

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Materiālzinātnes un Lietišķās Ķīmijas fakultāte  
Silikātu Materiālu institūts

**Inese SIDRABA**

Silikātu un augsttemperatūras materiālu ķīmija un tehnoloģija

**ROMĀŅU TRAVERTĪNA KOROZIJIZTURĪBA**  
**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskie vadītāji

Dr. habil. sc. ing., profesors **G.**  
**MEŽINSKIS**  
Silikātu Materiālu institūts Rīgas  
Tehniskā universitāte, Latvija

Dr. geol., profesors  
**G. CULTRONE**  
Mineraloģijas un Petroloģijas institūts,  
Granadas universitāte, Spānija

**RIGA 2006**

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKĀS UNIVERSITĀTES  
INŽENIERZINĀTŅU ĶĪMIJAS DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu ķīmijas doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2006. gada 30. martā Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un Lietišķās ķīmijas fakultātē, Āzenes ielā 14/24, 271. telpā.

**OFICIĀLIE OPONENTI**

Dr.h.biol. R. KĀRKLIŅŠ  
Latvijas Zinātņu Akadēmija

Dr.sc.ing.M. DZENIS Rīgas  
Tehniskā universitāte

Dr.ģeol. Ģ. STINKULIS  
Latvijas Universitāte

**APSTIPRINĀJUMS**

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kurš iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Inese Sidraba

Datums: 14.02.2006.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur 1) ievadu un tēmas aktualitāti; 2) vēsturisko un teorētisko pamatojumu; 3) metodiku; 4) eksperimentālo daļu I: travertīna objektu saglabātības stāvokļa novērtējums; 5) eksperimentālo daļu II: nosēduma slāņu izpēte; 6) eksperimentālo daļu III: materiāla raksturojums; 7) diskusijas, 8) secinājumus, 9) literatūras sarakstu; 117 attēlus; 25 tabulas, kopā 134 lpp. Literatūras sarakstā ir 88 nosaukumi.

**Tēmas aktualitāte.** Vēsturiski celtniecībā pārsvarā tika izmantoti vietējas izcelsmes dabīgie akmens materiāli no tuvējā karjera, jo tie bija vieglāk pieejami un transportējami. Līdz ar to ilglaicīga praktiskā pieredze akmens materiāla ilgmūžībai objektos ir zināma tikai vietējiem akmens materiāliem, kas pielietoti to ieguves reģionālajā klimatā. Mūsdienās dabīgo akmens materiālu imports un eksports ir praktiski neierobežots. Iepriekšējā pieredze par akmens materiālu pielietojumu objektos to ieguves reģionos vairs nav piemērojama jauniešiem reģioniem.

Tā kā ir tikai nelielas iespējas izmainīt akmens materiālu īpašības ar mērķi uzlabot to ilgmūžību, tad dabīgā akmens ilgmūžības un korozijizturības prognozēšanai ir būtiska nozīme. Pamatā akmens apdares materiāli tiek izmantoti tādi, kādus tos iegūst karjerā, veicot tikai akmens bloku zāģēšanu un iegūto būvizstrādājumu virsmas apdari. Tomēr, pie nosacījuma, ja tiek ievērtēta atbilstība starp akmens materiāla īpašībām un nepieciešamajām prasībām dotajam objektam, kā arī nodrošināta turpmākā objekta aprūpe, dabīgā akmens būvizstrādājuma ilgmūžība var tikt būtiski uzlabota.

Kultūrvēsturiskā mantojuma saglabāšanā akmens ilgmūžības prognozēšana ir vēl sarežģītāka. Šodien konstatējamais akmens kalumu un būvizstrādājumu saglabātības stāvoklis ir iepriekšējās eksponēšanas laikā notikušās korozijas rezultāts, un ir sagaidāms, ka ir notikušas materiāla struktūras un sastāva izmaiņas, kas tad arī noteiks turpmāko materiāla ilgmūžību [1]. Un pat visatbilstošākajiem ekspluatācijas apstākļiem vēsturiskajam materiālam sagaidāma zemāka ilgmūžība par to, kas noteikta jaunam akmenim no karjera.

Problemātisks jautājums prognozējot akmens ilgmūžību ir laboratorijas testa metožu sarežģītība, iegūto datu interpretācija [2,3] un to pielietojums praksē objektiem, kas eksponēti mainīgos vides apstākļos.

Vēsturiski Latvijas teritorijā muižu, piļu un baznīcu celtniecībā izmantoti vietējie dolomītakmeņi un laukakmeņi. Ar 19. gs. aizsākas dabīgo apdares akmens materiālu imports no kaimiņvalstīm (Zviedrijas, Vācijas, Igaunijas), no reģioniem ar līdzīgiem klimatiskajiem apstākļiem kā Latvijā. Tāpēc šajā gadījumā praktiskā pielietojuma pieredze akmens materiālu ģeoloģiskās izcelsmes reģionā var tikt piemērota Latvijas objektiem.

1930-jos gados Romāņu travertīns, ko iegūst *Acgue Albule* baseinā, 10 km uz austrumiem no Romas, Tivoli reģionā, Itālijā, tika pielietots Kultūrvēsturisko pieminekļu celtniecībā Latvijā un ir vienīgais līdz šim zināmais gadījums, kad Romāņu travertīns izmantots eksterjerā Ziemeļeiropā.

Romāņu travertīns ir pasaulē plaši pielietots eksterjerā un interjera akmens apdares un skulptūru materiāls, kas sevi attaisnojis praksē kā

ilgmūžīgs materiāls. Tomēr Romāņu travertīna praktiskais pielietojums eksterjerā Ziemeļu klimatiskajos apstākļos vēl joprojām ir ierobežots. Tam par iemeslu ir fakts, ka travertīna raksturīgāko īpašību un attiecīgā reģiona klimatisko apstākļu atbilstība bieži vien netiek pilnībā izvērtēta gan objektu projektēšanas stadijā, gan veicot restaurāciju un aprūpi, kas kopumā veido maldīgu priekšstatu par Romāņu travertīna nepietiekamo ilgmūžību.

Romāņu travertīna pieminekļi ir unikāls gadījums Latvijas amatniecībā, tēlniecībā un arhitektūrā. Romāņu travertīna saglabāšanas izvērtēšanai Ziemeļu klimatiskajos apstākļos ir būtiska nozīme Kultūrvēsturiskā mantojuma saglabāšanā.

**Mērķis:** raksturot Romāņu travertīna struktūras izmaiņas Latvijas klimatiskajos apstākļos ar mērķi izstrādāt zinātnisko pamatojumu Romāņu travertīna Kultūrvēsturisko pieminekļu konservācijai/restaurācijai un aprūpei; sniegt zinātniski pamatotus ieteikumus par iespējām pielietot Romāņu travertīnu eksterjerā Ziemeļu klimatiskajos apstākļos.

#### **Uzdevumi:**

- Romāņu travertīna ģeoloģiskās veidošanās, ieguves un pielietojuma analīze;
- Romāņu travertīna Latvijas Kultūrvēsturisko pieminekļu vēsturiskais, mākslinieciskais un arhitektoniskais raksturojums;
- Ziemeļu un Dienvidu klimatiskajos apstākļos īstenoto Romāņu travertīna objektu saglabātības stāvokļa un praktiskās pielietojuma pieredzes izvērtējums;
- Romāņu travertīna korozijas izpēte Latvijas pieminekļos saistībā ar Latvijas klimatiskajiem apstākļiem;
- Nekorodējuša un korodējuša Romāņu travertīna salīdzinošā fizikāli/mehānisko un ilgmūžības īpašību izpēte.

#### **Zinātniskā nozīmība un galvenie rezultāti**

1. Romāņu travertīns pielietots eksterjerā piecu Kultūrvēsturisko pieminekļu celtniecībā, kas datējami ar 1930-to gadu otro pusi.
2. Ziemeļu klimatiskie apstākļi, kā Latvijas klimats, raksturojas ar biežiem sasalšanas/atkušanas cikliem (vidēji 70 cikli gadā) un paaugstinātu gaisa relatīvo mitrumu (80-90%).
3. Ziemeļu klimatiskie apstākļi, kas ir izteikti atšķirīgi no Vidusjūras reģioniem, kā Itālija (vidēji 21 sasalšanas/atkušanas cikls gadā), kur iegūst Romāņu travertīnu, ir par iemeslu akmens materiāla atvērtās porainības pieaugšanai (secīgi samazinoties slēgtai porainībai), ko izraisa plaisu un

mikroplaisu veidošanas pastāvīgu sasalšanas/atkušanas ciklu iedarbības rezultātā.

