

Dokumentiranje oblik propadanja naravnega kamna na objektih kulturne dediščine

Documentation of weathering forms of natural stone on monuments

SABINA KRAMAR^{1,*} & BREDA MIRTIC²

¹Institute for the Protection of Cultural Heritage of Slovenia, Conservation Centre, Restoration Centre, Poljanska cesta 40, 1000 Ljubljana, Slovenia

²University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of Geology, Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

*Corresponding author. E-mail: sabina.kramar@rescen.si

Received: October 22, 2010

Accepted: December 3, 2010

Abstract A detailed investigation of stone monuments makes an important contribution to damage diagnosis on stone monuments. Paper presents a review of weathering form groups and main weathering forms, which represent classification scheme of individual weathering forms. Documentation of weathering forms of natural stone and mapping of weathering forms is shown for the case of black limestone Drenov Grič.

Izveček Izčrpna dokumentacija o propadanju naravnega kamna je ključnega pomena na področju ohranjanja objektov kulturne dediščine. V prispevku je podan pregled skupin in glavnih oblik propadanja naravnega kamna, na podlagi katerih klasificiramo posamezne oblike propadanja. Dokumentacija in vrednotenje oblik propadanja naravnega kamna in grafični prikaz le-teh so podani na primeru črnega apnenca Drenov Grič.

Key words: weathering forms, limestone, deterioration, natural stone, cultural heritage

Ključne besede: oblike propadanja, apnenec, propadanje, naravni kamen, kulturna dediščina

Uvod

Razpadanje naravnega kamna kot manifestacija preperevanja je naraven odziv sestavin kamnine na razmere v okolici, ki zajemajo atmosferske spremembe, antropogene dejavnike in vpliv živega sveta. Propadanje kamna zmanjšuje njegovo uporabno vrednost in funkcionalnost, saj vpliva na dimenzije, obliko, videz, fizikalno-mehanske lastnosti, na kemično obstojnosti ipd. (BILBIJA & GRIMŠIČAR, 1987). Pojav posameznih oblik propadanja na določenem objektu oz. spomeniku iz naravnega kamna je odvisen od zunanjih dejavnikov ter lastnosti kamnine. Določene poškodbe so vezane izključno na intrinzične lastnosti kamnine, ki so posledica njenega nastanka in geološke zgodovine. Pojem »oblika propadanja« uporabljamo za vidno propadanje kamnin na mezoskali (cm–m) (FITZNER & HEINRICH, 2002).

Sodoben način ohranjanja spomenikov iz naravnega kamna delimo na: (a) anamnezo (umetnostna zgodovina objekta, lokacija, umestitev v okolje), (b) diagnozo (določanje materialov, lastnosti materialov, identifikacija stanja propadanja ter določanje procesov propadanja) in (c) terapijo (nadzor, vzdrževanje) (FITZNER & HEINRICH, 2002). Upoštevač mednarodne direktive je dokumentacija oblik propadanja nujen del vseh treh korakov. Metodologija v okviru diagnoze zajema preiskave

na samem objektu (preiskave *in situ*), skupaj z vrednotenjem in grafično dokumentacijo propadanja naravnega kamna ter laboratorijske analize.

Dokumentiranje makroskopskih sprememb oziroma karakterizacija, kvantifikacija in interpretacija oblik propadanja naravnega kamna na določenem objektu je eden od ključnih korakov pred restavratorsko-konservatorskim posegom, saj je osnova za konservatorsko-restavratorske smernice. Detajlna analiza oblik propadanja je prvi pogoj za razumevanje vzrokov, procesov ter karakteristik poškodb naravnega kamna ter celostnega ohranjanja spomenikov. Učinkovit nedestruktivni postopek za preiskave *in situ* oz. preučevanje poškodovanosti naravnega kamna na objektih kulturne dediščine je metoda kartiranja oblik propadanja (FITZNER in sod., 2002; FITZNER & HEINRICH, 2003; FITZNER, 2004; FITZNER in sod., 2004; ROTHERT in sod., 2007). Na podlagi prepoznanih oblik propadanja lahko ugotovimo vzroke zanj ter stopnje in procese propadanja. Objektivni opis, prepoznavanje in dokumentacija oblik propadanja zahtevajo natančno klasifikacijsko shemo teh oblik. Na razpolago so različne klasifikacije, ki so jih podali: italijanska komisija NORMAL (Normative materials lapidei, 1988), nemška delovna skupina *Natural stones and weathering* (Classification scheme of weathering forms (FITZNER & HEINRICH, 2002) in Photo

atlas of weathering forms on stone monuments (FITZNER & HEINRICH, 2004) in nedavno tudi ICOMOS-ISC (Illustrated glossary on stone deterioration patterns, 2008).

