. 79 s.
- ¹¹ von Konow, T. Tiilien rapautuminen, restaurointilaastit ja historiallinen betoni. Rakennustaiteen seura, jäsentiedote 1/2005.
- ¹² Tiilirakenteiden pinnoittaminen ja kapillaarinen kosteus. Koerakentamisraportti 1/1992. Helsinki 1991, Rakennushallitus. 37 s.
- ¹³ Neuvonen P. (toim.). Kerrostalot 1880-2000 –arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen. Helsinki 2006, Rakennustieto Oy. 288 s.
- ¹⁴ Neuvonen, P., Mäkiö, E. Malinen, M. Kerrostalot 1880-1940. Hämeenlinna 2002, Rakennustieto Oy. 192 s.
- ¹⁵ Talonrakennuksen kosteus- ja vesieritystöiden normaalimääräykset. A10. Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisuja. 1948. Helsinki, 2. painos 1965, Print Oy. 14 s.
- ¹⁶ Mäkiö, E., Malinen, M., Neuvonen, P., Sinkkilä, J., Tuunanen, A-M., Saarenpää, J. Kerrostalot 1940-1960. Helsinki 1989, Rakennustietosäätiö. 273 s.
- ¹⁷ Mäkiö, E. Malinen, M., Neuvonen, P., Vikström, K., Mäenpää, R., Saarenpää, J., Tähti, E. Kerrostalot 1960-1975. Helsinki 1994, Rakennustieto Oy. 288 s.

-
- ¹⁸ Wittmann F.H. Feuchtigkeitsaufnahme und Feuchtigkeitstransport in Porösen Baustoffen. in Fassadenschutz und Bausanierung, H.Weber Herausgeber. Renningen-Mahnesheim 1994, Expert Verlag, 5. Auflage. Ss. 57-89.
- ¹⁹ Weber, H. Injektionsverfahren gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 3. Jahrgang, Heft 5, 1997. ss. 487-514.
- ²⁰ Frössel, F. Mauerwerkstroekenlegung und Kellersanierung. Wenn das Haus nasse Füße hat. Stuttgart 2001, Fraunhofer IRB Verlag. 556 s.
- ²¹ Lehtinen, M., Viljanen M. Tiilirakenteiden kapillaarinen kosteuden siirtymien sisätiloihin rajoittuvissa rakenteissa. Espoo 1994, Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikan laboratorio. Julkaisu 44. 44 s.
- ²² Weber, H. Entfeuchtung und Trockenlegung von Mauerwerk – Teil I, artikkeli Arconis 4/01 ss. 38-43. TARKISTA
- ²³ Kabrede, H-A., Spigatis, R. Abdichten erdberührter Bauteile. Gebäudeinstandsetzung Band 1. Stuttgart 2003, Fraunhofer IRB Verlag. 181 s.
- ²⁴ Absetz, I., Viljanen, M. Kapillaarinen kosteuden siirtymien rakenteissa. Espoo 1985, Teknillinen korkeakoulu. Rakennusinsinööriosasto, Rakennetekniikan laitos, Julkaisu 75. 117 s.
- ²⁵ Rose, D.A. Water movement in porous media. 1963, British Journal of Applied Physics 14. ss. 491-496.
- ²⁶ Kohonen, R. A method to analyze the transient hygrothermal behaviour of building materials and components. Espoo 1984, Technical research centre of Finland, Publications 21. 88 s.
- ²⁷ Ojanen, T., Salonvaara, M., Kohonen, R., Nieminen, J. Kosteuden siirtymien rakenteissa. Laskentamenetelmät. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 595. 102 s.
- ²⁸ Viljanen, M., Liukkonen, S., Bergman, J., Syrjänen, T. Elektro-osmoosi ja sen käyttö vanhoissa tiilirakenteissa. Helsinki 1994, Rakennushallitus, Koerakentamisraportti 5/1994. 81 s.
- ²⁹ Hock, V.F., McInerney, M.K., Kirstein, E. Demonstration of Electro-Osmotic Pulse Technology for Groundwater Intrusion Control in Concrete Structures. FEAP Technical Report 98/68. Champaign 1998. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories. IL 61826-9005. 44 s.
- ³⁰ Bläuer Böhm, C. Quantitative Salt Analysis in Conservation of Buildings. In: Restoration of Buildings and Monuments. An International Journal. Vol. 11, No. 6. Freiburg 2005, Aedificato Publishers Freiburg. pp. 409-418.
- ³¹ Charola, A.E., Pühringer J. Salt in the Deterioration of Porous Materials: A Call for the Right Questions. In: Restoration of Buildings and Monuments. An International Journal. Vol. 11, No. 6. Freiburg 2005, Aedificato Publishers Freiburg. pp. 433-442.
- ³² Häkkä-Rönholm, E., Haimala, T., Rautiainen, L. Teollisuuslattioiden pinnoitus. BLY 11. 1999. VTT Rakennustekniikka
- ³³ Opferputze, WTA Merkblatt E-2-10-06/D. 16 s.