4. Travertīna korozijas rezultātā pieaug kapilaritāte virzienā, kas paralēls akmens dabīgajam slāņojumam, samazinās mehāniskā izturība, pieaug anizotropija virzienā paralēli slāņojumam, kas ir vājākā šī materiāla struktūras daļa.

5. Korodējuša travertīna anizotropijas pieaugums salīdzinot ar nekorodējušu tā paša litoloģiskā tipa materiālu var tikt izmantots kā viens no parametriem akmens materiāla korozijas novērtēšanai.

**Praktiskais pielietojums.** Fizikāli/mehānisko īpašību un ilgmūžības testu rezultāti, kā arī praktiskā pieredze objektos Latvijā liecina, ka Romāņu travertīns ir piemērots lielākajai daļai eksterjera akmens apdares veidu, ieskaitot pielietojumu agresīvas vides apstākļos, piemēram, Ziemeļu klimatiskajos apstākļos. Tomēr izteiktais travertīna slāņojums nosaka īpašas prasības materiāla pielietošanā, jo korozijas procesu rezultātā pavājinās slāņainā materiāla struktūra, kas sekmē ūdens infiltrāciju un mehāniskās stiprības samazināšanos. Ziemeļu klimatiskie apstākļi ir agresīva eksponēšanas vide, kurā travertīna slāņojuma pakļaušanās korozijai, nosaka visa akmens materiāla ilgmūžību. Tāpēc, ja Romāņu travertīnu pielieto eksterjera Ziemeļu klimatiskajos apstākļos, obligāts priekšnosacījums ir augstākas prasības objektu projektēšanai, amatnieku izpildījumam un regulārās objekta aprūpes nodrošināšanai.

Saskaņā ar Latvijas pieminekļu celtniecībā pielietotā Romāņu travertīna uzrādītajām fizikāli/mehāniskajām īpašībām pēc 60 gadu eksponēšanas objektos, materiāls vēl joprojām ir ilgmūžīgs un atbilstošs pielietošanai Ziemeļu klimatiskajā reģionā. Tomēr pieminekļu aprūpes trūkums, nelabvēlīgie klimatiskie apstākļi - paaugstinātais gaisa mitrums un pastāvīgie sasalšanas/atkušanas cikli, ir veicinājuši materiāla struktūras pavājināšanos; netīrumu, kvēpu, vēja nesto daļiņu izgulsnēšanos uz akmens virsmas; intensīvas bioloģiskās korozijas attīstību; kā rezultātā Latvijā travertīna pieminekļu virsma ir intensīvi nomelnējusi un uz virsmas esošais deponējuma slānis veicina pastāvīgu mitruma saglabāšanos paaugstinot sala radīto bojājumu apjomus. Līdz ar to nepieciešama regulāra objektu aprūpe ik pēc 2 - 4 gadiem ietverot virsmas attīrīšanu un aizsardzību pret bioloģiskā apauguma atjaunošanos.

**Teorētiskais pamatojums.** Apdares akmens materiāli uzskatāmi par ilgmūžīgiem, ja ieža novecošanās būtiski neietekmē materiāla struktūru, sastāvu, fizikālās, mehāniskās un estētiskās īpašības. *Ilgmūžība* [4] ir dabīgā akmens materiāla spēju noteikšana izturēt un saglabāt materiāla

raksturīgākās vizuālās, stiprības un korozijizturības pazīmes atbilstoši dotajam pielietojuma veidam, mērķim un vides apstākļiem. *Korozijizturība* raksturo akmens materiāla spēju ilgtermiņā pretoties korozijas faktoriem, kuriem materiāls ir pakļauts pēc iebūvēs objektā, izteikta kā akmens estētisko un strukturālo īpašību izmaiņas eksponēšanas laikā [4].

Dabīgā akmens materiāla korozijizturību vislabāk var novērtēt analizējot tā spēju pretoties korozijai pēc iebūvēs objektā - praktiskā pieredze. Tomēr praktiskā pieredze nav piemērojama, ja nepieciešams noteikt jauna akmens materiāla vai materiāla, kas lietots jaunos apstākļos, ilgmūžību [5].

*Ilgmūžības pārbaudes.* Kaļķakmeņi, piemēram, travertīns, ir ļoti tuvi pēc to ķīmiskā/mineralogiskā sastāva, līdz ar to tieši materiāla struktūra pamatā nosaka kaļķakmens ilgmūžību [6]. Veicot ilgmūžības pārbaudes nogulumiežiem ir jāņem vērā, ka akmens materiāla īpašības var mainīties no viena karjera uz citu, viena karjeras rajona robežās, un pat viena bloka robežās.

Ir izstrādātas vairākas netiešās ilgmūžības noteikšanas metodes, kas pamatojas uz materiāla fizikālo īpašību analīzi: ūdens uzsūce, kapilaritāte, porainība. Viena no kaļķakmeņu pamatīpašībām ir porainība. Laboratorijas pārbaudēs ir pierādīts, ka akmens materiāli ar zemu porainību (< 5%) un ar augstu porainību (> 30%) ir izturīgi pret sala un sāļu kristalizācijas izraisītajiem bojājumiem [6]. Piesātinājuma koeficients ir viens no parametriem, kas ļauj klasificēt akmens materiālus pēc to relatīvās ilgmūžības [5]. Piesātinājuma koeficients > 0,85 norāda, ka akmens materiālam ir liels daudzums poru, kas pakļaujas kapilārajai absorbcijai un var secināt, ka akmens materiālam visticamāk prognozējama zema ilgmūžība. Jāņem vērā, ka piesātinājuma koeficients un porainība jāvērtē savstarpējā saistībā, jo piesātinājuma koeficientam ir nozīme tikai tad, ja poru tilpums aizņem ievērojamu daļu no akmens materiāla struktūras [7].

Ir izstrādāts kaļķakmens ilgmūžības pārbaudes komplekss [7], kas sastāv no trīs testiem: pretošanās sāļu kristalizācijai izmantojot 14% nātrija sulfāta šķīdumu; piesātinājuma koeficients; porainība. Pretošanās sāļu kristalizācijai ir salīdzinoša pārbaude, kurā akmens materiāli ar jau zināmu ilgmūžību tiek iekļauti kā references paraugi, lai nodrošinātu konsekventus testa rezultātus.

Poru sadalījums ir būtisks parametrs novērtējot porainu neorganisku materiālu ilgmūžību. Eksperimentāli ir pierādīts, ka ķieģeļi (tāpat kā citi būvmateriāli, kā dabīgais akmens un javas) ar augstu porainību un augstu procentuālo poru saturu ar diametru < 5-2 μm ir visvairāk pakļauti korozijai, īpaši sāļu kristalizācijas un sasalšanas/atkuššanas procesiem [8-11].

**Pētījumu metodika.** Romāņu travertīna korozijizturība tika pētīta pēc sekojošas metodikas:

- Romāņu travertīna objektu *saglabātības stāvokļa vizuālais novērtējums* Ziemeļu klimatiskajos apstākļos Latvijā un Ņujorkā (ASV) un Dienvidu klimatiskajos apstākļos Romā, Itālijā;
- *virsmas deponējuma slāņu izpēte* Latvijas travertīna objektiem izmantojot rentgenstaru difraktometriju (XRD; Philips PW-1710 difraktometrs), ķīmiskā sastāva analīzes, infrasarkanā staru spektrometriju (FTIR), skanējošo elektronmikroskopiju (SEM/EDX; Zeiss DMS 950 aprīkots ar mikroanalizatoru QX 2000) un bioloģiskā apauguma analīzes;
- *materiāla raksturojums - fizikāli/mehānisko un ilgmūžības īpašību pārbaudes* diviem Romāņu travertīna veidiem: 1) travertīns, kas 60 gadu periodā bijis iebūvēts objektos Latvijas klimatiskajos apstākļos, turpmāk tekstā - korodējis travertīns un 2) neeksponēts travertīns, iegūts no karjera 1998 gadā, turpmāk tekstā - nekorodējis travertīns. Materiāla raksturojums tika veikts izmantojot masspektrometriju (ICP-MS; PERKIN ELMER Sciex-Elan 5.000); optisko mikroskopiju (OM; stereomikroskops MBS un LEICA WILD MAKROSKOP M420, polarizācijas mikroskops Olympus BX-60 un LEICA DMLP); dzīvsudraba porozimetriju (MIP; porozimetrs Auto Pore III); hidrisko īpašību noteikšanu (brīvā ūdens uzsūce: NORMAL 7/81; kapilaritāte: prEN 1925:1988; žūšana: NORMAL 29/88, piesātināšana vārot: EN 772-7:1998); mehānisko īpašību noteikšanu (stiprība spiedē: LVS 156:2000, stiprība liecē).