V slovenskem prostoru se ne uporablja klasifikacije, ki bi vsebovala popis vseh oblik propadanja naravnega kamna na objektih kulturne dediščine. Zato se pogosto za isti tip oblik propadanja uporabljajo različni izrazi, poleg tega oblike propadanja niso razdeljene po skupinah, kar je pogoj za pregledno dokumentiranje.

V prispevku so podani pregled skupin in glavnih oblik propadanja naravnega kamna, na podlagi katerih klasificiramo posamezne oblike propadanja, ter opis določenega pojava, nabor izrazov ter razlaga procesov propadanja. Opis temelji na klasifikaciji nemške delovne skupine Natural stones and weathering (FITZNER & HEINRICH, 2002; FITZNER & HEINRICH, 2004). Definicije posameznih pojmov se navezujejo izključno na makroskopske analize, ne glede na vzroke za nastanek sprememb oz. oblik razpadanja. Namen tega prispevka je zbrati in poenotiti različne klasifikacije, vpeljati slovenske izraze za različne primere oblik propadanja, ki bi jih pri svojem delu nato uporabljali vsi, ki se ukvarjajo s problemom propadanja naravnega kamna na spomenikih in drugih objektih iz naravnega kamna. Prikaz določanja oblik propadanja na-

ravnega kamna na objektih kulturne dediščine in grafična predstavitev le-teh je podana na primeru črnega apnenca Drenov Grič.

KLASIFIKACIJA OBLIK PROPADANJA NARAVNEGA KAMNA

Osnovno klasifikacijsko shemo, uporabljeno v prispevku, po vzoru nemške klasifikacije (FITZNER & HEINRICH, 2002) sestavljajo štiri skupine propadanja, ki so nadalje razdeljene v glavne oblike, le-te pa v posamezne oblike propadanja. Klasifikacijo bo z nadaljnjim delom smiselno izboljševati in dopolnjevati. Predlagana klasifikacija omogoča na objektu kartirati posamezne oblike propadanja, ki jih označimo z ustreznim grafičnim simbolom in razdelimo po glavnih oblikah propadanja in po skupinah. Razdelitev oblik propadanja v štiri skupine poda pregled nad različnimi načini propadanja in s tem prvo informacijo o določeni obliki propadanja in njeni lokaciji na objektu.

Grafični prikaz zato omogoča takojšnjo oceno stopnje poškodb na določenem objektu. V naslednji fazi izdelamo načrt o vrsti in količini preiskav, katerih rezultati nam nato omogočajo določiti potrebne konservatorsko-restavratorske posege. Iz kartiranja oblik propadanja je razvidno, na katerih delih kamnitega objekta prevladuje izguba materiala (prva skupina), kje so barv-

ne spremembe in nalaganje materiala (druga skupina), kje material odstopa (tretja skupina) in kje gre za poškodbe v obliki razpok in deformacij (četrti skupina). Na podlagi litološkega kartiranja na objektu lahko točno razberemo, kateri tipi oblik propadanja se pojavljajo na posamezni kamnini. Poleg tega lahko ugotovimo, kje je največja stopnja poškodb in kateri del spomenika je najbolj poškodovan.

Pregled skupin in glavnih oblik propadanja

Oblike propadanja naravnega kamna so razdeljene v štiri glavne skupine, v njih pa je izvedena dodatna delitev glede na prevladujočo obliko propadanja.

- *1. skupina* »Odpadanje delov kamnine« se deli na:

a) odpadanje površinskih plasti kamnine

Debelina odpadle površinske plasti je odvisna od globine, na kateri je nastala dekohezija kamnine.

b) nastanek reliefa

Nastanek reliefa na površini, ki ga lahko povzročajo različni dejavniki in se izraža kot površinsko odpadanje. Odpadajo manjši, bolj izpostavljeni deli površine objekta – erozija, zaradi česar se na objektu pojavi relief. Posamezne oblike propadanja so zaobljevanje in dolbenje, izbirno propadanje in luknjičasto razpadanje.

c) odlom

To je odpadanje delov kamnine zaradi

kratkotrajnega delovanja mehanske sile na kamniti objekt (zunanja mehanska sila). Velikost in oblika odlomljenega dela kamnine ter smer, po kateri se je kamnina odlomila, so odvisni od vrste sile, od tipa kamnine, njene orientacije pri gradnji ter tehnologije izdelave kamnitega elementa.