-
- ³⁴ Erwurth, U. Was sind Wunder, was ist Wirklichkeit? Baustoff-Eigenschaften von Sanierputz-WTA und FRP-Feuchteregulierungsputz im Vergleich. Bauen im Bestand. 29(2006)7. ss. 26-30.
- ³⁵ Sanierputzsysteme, WTA Merkblatt 2-9-04/D. 24 s.
- ³⁶ SFS-EN 998-1:2003. Laastien spesifikaatit. Osa 1: Rappaus- ja tasoitelaastit. Suomenkielinen käännös 2005. Suomen standardisoimisliitto SFS. 20 s.
- ³⁷ Wirringa, U. Mit einer gewissen Dichte und Schnelligkeit. Das Verarbeiten von Sanierputzen und die EN 998-1. Bauen im Bestand. 29(2006)1. ss.13-15.
- ³⁸ Janotte, O. Keine Kosmetik. Sanierputz gegen Schadenursache – grundsätzliche Einsatzhinweise. Bauen im Bestand. 30(2007)6. ss. 25-28.
- ³⁹ Weber, H. 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz – ein Erfahrungsbericht. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 2. Jahrgang, Heft 6, 1996. s. 551-565.
- ⁴⁰ Ansorge, D. Bauwerksabdichtung gegen von außen und innen angreifende Feuchte. Pfusch am Bau. Band 1. 3., durchgesehene Auflage. Stuttgart 2005, Fraunhofer IRB Verlag. 253 s.
- ⁴¹ Vergès-Belmin, V., Siedel, H. Desalination of Masonries and Monumental Sculptures by Poulting: A Review. In: Restoration of Buildings and Monuments. An International Journal. Vol. 11, No. 6. Freiburg 2005, Aedificato Publishers Freiburg. pp. 391-407.
- ⁴² Assesment of desalination mortars and poultrices for historic masonry. Desalination project. Newsletter 1/2006
- ⁴³ Ruhnau, R., Platts, T., Wetzel, H-H. Schäden an Abdichtungen erdberührter Bauteile. Schadenfreies bauen. Band 36. Stuttgart 2005, Fraunhofer IRB Verlag. 378 s.
- ⁴⁴ Haack, A. Emig, K.-F., Hilmer, K., Michalski, C. Abdichtungen im Gründungsbereich und auf genutzten Deckenflächen. Berlin 1995, Ernst&Sohn. 541 s.
- ⁴⁵ Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile, WTA Merkblatt 4-6-05/D. 24 s.
- ⁴⁶ http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/articles/article_413_en.html (luettu 2.10.2007) Euroopan komission tiedote INSUMAT -tutkimuksesta
- ⁴⁷ Scheffler, G. Feuchtetransport durch Gebäudewände. Technische Universität Dresden. Fakultät Architektur. Institut für Bauklimatik. Lehrstuhl für Bauphysik. (Päivämätön, luettu Internetistä 18.1.2007)
- ⁴⁸ Epatherm etp Wohnklimaplatte, epasit GmbH (tuote-esite/tekninen tiedote, <http://www.epasit.de>)
- ⁴⁹ Multipor Mineräldämmplatte, Produktdatenblatt (10/2006), Xella Dämmsysteme GmbH (<http://www.multipor.de>, luettu 29.1.2008)
- ⁵⁰ Calsitherm Klimaplatte, Technisches Merkblatt, Calsitherm Silikatbaustoffe GmbH
- ⁵¹ Pura –lämmöneristäminen, tuote-esite/tekninen tiedote, Kasil Finland Oy (<http://www.kasil.fi/pura.html>, luettu 2.1.2009)
- ⁵² Kasil eristyslevyt, tuote-esitteet, Kasil Finland Oy (<http://www.kasil.fi/eristyslevyt.html>, luettu 2.1.2009)
- ⁵³ Arendt, C., Seele, J. 2000. Feuchte und Salze in Gebäuden. Leinfelden-Echterdingen, Verlaganstalt Alexander Koch GmbH. 167 s.