Ilgmūžības pārbaudes ietvēra pretošanās sāļu kristalizācijai pārbaudi saskaņā ar LVS EN 12370:2000 un divu veidu salizturības pārbaudes:

1) paraugu sagatavošana saldēšanai piesūcinot brīvā ūdens uzsūcē un manuāla paraugu ciklošana ietverot saldēšanu gaisā un atkausēšanu ūdenī. Katrs cikls sastāvēja no 8 stundām saldēšanas (temperatūras intervālā -15 līdz -20°C), kam sekoja 16 stundas atkausēšana pilnīgi iegremdējot ūdenī istabas temperatūrā (+ 20±5°C). Pēc salizturības pārbaudes veselīgiem paraugiem tika noteiktas fizikālās īpašības un iegūtie rezultāti salīdzināti ar rezultātiem pirms salizturības pārbaudes;

2) paraugu sagatavošana saldēšanai veicot maksimālu materiāla piesātināšanu vārot 5 stundas. Pēc tam paraugu ciklošana tika veikta pēc iepriekš aprakstītās metodikas.

**Eksperimentālā daļa I: travertīna objektu saglabātības stāvokļa novērtējums.** Tika veikts Romāņu travertīna objektu saglabātības stāvokļa vizuālais novērtējums Dienvidu klimatiskajā reģionā Romā, Itālijā un Ziemeļu klimatiskajā reģionā Latvijā un Ņujorkā, ASV. Objektu izvēli ārpus Latvijas noteica sekojoši kritēriji: 1) izvietojums gan Ziemeļu, gan Dienvidu

klimatiskajos reģionos ar mērķi salīdzināt Latvijai līdzīgus un atšķirīgus klimatiskos eksponēšanas apstākļus; 2) aptuveni tas pats objektu celtniecības laiks un tā pati travertīna ģeoloģiskā ieguves vieta, kas Latvijas pieminekļiem.

Latvijā Romāņu travertīns izmantots 5 Kultūrvēsturisko pieminekļu celtniecībā: 1) *Brīvības piemineklis* (tēlnieks K. Zāle, arhitekts E. Štālbergs; 1935; Rīga); 2) skulptūra *Kritušie brāļi* (tēlnieks K. Zāle, arhitekts E. Štālbergs; 1936; Rīgas Brāļu kapi; Rīga); 3) *Smārdes Brāļu kapi* (tēlnieks K. Zāle, 1936; Tukuma rajons, Smārdes pagasts); 4) *Piemineklis Latvijas neatkarības cīņās kritušajiem* (tēlnieks M. Šmalcs, arhitekts N. Voits, 1937; Jelgavas rajons, Cenas pagasts); 5) *Kapa piemineklis Kr. Skaldera ģimenei* (autors nezināms, 1930-tie gadi; Bauska, Plosta kapi).

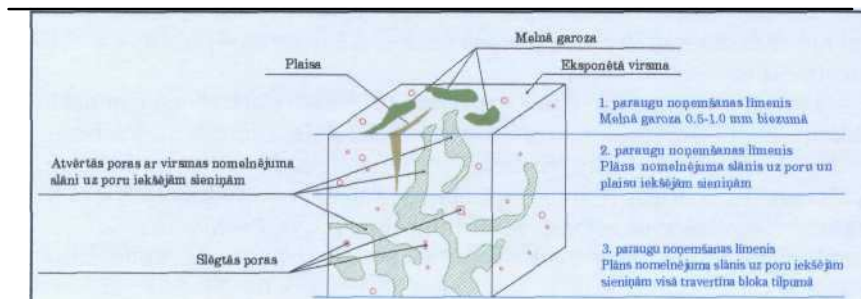
Apsekotie Romāņu travertīna objekti Latvijā, Romā un Ņujorkā būtiski atšķiras pēc dizaina, tehnoloģiskā un amatnieciskā izpildījuma, kas arī nosaka travertīna korozijas procesus katram konkrētajam objektam. Latvijas pieminekļiem kopēja korozijas pazīme ir tā, ka celtniecībā tīcis izmantots neizžāvēts travertīna materiāls, kas piesātināts ar karjera mitrumu, kā rezultātā celtniecībai paredzētie travertīna bloki ziemas salā Latvijā saplaisāja. Latvijas piemērs ir apstiprinājums tam, cik būtiski ir pārzināt un novērtēt dabīgo akmens materiālu īpašības, lai sekmētu to ilgmūžību objektos un novērstu nepamatotu priekšstatu veidošanos par materiālu korozijizturību.

Apsekotajiem objektiem Latvijā, Romā, un Ņujorkā raksturīga travertīna virsmas nomelnēšana un bioloģiskā apauguma veidošanās, kamēr sala izraisītie bojājumi (mikroplaisas) konstatējami tikai Ziemeļu klimatā eksponētajiem objektiem -Latvijā un Ņujorkā [6, 13].

**Eksperimentālā daļa II: virsmas deponējuma slāņu izpēte.** Virsmas deponējuma slāņi uz eksponētajām akmens virsmām ir apkārtējās vides un akmens materiāla savstarpējās iedarbības produkts. Latvijas pieminekļos virsmas deponējumiem pamatā konstatējamas divas formas: 1) melnās virsmas garozas 1-2 mm biezumā, pamatā lokalizētas vietās, kas pasargātas no lietus ūdens pārskalošanās; 2) intensīvs melns un pelēks virsmas nomelnējums, kas kā vienmērīgs, plāns slānis, kas sedz visu travertīna virsmu.

Travertīna virsmas deponējuma slāņu paraugu noņemšana un izpēte tika veikta iedalot konstatētos deponējuma slāņus trijos paraugu noņemšanas līmeņos, kas shematiski raksturoti 1. attēlā.





1. attēls. Shematisks virsmas deponējuma slāņu paraugu noņemšanas līmeņu attēlojums korodējušam Romāņu travertīnam no Brīvības pieminekļa Rīgā.

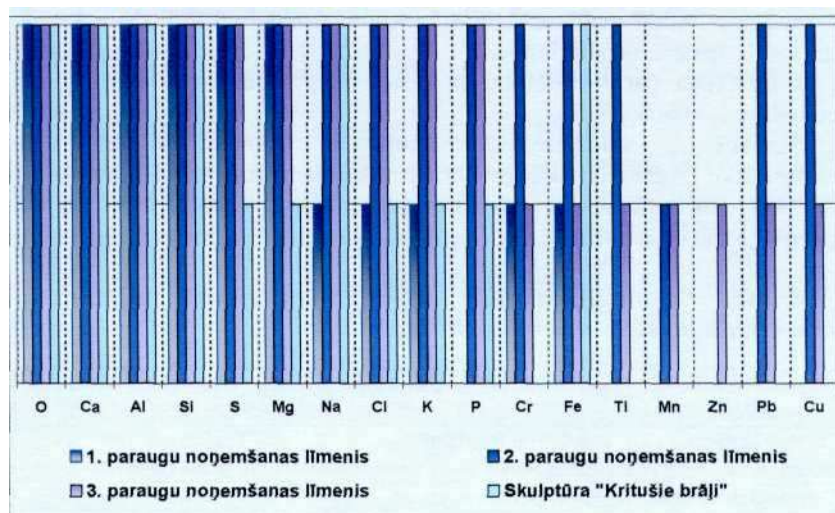
*Petrogrāfiskajā izpētē* konstatēta travertīna veidojošā kalcīta šķīšana, kas sākuma stadijā izpaužas kā atvērto poru sienīņu nogludināšanās. Tālākie pētījumi parādīja, ka novērojama uz eksponētās travertīna virsmas esošā deponējuma infiltrācija dziļāk materiālā visā travertīna būvizstrādājuma tilpumā (deponējuma slāņu 2. un 3. paraugu noņemšanas līmenis, 1. attēls).

*Deponējuma slāņu sastāva analīzes.* Saskaņā ar XRD un FTIR analīzēm, melnajā virsmas garozā (1. paraugu noņemšanas līmenis) konstatējams kalcīts, kvarcs un ģipsis, kamēr 2. un 3. paraugu noņemšanas līmeņos konstatējams tikai kalcīts. SEM/EDS analīzes rāda, ka 2. un 3. paraugu noņemšanas līmenī esošos deponējuma slāņus veido dažādas formas cietās daļiņas, kas izgulsnējušās uz plaisu un atvērto poru iekšējo sienīņu kalcīta kristālu skaldnēm (2. attēls). Deponējuma slāņu daļiņu elementu analīze (3. attēls) norāda uz:

- 1) kvarca klātbūtni (izcelsme saistīta ar vēja nestām daļiņām un piemineklī esošo granīta apšuvumu),
- 2) halīta klātbūtni (izcelsme saistīta ar piejūras reģionu un ziemas periodā lietoto sāls maisījumu ceļa segumu uzturēšanai),
- 3) minerālu un iežu fragmentu, mālu minerālu klātbūtni (izcelsme saistīta ar vēja nestām daļiņām un piemineklī esošo granīta apšuvumu).