- *2. skupina* »Sprememba barve in odlaganje materiala« se deli na:

a) spremembo barve

Zajema spremembo tona, čistosti in kromatičnosti (intenzitete) barve na površini kamnine. Številne vrste propadanja kamna spremlja tudi sprememba njegove barve (obarvanje in razbarvanje).

b) odlaganje materiala v obliki tankih plasti na površini kamnine

Te plasti so posledica odlaganja aerosolov, atmosferskih delcev, ptičjih iztrebkov itd.

c) nevezane usedline soli na površini kamnine

Trdni delci soli, ki se odlagajo na površini in s tem spremenijo osnovno barvo kamnine, imajo svoj izvir v kamnini, na katere površini so se odlagali. Nastanek soli in njihova migracija na površino kamnine sta posledica drugih vrst propadanja kamnine.

č) oblogo

Oblogo sestavlja material, ki se je usedel na površino kamnine in se je vezal na kamnino s procesi mineralizacije. Vzroki za nastanek materiala, ki tvori

skorjaste prevleke, so različni. Lahko imajo izvir v kamnini sami ali pa je bil material prinesen od drugod (polutanti). Obloge so lahko slabo ali dobro vezane.

d) otrdevanje površine

Površinsko plast kamnine kompaktirajo sekundarni minerali, ki so se odlagali v njej in imajo izvir v kamnini sami. Plast je bolj gosta in ima večjo trdnost od kamnine v notranjosti, zato odstopi od nespremenjenega dela kamnine.

e) zaraščanje površine kamnine z vegetacijo

Na površini kamnine se lahko naselijo mikroorganizmi in višje vrste rastlin.

- 3. skupina »Odstopanje površine kamnine« se deli na:

a) zrnato razpadanje materiala na površini kamnine

S površine kamnine lahko odpadajo posamezna mineralna zrna, lahko pa tudi večji kosi kamnine. Vzrok je zmanjšanje kohezijskih sil v kamnini. Posamezne oblike propadanja so razpadanje v prah, v zrna ali v zrnate agregate.

b) drobljenje

Površina kamnine se drobi, ker se je zmanjšala kohezijska sila v površinski plasti primarno razpokane kamnine. Zdrobljeni deli kamnine sicer niso mineraloško in kemično spremenjeni.

c) luščenje

Material, ki odpada s površine kamnine, je v obliki tankih kosov kamnine – lusk, pri čemer luska ne sledi teksturi kamnine. Luščenje je lahko neoslojno

ali večslojno. Vzroki za nastanek lusk so različni.

č) napihovanje

Površinska plast se zaradi napihovanja loči od kamnine, kasneje pa lahko v celoti odpade. Vzroki za napihovanje so različni. Ločimo napihovanje, ki je odvisno od teksture kamnine, in napihovanje, ki ne sledi teksturi kamnine.

d) konturno luščenje

To je luščenje površinske plasti kamnine v obliki lusk, ki sledi konturam kamnitega objekta. Lahko se lušči v eni – enoplastno luščenje ali v več plasteh – večplastno luščenje.

e) razslojevanje

Odstopanje površinskega dela kamnine, ki sledi teksturi kamnine.

f) odstopanje skorij

Na kamnini, ki ima skorjo, lahko prihaja do odstopanja le-te. Po navadi prihaja do odstopanja skorij s kamnino. Če je kohezivna sila med skorjo in kamnino večja, kot je kohezivna sila med delci kamnine, pri odstopanju skorje le-ta odstopi tako, da s sabo povleče še stično plast kamnine. Le-ta je zaradi dejavnikov prepelevanja fizikalno, kemično in mineraloško spremenjena v odnosu do matične kamnine. Skorjo pa lahko tvorijo tudi samo sekundarni minerali, nastali kot posledica dejavnikov prepelevanja iz okolja.

- 4. Skupina »Razpoke in deformacije« se delijo na:

a) razpoke

Razpoke so posledica različnih vzro-

kov in lahko sledijo teksturi kamnine ali pa ne. Razpoke so nastale izključno zaradi delovanja zunanje mehanske sile na kamnino. Ob razpoki lahko pride do premika med deloma kamnine na obeh straneh razpoke.

b) zlomi

Po razpoki se oba dela kamnine ločita (kamnina razpade na vsaj dva dela).

c) deformacije

Deformacija je sprememba profila kamnitega objekta. Izražena je predvsem na kamnitih objektih v obliki plošč oz. tam, kjer je močno izražena geometrijska anizotropnost kamnine. Ločimo konveksno in konkavno deformacijo.