-
- ⁵⁴ Keppler, S. Paraffininjektionstechnologie. In Bauen im Bestand. Bautenschutz und Bausanierung (2002). ISSN: 0170-9267, luettu Internetistä 27.5.2010 (<http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=2003027100011>)
- ⁵⁵ Kabrede, H-A. Injizieren, Verpressen und Verfüllen von Beton und Mauerwerk. Renningen-Malmsheim 2001. expert verlag. 87 s.
- ⁵⁶ Vocke, J. Dahinter oder darein, Bauen im Bestand 29(2007)7. ss. 11-15.
- ⁵⁷ Trelleborg Terveyslattia, asennusohjeet, RTV-Yhtymä Oy
- ⁵⁸ System Platon. Koneellisesti ilmastoitu lattia. 2005. Tuote-esite. Isola
- ⁵⁹ Klopfer, H. Anstrichschäden. Wiesbaden, Berlin 1976. Bauverlag GmbH. 232 s.
- ⁶⁰ Sandrolini F., Franzoni E. Repair Systems for the Restoration of Ancient Buildings – Dampness Rise Problem. Restoration of Buildings and Monuments. An International Journal. Vol. 13, 3/2007. ss. 161-171.
- ⁶¹ Rörig-Dalgaard, I. Preservation of mural with elektokinetic – with focus on desalination of single bricks. Ph. D. Thesis. 2008. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. Report number R196
- ⁶² McInerney, M.K., Morefield, S., Cooper, S., Malone, P., Weiss, C., Brady, M., Bushman, J.P., Taylor, J., Hock, V.F. Electro-Osmotic Pulse (EOP) Technology for Control of Water Seepage in Concrete Structures. 2002, US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center. ERDC/CERL TR-02-21 Construction Engineering Research Laboratory, 168 s.
- ⁶³ Groundwater Intrusion Control Using Electro-Osmotic Pulse (EOP) Technology. 2008. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center. www.erd.usace.army.mil
- ⁶⁴ Großes Schmidt, H. 2004. Das temperierte Haus: Sanierte Architektur – behagliche Räume – “Großvitrine”. In: Kotterer, M., Großes Schmidt, H., Boody, F.P., Kippes, W. (ed.). Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9. 2004. ss. 325-382.
- ⁶⁵ Holmberg J.G. 2004. Comparison of Tempering and Conventional Convection Heating. In: Kotterer, M., Großes Schmidt, H., Boody, F.P., Kippes, W. Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9. 2004. pp. 99-106.
- ⁶⁶ Kotterer, M. 2004. Internationale Standard-Klimawerte und Haustechnik in Museen und Historischen Gebäuden in der Diskussion. In: Kotterer, M., Großes Schmidt, H., Boody, F.P., Kippes, W. Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9. 2004. ss.77-98.
- ⁶⁷ Berghäll, J., Pesu, M. Ilmastonmuutos ja kulttuuriympäristö. Tunnistetut vaikutukset ja haasteet Suomessa. Helsinki 2008. Suomen ympäristö 44. Ympäristöministeriö. 28 s.

LIITE 1

Työssä käytetyt kalsiumsilikaattilevytuotteet

	Materiaali
KaSi1	epasit Epatherm
KaSi2	Calsitherm Klimaplatte
KaSi3	Kasil E-levy
KaSi4	Kasil Pura
KaSi5	Xella Multipor