2. attēls. SEM/EDS rezultāti, analīzes vieta atzīmēta ar "X". Dolomīta ( $\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$ ) fragmenta izgulsnēšanās uz kalcīta kristāla skaldnēm.



3. attēls. Travertīna deponējuma slāņu elementu analīzes rezultātu kopsavilkums.

Travertīna virsmas deponējuma slāņu sastāva analīze liecina, ka uz eksponētās virsmas un materiāla dziļākajos slāņos konstatētais deponējums ir identisks pēc sastāva, kas norāda, ka eksponēšanas laikā notikusi deponējuma infiltrācija pa atvērtajām porām dziļāk materiāla iekšienē. Līdz ar to var secināt, ka eksponēšanas laikā travertīna būvizstrādājumu atvērtā un savstarpēji savienotā poru sistēmu ir pakļauta mitruma migrācijai visā to tilpumā un sagaidāmas korozijas izraisītas izmaiņas atvērtajā porainībā.

Būtisks iemesls Romāņu travertīna virsmas deponējumam un nomelnēšanai Latvijas pieminekļos ir bioloģiskā apauguma attīstība - apmēram 50 līdz 70% no deponējuma ir bioloģiskais apaugums, ko veido sūnas, aļģes, mikroskopiskās sēnes un baktērijas.

Mikroorganismi var izmainīt akmens materiāla krāsu, īpaši tas attiecināms uz sēnēm no *Dematiaceae* sugas (*Altenaria*, *Cladosporium*), kas satur tumšos pigmentus - *melanine* un *melanoid* [13], kas konstatēti uz Latvijas travertīna pieminekļiem. Mikrobioloģijas attīstība uz akmens virsmas veido labvēlīgu vidi virsmas deponējuma veidošanās procesam, sekmējot apkārtējās vides daļiņu piesaistīšanu; materiāla kapilāro absorbciju un ūdens migrāciju materiālā difūzijas rezultātā.

**Eksperimentālā daļa III: materiāla raksturojums.** Materiāla raksturojums ietver korodējuša un nekorodējuša Romāņu travertīna

pārbaudes ar mērķi iegūt salīdzinošu abu travertīnu fizikāli/mehānisko un ilgmūžības īpašību raksturojumu.

Informācija par korodējuša un nekorodējuša travertīna izcelsmi un veidu dota 1. tabulā.

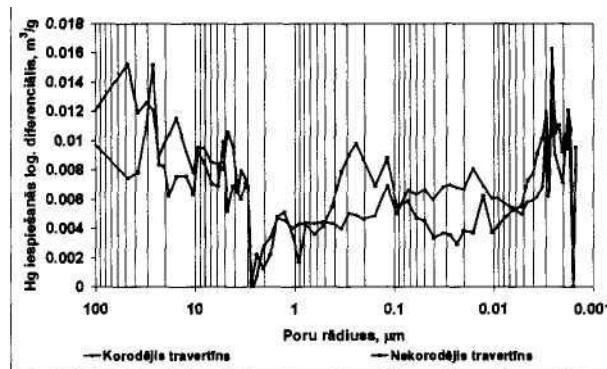
Saskaņā ar salīdzinošo korodējuša un nekorodējuša travertīna petrogrāfisko izpēti, ķīmiskā sastāva un mikroelementu analīzi (izmantojot ICP-MS) secināts, ka abi travertīna materiāli ir klasificējami kā identiski pēc to ģeoloģiskās izcelsmes.

1. tabula. Latvijas pieminekļu celtniecībā lietotā korodējuša un nekorodējuša Romāņu travertīna apzīmējums.

Apzīmēšanas kritēriji	Korodējis travertīns	Nekorodējis travertīns
Dabīgā akmens nosaukums	Travertino Romano Chiaro Barco	Travertino Romano Chiaro Barco
Petroloģiskais tips	Travertīns	Travertīns
Tipiskā krāsa	Dzeltenīgi pelēks	Dzeltenīgi pelēks
Izcelsmes vieta	Bagni di Tivoli (Roma, Lazio), Itālija	Bagni di Tivoli (Roma, Lazio), Itālija
Piegādātāja nosaukums un adrese	Mariotti Carlo & Figli S.p.A., Via Tiburtina 287, 00011 Tivoli Terme, Roma – Itālija <i>(1930.-jos gados, kad travertīnu ieveda Latvijā, kompānija darbojās ar Luigi Bartolini vārdu)</i>	Travertini Giansanti, via Tiburtina - km 25,350 Guidonia, Roma, Itālija

*Fizikālās īpašības. Poru sadalījums.* Korodējušam travertīnam, salīdzinot ar nekorodējušo materiālu, konstatējams, ka par 6% ir pieaugusi makroporainība un par 3% pieaugusi kapilārā un higroskopiskā porainība. Līdz ar to korodējušam travertīnam ir palielinājusies kapilārā uzsūce un ūdens kondensācija porās pie paaugstināta gaisa relatīvā mitruma. Būtiskas atšķirības korodējušam un nekorodējušam travertīnam vērojamas poru rajonā < 1.5 μm (4. attēls). Korodējušam travertīnam šajā poru rajonā ir gandrīz vienāds poru sadalījums, kamēr nekorodējušam travertīnam ir augstāks poru daudzums no 0.4 līdz 0.1 μm un zemāks no 0.1 līdz 0.005 μm. No salizturības viedokļa var secināt, ka korodējušam travertīnam ir zemāks sala neizturīgo poru daudzums salīdzinot ar nekorodējušo travertīnu, kas norāda uz korodējuša travertīna augstāku salizturību. Var pieņemt, ka korodējušam travertīnam sala iedarbībā ir notikusi mehāniska atvērtās porainības korozija poru rajonā < 1.5 μm, sasalšanas/atkušanas ciklu rezultātā sagraujot poru sienīņas, kā rezultātā izveidojušies jauni kapilāri un

paplašinājies jau esošo kapilāru rādiuss, veidojot jaunus kapilārus poru rajonā 0.4 - 0.1  $\mu\text{m}$  (4. attēls).

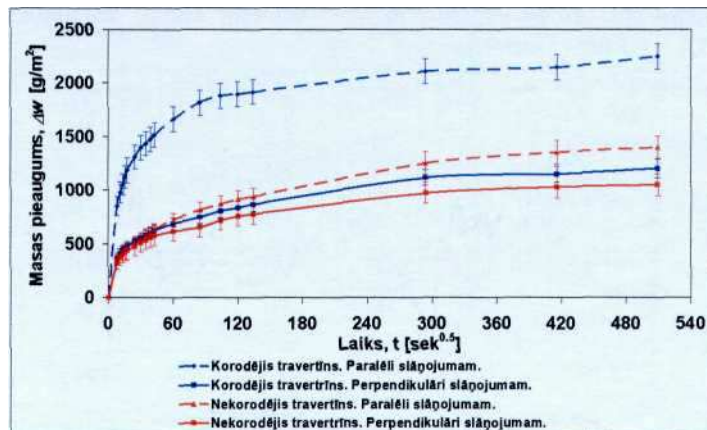


4. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna poru sadalījums (MIP).

*Kapilaritāte.* Korodējušam un nekorodējušam travertīnam ir būtiskas kapilārās ūdens uzsūces atšķirības, kā arī būtiskas atšķirības kapilaritātei dažādos virzienos atkarībā no akmens dabīgā slāņojuma (5. attēls). Kapilārās ūdens uzsūces līknes raksturo travertīna sedimentācijas slāņu ietekmi uz materiāla fizikālajām īpašībām korozijas rezultātā. Korodējušam travertīnam kapilaritāte virzienā, kas paralēls slāņojumam ir 2 reizes augstāka kā virzienā, kas perpendikulārs slāņojumam. Tas norāda, ka korozijas rezultātā pieaug travertīna fizikālo īpašību anizotropija virzienā, kas paralēls slāņojumam un apstiprina, ka nogulumiežu iebūvēs virzienam objektā atkarībā no sedimentācijas slāņojuma virziena, ir būtiska nozīme materiāla ilgmūžības nodrošināšanai.

Eksponēšanas laikā materiāla korozija pa travertīna sedimentācijas slāņiem notiek rodoties iekšējām plaisām, kas tālāk samazina travertīna stiprību vājākajā virzienā [12]. Radušās plaisas darbojas kā poras, īpaši attiecībā uz ūdens uzsūci un iekšējo spriegumu attīstību, un var būt par iemeslu korodējuša travertīna uzrādītajai augstākajai kapilaritātei. Korodējuša travertīna augstāka kapilaritāte salīdzinot ar nekorodējušo travertīnu skaidrojama ar poru sadalījumu (4. attēls), kas norāda, ka korodējušam travertīnam ir lielāks daudzums kapilāro poru.

No kapilaritātes rezultātiem var secināt, ka korodējušais travertīns uzrāda 2 reizes augstāku ūdens uzsūces anizotropiju virzienā, kas paralēls slāņojumam, kamēr nekorodējušais travertīns - tikai 1 reizi, kas liecina, ka korozijas rezultātā var tikt prognozēts akmens materiāla anizotropijas pieaugums.

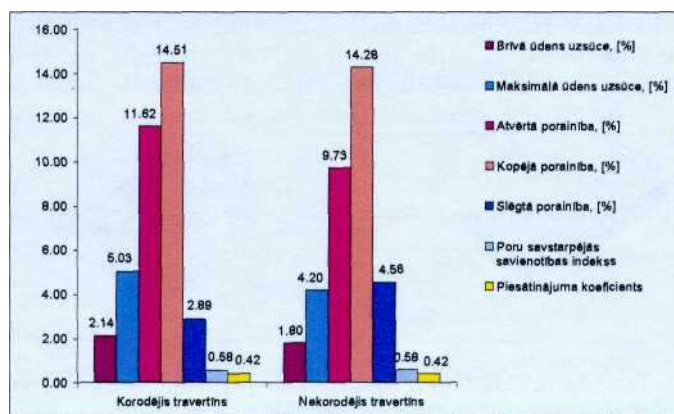


5. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna kapilaritāte, masas pieaugums [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] atkarībā no laika [ $\text{sek}^{0.5}$ ].

*Iztvaikošana un žūšana.* Gan korodējuša, gan nekorodējuša travertīna žūšana notiek bez I žūšanas perioda - kad iztvaikošanu nosaka žūšanas ārējie apstākļi. Travertīna žūšanas process notiek pie II žūšanas perioda, kad iztvaikošanu nosaka materiāla struktūras īpašības - porainība un poru struktūra. Tas nozīmē, ka travertīna žūšanas ātrumu nosaka materiāla struktūra, sevišķi, kapilārā un higroskopiskā porainība.

*Brīvā ūdens uzsūce.* Brīvajā ūdens uzsūcē atmosfēras spiedienā korodējušam travertīnam ir 2 reizes augstāka ūdens uzsūce salīdzinot ar nekorodējušo travertīnu. Korodējušam travertīnam ūdens uzsūce notiek straujāk, kas skaidrojams ar augstāku materiāla kapilaritāti un higroskopisko porainību, kas veicina uzsūktā ūdens tālāku migrāciju materiāla struktūrā.

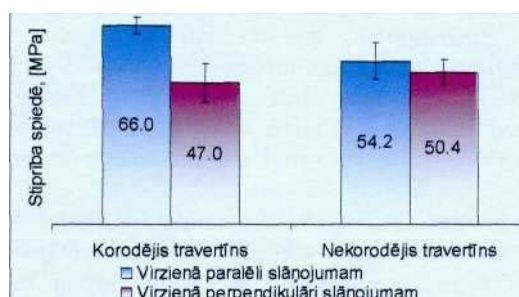
*Aprēķinātie fizikālie parametri.* Korodējušam travertīnam konstatējams atvērtās porainības pieaugums salīdzinot ar nekorodējušo travertīnu. Kopējā porainība ir vienāda abiem akmens materiāliem, kamēr novērojamas būtiskas atšķirības atvērtās un slēgtās porainības attiecībās - korodējušam travertīnam konstatējama atvērtās porainība palielināšanās ar sekojošu slēgtās porainības samazināšanos (6. attēls). Latvijas pieminekļos izmantotā neizžāvētā Romāņu travertīna saplaisāšana salā un materiāla tālāka pakļaušana Ziemeļu klimatiskajiem apstākļiem varēja būt par iemeslu materiāla atvērtās porainības pieaugšanai.



6. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna aprēķinātie fizikālie lielumi.

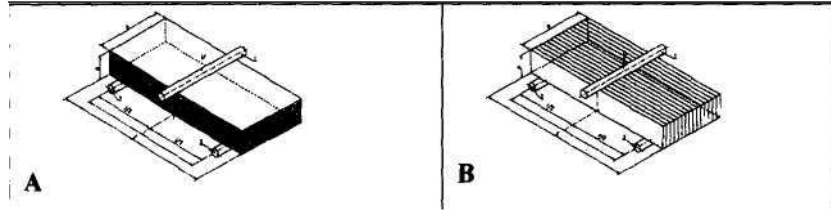
**Mehāniskās īpašības. Stiprība spiedē.** Travertīna stiprība spiedē (7. attēls) tika noteikta divos virzienos atkarībā no travertīna slāņojuma virziena - slogojot materiālu virzienā paralēli un perpendikulāri akmens slāņojumam. Iegūtajiem rezultātiem ir liela izkliede, standartkļūda sastāda 20%, kas skaidrojams ar izteikto materiāla struktūras neviendabību. Var secināt, ka:

- gan korodējušais, gan nekorodējušais travertīns atbilst apdares materiāliem noteiktajām prasībām;
- nekorodējušais travertīns uzrāda 1,1 reizi lielu stiprības spiedē anizotropiju atkarībā no slāņojuma virziena;
- korodējušais travertīns uzrāda 1,4 reizes lielu stiprības spiedē anizotropiju atkarībā no slāņojuma virziena.



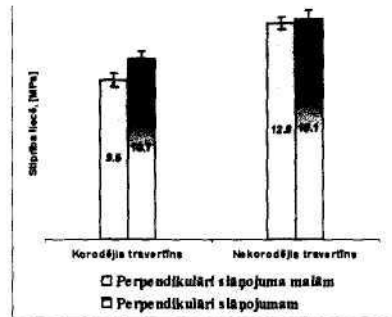
7. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna stiprība spiedē virzienā paralēli un perpendikulāri akmens slāņojumam.

*Stiprība liecē.* Stiprība liecē tika noteikta divos virzienos atkarībā no travertīna slāņojuma - slogojot materiālu virzienā perpendikulāri slāņojumam un virzienā perpendikulāri slāņojuma malām (8. attēls).



8. attēls. Travertīna slogošana liecē virzienā perpendikulāri slāņojumam (A) un perpendikulāri slāņojuma malām (B).

Gan korodējušam, gan nekorodējušam travertīnam stiprība liecē (9. attēls) ir atbilstoša apdarē lietojamiem akmens materiāliem noteiktajām prasībām. Korodējušam travertīnam stiprība liecē ir par 20 līdz 30% zemāka kā nekorodējušam travertīnam, kas norāda uz struktūras pavājināšanos korozijas rezultātā un anizotropijas pieaugumu atkarībā no slāņojuma virziena. Travertīna slāņojums nosaka īpašas prasības materiāla iebūvēs

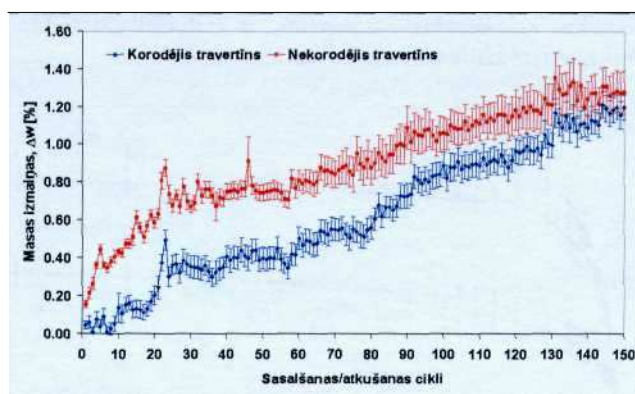


9. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna stiprība liecē virzienā perpendikulāri slāņojumam.

tehnoloģiskajam risinājumam, lai novērstu korozijas pa slāņojumam izraisīto ūdens infiltrāciju un lieces spriegumus. Nekorodējušam travertīnam piemīt vāji izteikta stiprības liecē anizotropija, kamēr korodējušam travertīnam anizotropija ir 1,1 reize atkarībā no slāņojuma virziena ar zemāku stiprību virzienā, kas perpendikulārs slāņojuma malām.

**Ilgmūžības pārbaudes.** *Salizturība.* Pārbaude paraugiem, kas piesātināti brīvā uzsūcē. Kopskaitā tika veikti 150 sasaldšanas/atkuššanas cikli (10. attēls), kuru laikā ne korodējušam, ne nekorodējušam travertīnam nav novērojamas masas samazināšanās. Abi travertīni iztur 150 ciklus un ir klasificējami kā salizturīgi materiāli.





10. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna masas izmaiņas salizturības pārbaudes laikā.

Salizturības pārbaudes laikā tika veikta paraugu vizuāla novērtēšana. Lai gan pēc 150 cikliem abi travertīna materiāli uzskatāmi par salizturīgiem, paraugiem tika novērotas vizuālas izmaiņas, saskaņā ar kurām var secināt, ka:

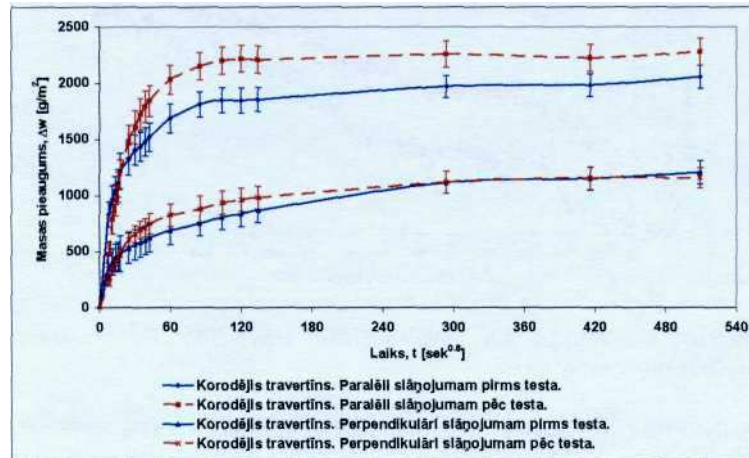
- gan korodējušam, gan nekorodējušam travertīnam konstatējami sala izraisītie bojājumi, tomēr bojājumu apjoms un pakāpe ir nenozīmīga, lai ietekmētu kopējo materiāla uzradīto salizturību;
- sala izraisītās bojājumu pazīmes vispirms konstatējamās korodējušam travertīnam, kamēr nekorodējušais travertīns iztur ilgāku laiku līdz pirmajām bojājuma pazīmēm, tomēr, kad tās parādās, notiek straujāka materiāla sabrukšana kā korodējušam travertīnam.

Tā kā salizturība pārbaudes laikā gan korodējušais, gan nekorodējušais travertīns tika pakļauti vienādiem testa apstākļiem, tad abu materiālu porainība un poru struktūra saglabājas kā pamat faktors, kas noteica abu materiālu korozijizturību testa laikā. Iepriekšējie fizikāli/mehānisko īpašību pārbaudes rezultāti norādīja, ka korodējušais travertīns ir bijis pakļauts sala izraisītiem korozijas procesiem, savukārt poru sadalījuma izpēte rāda, ka nekorodējušam travertīnam būtu sagaidāma nedaudz zemāka salizturība salīdzinot ar korodējušo materiālu. Lai teorētiski raksturotu sala izraisītās struktūras izmaiņas, tika analizētas korodējuša un nekorodējuša travertīna fizikālās īpašības pēc salizturības pārbaudes.

*Fizikālās īpašības pēc salizturības pārbaudes.* Korodējušam travertīnam pēc salizturības pārbaudes netika novērotas būtiskas izmaiņas kapilārajā ūdens uzsūcē (11. attēls). Kapilaritātes pieaugums virzienā, kas paralēls slāņojumam ir tikai apmēram 10%, anizotropijas pieaugums - 12%,



kas norāda, ka korodējušais travertīns ir izturīgs materiāls tālākai eksponēšanai Latvijas klimatiskajos apstākļos.



11. attēls. Korodējuša travertīna kapilaritāte virzienā paralēli un perpendikulāri slāņojumam pirms un pēc salizturības pārbaudes.

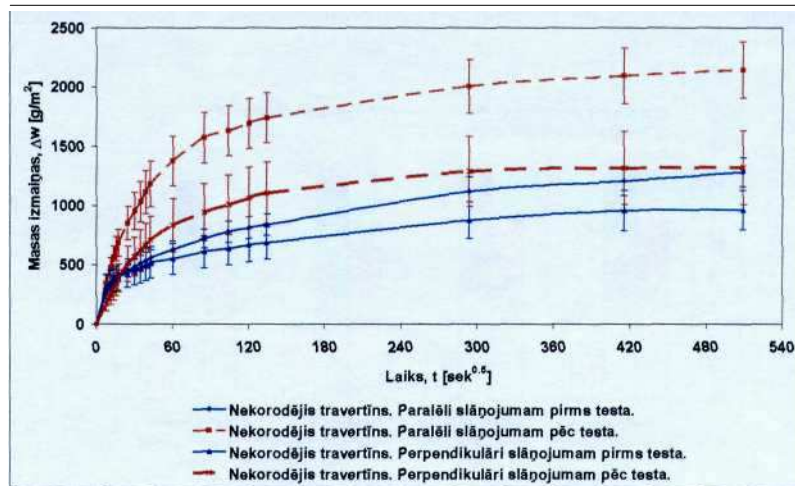
Nekorodējušam travertīnam (12. attēls) tika konstatētas būtiskas izmaiņas:

? virzienā, kas paralēls slāņojumam materiāla kapilaritāte pieauga par 68%, virzienā, kas perpendikulārs slāņojumam - par 37%;

? sala bojājumi izraisījuši fizikālo īpašību anizotropijas pieaugumu virzienā, kas paralēls slāņojumam par 23%.

Iegūtie dati apstiprina pieņēmumu, ka korozijas rezultātā pieaug Romāņu travertīna fizikāli/mehānisko īpašību anizotropija samazinot materiāla izturību tā vajātajā virzienā - paralēli slāņojumam.

Pēc salizturības testa korodējušam travertīnam konstatējams brīvās ūdens uzsūces pieaugums par 30%, kamēr nekorodējušam travertīnam - par 45%, kas ir par 15% vairāk kā korodējušam travertīnam (13. attēls). Konstatējamas izmaiņas arī maksimālajā ūdens uzsūcē, kā rezultātā travertīna piesātinājuma koeficients pieaudzis no 0,4 līdz 0,5 samazinoties poru savstarpējam savienotības indeksam no 0,6 uz 0,5. Tas norāda, ka ir izmainījusies atvērtās poru sistēmas struktūra palielinoties savstarpēji savienoto poru daudzumam, sekmējot ūdens migrāciju materiālā.

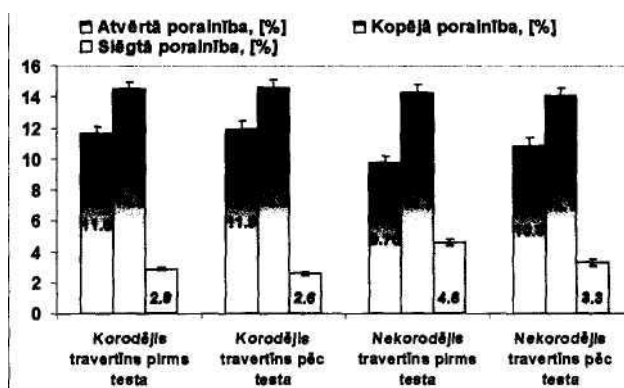


12. attēls. Nekorodējuša travertīna kapilaritāte virziena paralēli un perpendikulāri slāņojumam pirms un pēc salizturības pārbaudes.

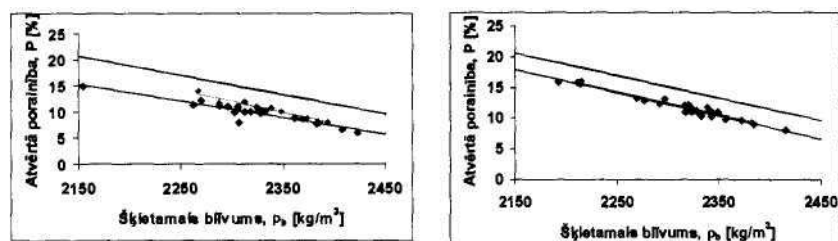
Pēc salizturības testa nekorodējuša travertīna atvērtā porainība palielinājusies par 10% samazinoties slēgtajai porainībai par 30% (13. attēls). Atvērtās un slēgtās porainības attiecību izmaiņas attēlotas 14. un 15. attēlā - atvērtā porainība pret travertīna šķietamo blīvumu. Korodējušam travertīnam šīs izmaiņas ir praktiski nemanāmas, kamēr nekorodējušam travertīnam konstatējama būtiska slēgtās porainības samazināšanās. Tas liecina, ka poru daudzums, kuru rādiuss  $> 3 \mu\text{m}$  un no  $0,4$  līdz  $0,006 \mu\text{m}$  rādiusā, kur korodējušais un nekorodējušais travertīns uzrādīja būtiskas atšķirības, ir būtisks faktors materiāla salizturībā. Korodējušam travertīnam ir lielāks poru daudzums ar rādiusu  $> 3 \mu\text{m}$  nodrošinot vairāk vietas ledus kristālu augšanai. Ledus kristāli var veidoties arī mazākās porās, kad temperatūra noslīd zem kritiskā punkta, ko nosaka sasaldēta ūdens meniska līknes rādiuss. Nekorodētā travertīnam ir lielāks poru daudzums ar rādiusu no  $0,4$  līdz  $0,1 \mu\text{m}$ , kas var tikt piesātinātas ar ūdeni kapilārās uzsūces rezultātā. Šajā poru rajonā ūdens sasilst jau pie temperatūras zem nulle grādiem.

Fizikālo īpašību izmaiņas pēc salizturības pārbaudes norāda, ka sasaldēšanas/atkuššanas ciklu iedarbības rezultātā akmens materiāls ir palicis vizuāli neskarts, bet ar pavājinātu materiāla struktūru. Dabīgais korozijas process, kas izraisa porainības palielināšanos, sākumā izraisa sīku poru

struktūras veidošanos un turpinās graujot poru sienīgas, tā palielinot poru vidējo rādīsu.



13. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna porainības pirms un pēc salizturības pārbaudes.

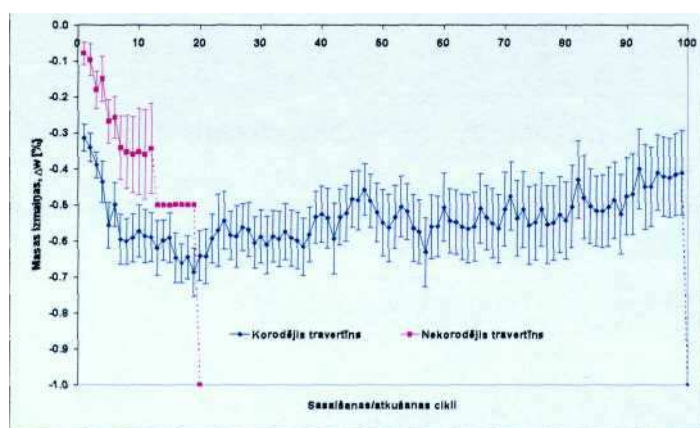


14. attēls. Nekorodējuša travertīna atvērta porainība pret travertīna atvērta porainība pret travertīna šķietamo blīvumu pirms salizturības pārbaudes (tumši zilā līnija) un pēc testa (gaiši zilā līnija).  
15. attēls. Korodējuša travertīna atvērta porainība pret travertīna atvērta porainība pret travertīna šķietamo blīvumu pirms salizturības pārbaudes (tumši zilā līnija) un pēc testa (gaiši zilā līnija).

Sarkanā līnija ir Romāņu travertīna kopējā porainība, kuras aprēķināšanai patiesais blīvums izmantots minerāla kalcīta kristalogrāfiskais - 2710 kg/m<sup>3</sup> [14].

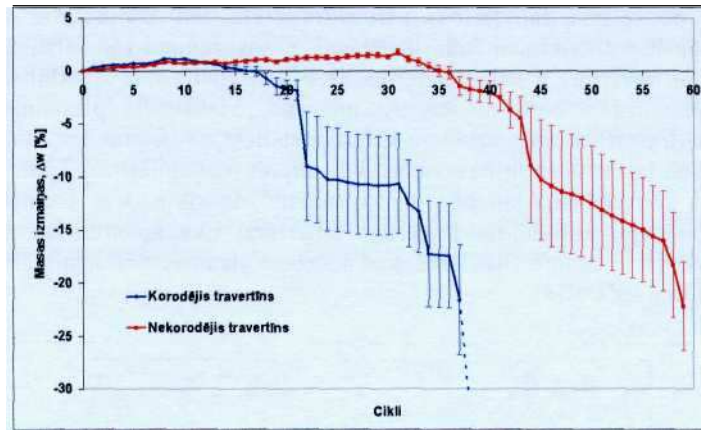
Salizturība. Pārbaude maksimāli piesātinātiem paraugiem. Salizturības pārbaude maksimāli piesātinātiem paraugiem tika veikta ar mērķi, lai simulētu apstākļus, kad neizžāvēts travertīna materiāls, kas piesātināts ar karjera mitrumu, tiek pakļauts sala iedarbībai, kā tas bija Latvijas pieminekļu gadījumā.

Jau pēc pirmā salizturības pārbaudes cikla gan korodējušam, gan nekorodējušam travertīnam tika konstatēti masas zudumi (16. attēls), kas liecina, ka travertīns ir sala neizturīgs, ja tiek pakļauts sala iedarbībai bez iepriekšējas izžāvēšanas no karjera mitruma. Maksimāla piesātinājuma gadījumā travertīna poru struktūrā ledus kristāliem nav vietas kur augt, kā arī nesasalūšajam ūdenim nav vietas, kur migrēt pa kapilāriem. Tāpēc sala bojājumi konstatējami jau pēc pirmā salizturības cikla. Var secināt, ka pamat bojājumi korodējuša travertīna struktūrai tika nodarīti jau pirms Latvijas objektu celtniecības laikā, kad neizžāvētais travertīna materiāls tika pakļauts sala iedarbībai.



16. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna masas izmaiņas salizturības pārbaudes laikā ciklojot maksimāli piesātinātus travertīna paraugus.

*Pretošanās sāļu kristalizācijai.* Sāļu kristalizācijas pārbaude tika veikta līdz pilnīgai paraugu sagraušanai (17. attēls) ar mērķi noteikt atšķirības korozijizturībā korodējušam un nekorodējušam travertīnam. Korodējuša travertīna sabrukšana tika novērota jau pie 17. cikla, kamēr nekorodējušam travertīnam - pie 36. cikla, līdz ar to var secināt, ka korodējušais travertīns uzrāda 2 reizes zemāku izturību kā nekorodējušais travertīns. Pēc 15 cikliem masas zudums gan korodējušam, gan nekorodējušam travertīnam ir < 1% un travertīna materiāli uzskatāmi par piemērotiem visiem eksponēšanas apstākļiem eksterjera apdarē [7].



17. attēls. Korodējuša un nekorodējuša travertīna pretošanās sāļu kristalizācijai.

## Secinājumi

1. 1930-tajos gados akmens apdares materiāls Klasiskais Gaišais Romāņu travertīns (Itālija) pielietots eksterjerā piecu Kultūrvēsturisko pieminekļu celtniecībā Latvijā, reģionā ar paaugstinātu vides agresivitāti porainiem akmens materiāliem, ko nosaka ziemeļu klimatiskie apstākļi.
2. Latvijas pieminekļos 60 gadu eksponēšanas laikā Romāņu travertīna struktūra ir tikusi pakļauta pastāvīgai ūdens migrācijai pa atvērto poru sistēmu, kā rezultātā visā materiāla tilpumā konstatēta kalcīta šķīšana/rekristalizācija un nosēdumu veidošanās materiāla poru struktūrā, kas sastāv no apkārtējā vidē esošajām kvarca, mālu minerālu, halīta, minerālu un iežu daļiņām.
3. Pēc 60 gadu eksponēšanas Latvijas pieminekļos Klasiskajam gaišajam Romāņu travertīnam ir sekojošas īpašības: 1) *brīvā ūdens uzsūce* - 2.1%; 2) *atvērta porainība* - 11.6%; 3) *piesātinājuma koeficients* - 0.42; 4) *stiprība spiedē* - 56.5 MPa, 5) *stiprība liecē* - 10.1 MPa; 6) *sala izturība* >150 cikli; 7) *pretošanās sāļu kristalizācijai* - 0% masas zudumi pēc 15 cikliem; kas norāda, ka Latvijas pieminekļos lietotais travertīns vēl joprojām ir ilgmūžīgs akmens apdares materiāls, kas piemērots eksponēšanai agresīvos ziemeļu klimatiskajos apstākļos.
4. Nekorodējušam Klasiskajam gaišajam Romāņu travertīnam ir sekojošas īpašības: 1) *brīvā ūdens uzsūce* - 1.8%; 2) *atvērta porainība* - 9.7%; 3) *piesātinājuma koeficients* - 0.42; 4) *stiprība spiedē* - 52.3 MPa, 5) *stiprība liecē* - 13.0 MPa; 6) *sala izturība* > 150 cikli; 7) *pretošanās sāļu kristalizācijai* - 0% masas zudumi pēc 15 cikliem; kas norāda, ka Klasiskais gaišais Romāņu travertīns ir ilgmūžīgs akmens apdares materiāls, kas pielietojams arī agresīvas vides apstākļos, tai skaitā, pakļaujot materiālu sasalšanas/atkušanas cikliem Ziemeļu klimatiskajos reģionos.
5. Latvijas klimatiskajos apstākļos Romāņu travertīna korozijas rezultātā ir notikusi materiāla: 1) atvērta porainības palielināšanās par 16% un sekojoša slēgtās porainības samazināšanās; 2) kapilaritātes pieaugums par 50% virzienā, kas paralēls dabīgajam akmens slāņojumam; 3) stiprības liecē samazināšanās par 23%; 4) fizikāli/mehānisko īpašību anizotropijas pieaugums par 0,4 reizēm virzienā, kas paralēls dabīgajam akmens slāņojumam.

6. Nekorodējušam travertīnam salizturības pārbaudes rezultāta laboratorija ir konstatētas sekojošas fizikālo īpašību izmaiņas: 1) atvērtās porainības pieaugums par 12% ar sekojošu slēgtās porainības samazināšanos; 2) kapilaritātes pieaugums par 40% virzienā, kas paralēls dabīgajam akmens slāņojumam; 3) piesātinājuma koeficienta palielināšanās no 0,4 līdz 0,5; 4) fizikālo īpašību anizotropijas pieaugumu par 0,3 reizēm virzienā, kas paralēls dabīgajam akmens slāņojumam. Iegūtie dati ir salīdzināmi ar korozijas procesiem, kas konstatēti korodējušam travertīnam eksponētām Latvijas objektos.
7. Pielietojot Romāņu travertīnu Ziemeļu klimatiskajos reģionos, obligāts priekšnosacījums ir augstākas prasības objektu projekta izstrādei, amatnieciskajam un tehnoloģiskajam izpildījumam, un regulārajai aprūpei.
8. Latvijas Kultūrvēsturisko pieminekļu, kuros pielietots Romāņu travertīns, korozijas pamatcēloņi ir no karjera mitruma neizžāvēta akmens materiāla pielietojums un objektu regulārās aprūpes trūkums, kā rezultātā eksponēšana Ziemeļu klimatiskajos apstākļos ir izraisījusi travertīna struktūras bojājumus.
9. Lai saglabātu Latvijas Kultūrvēsturiskos pieminekļus, kuru celtniecībā pielietots Romāņu travertīns, ik pēc 2 līdz 4 gadiem jāveic regulāra objektu aprūpe, ietverot virsmas attīrīšanu un aizsardzību pret bioloģiskā apauguma atjaunošanos.
10. Pamatojoties uz promocijas darba rezultātiem, izstrādāti konservācijas/restaurācijas projekti 3 Latvijas Romāņu travertīna pieminekļiem un veikta 2 pieminekļu konservācija/restaurācija.

### Literatūras saraksts

1. Yates T., Butlin R. *Predicting the weather ability of Portland limestone buildings*, In Processes of Urban Stone Decay, Donhead Publishing, 1996, pp. 194-204
2. Bortz A., Wonneberger B. *Predicting the durability of building stone using accelerated weathering*, In Durability 2000: Accelerated and Outdoor Weathering testing, ASTM STP 1385, PA, 2000, pp. 116 - 132
3. Esbert R.M., Ordaz J. Alonso F.J., Montoto M. *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pe'treos y cerdamicos. Manuals de Diagnosi.* Col·legi d'Aparelladors I Arquitects Teenies de Barcelona, 1997, 126 pp.
4. Ordonez S., et. al., *Pore size distribution and the durability of a porous limestone*, In Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 30, 1997, pp. 221-230
5. Schaffer R. J. *The weathering of natural building stones*, Building Research, Special Report No. 18, London, 1933, pp 98-105
6. *Selecting natural building stones*, Digest 420, Building Research Establishment, Watford, 1997, pp 8
7. Ross K. D., Butlin R. N. *Durability tests for building stone*, Building Research Establishment, Watford, 1989, pp 8
8. Mallidi, S. R., *Application of mercury intrusion porosimetry on clay bricks to assess freeze-thaw durability. A bibliography with abstracts.* In Constr. Build. Mater., 10(6), 1996, pp. 461-465
9. Winslow, D. N., Kilgour, C. L., Crooks, R. W., *Predicting the durability of bricks*. In Am. Ceram. Soc. for Testing Materials, 1988, pp. 527-531
10. Kaneuji, M., Winslow, D. N., Dolch, W. L., *The relationship between an aggregate pore size distribution and its freeze thaw durability in concrete*. In Cement Concrete Res., 10,1980, pp. 433-441
11. Robertson, W. D., *Evaluation of the durability of limestone masonry in historic buildings*. In Science and Technology in the Service of Conservation, ed. N. S. Bronimelle and G. Thomson. The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London, 1982, pp. 51-55
12. Beasley K. J. Use and misuse of exterior travertine cladding, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 2., No. 4, November, ASCE, 1988, pp 242-253
13. Vulfa L., Fišere Dž., Pīterans A. Brīvības pieminekļa un Brāļu kapu ansambļa biokorozijas problēmas: apaugums ar mikroorganismiem, Latvijas Zinātņu akadēmijas vēstis, Nr. 9 (554), lpp 68 - 71, 1993
14. Hall C, Hoff W. D. Water transport in brick, stone and concrete, Spon press, London, 2002, 318 pp.



### Publikāciju saraksts

1. Hodireva V., Kondratjeva S., Sidraba I. *Petrographical investigation of lithological types of travertines in Latvian Cultural Heritage*, Proceedings of 1st International Symposium on TRAVERTINE, Denizli, Turkey, September 21-25, pp 350 - 354, 2005
2. Cultrone G., Sidraba I., Sebastian E. *Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the "Triangul Bastion", Riga (Latvia)*, Applied Clay Science, Elsevier, pp 297-308, 2005
3. Sidraba I., Normandin K.C., Cultrone G., Scheffler M.J. *Climatological and Regional Weathering of Roman Travertine*, Architectural and sculptural stone in man-cultivated landscape, Karolinum Press, pp 165-182, 2004
4. Cultrone G., Sidraba I., Sebastian E. *Muraglia di Riga - Lettonia. Deterioramento dei matoni del bastione Triangul*, La Rivista del Restauro, No 53, KERMES, pp 61-65, 2004
5. Sidraba I., Krage L., Graudums I. *Necessity and efficiency of conservation treatment on travertino romano*, I silicati nella conservazione-Indagini, esperienze e valutazioni per il consolidamento dei manufatti storici, AltriLIBRI 3, pp 185-194, 2004
6. Mezinskis G., Sidraba I., Yates T., Lūsis R. *Stone and concrete in the MULTI-ASSESS project*, Cultural Heritage in the City of Tomorrow, Bulletin HOE, Swedish corrosion institute, pp 135-143, 2004
7. Lūsis R., Sidraba I. *Mitruma un sāļu problēmas Rīgas Doma Ziemeļu sienā*, Scientific Proceed. of Riga Technical University. Series: material Science and Applied Chemistry, No 6, RTU, Riga, pp 45-55, 2003
8. Sidraba I., Krage L., Igaune S., Vitina I. *Corrosion and restoration of travertine and granite in Freedom Monument (Riga, Latvia)*, Understanding and managing Stone Decay, Karolinum Press, pp 275-284, 2002
9. Lusis R., Sidraba I., Krage L., Vitina I. *Investigation of stone materials with a view to restoration of stone Monuments in Latvia*. Proceed, of Int. Congress "Quarry-Laboratory-Monument", Calvi&Zezza edited, Pavia, Vol. 1, pp. 403-407, 2000
10. Sidraba I., Krage L., Graudums I. *Problems and solutions in practical restoration of freshwater limestone-tufa*. Proc. of 9<sup>th</sup> Int. Congr. on deterioration and conservation of stone. ELSEVIER SCIENCE B. V., Vol. 2, pp. 889-896, 2000