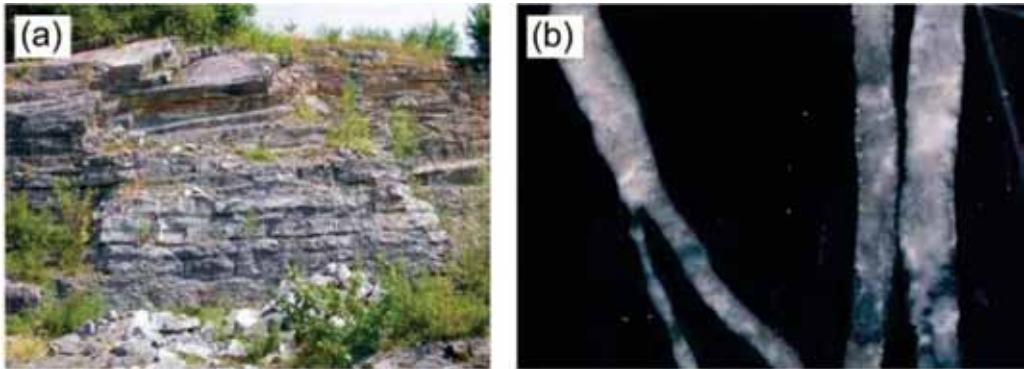
DOKUMENTIRANJE OBLIK PROPADANJA APNENCA DRENOV GRIČ

Osnovne karakteristike in uporaba črnega apnenca Drenov Grič

Črni karnijski (zg. trias) apnenec (GRAD & FERJANČIČ, 1968) velja za enega izmed najlepših slovenskih naravnih kamnov. Zaradi njegove velike gostote in doseganja visoke stopnje politure ga pogosto imenujejo s komercialnim imenom črni marmor. Znani so trije, sedaj opuščeni kamnolomi črnega apnenca iz Drenovega Griča, ki se nahajajo zahodno od Ljubljane: (i) najstarejši kamnolom, opuščen kmalu po 2. svetovni vojni, (ii) Kuclerjev kamnolom in (iii) Mineralov kamnolom (slika 1a). V kamnolomih se menjavajo različno debeli skladi kamnine, od nekaj 10 cm do 80 cm, redko celo

do poldruega metra, z večinoma tankimi polami laporovca (RAMOVŠ, 2000). Apnenec je mikriten z značilnimi belimi žilami (slika 1b), vsebuje bituminozno in organsko snov (RAMOVŠ, 2000; JARC, 2000; KRAMAR, 2010), ki je vzrok za njihovo črno barvo, kar velja tudi za podobne črne apnenice po svetu (WINKLER, 1997; MARINONI in sod. 2007; MARSZALEK, 2007). Med fosili so za apnenec značilne školjke, polži, alge, luknjičarke, ostrakodi in korale (RAMOVŠ, 2000). Apnenec ima zelo majhno poroznost, majhno vpijanje vode in veliko trdnost (KRAMAR, 2010).

Uporaba črnega apnenca z Drenovega Griča naj bi se uveljavila v poznem 17. st., v kiparski modi je ostal tudi v 18. st. Zaradi njegove tipične barve so apnenec veliko uporabljali v baročni arhitekturi ne samo v Ljubljani, temveč tudi v drugih krajih po Sloveniji. Uporabljali so ga ugledni kamnoseški in kiparski mojstri, kot sta Mihael Cussa in Luka Mislej ter vrsta njunih sodobnikov v kamnoseški obrti (RAMOVŠ, 2000). Znani so portali in baročni oltarji, večinoma na območju Ljubljanskega barja in Polhograjskega hribovja. Iz omenjenega apnenca so bili izklesani tudi številni kropilniki ter pohodne plošče (RAMOVŠ, 2000). Široka uporaba črnih apnenecv, predvsem v baročni arhitekturi, je znana tudi iz drugih krajev po Evropi (MARINONI in sod., 2002; ZEHNDER, 2003; ZEHNDER, 2006; MARINONI in sod., 2007; MARSZALEK, 2007).



Slika 1. Črni apnenec Drenov Grič; a) opuščeni Mineralov kamnolom črnega apnenca; b) polirana površina črnega apnenca z belimi žilami (dolžina fotografije 4 cm)



Slika 2. Oltar v kapeli sv. Frančiška Ksaverja, Cerkev Sv. Jakoba, Ljubljana. EŠD 332; a) fotografija oltarja (foto: Valentin Benedik, fotodokumentacija ZVKDS, RC); b) prikaz delov oltarja s črnim apnencem iz Drenovega Griča (izris grafične podloge oltarja: Martin Kavčič, ZVKDS, RC). Sivi deli so apnenec Drenov Grič.

Iz črnega apnenca iz Drenovega Griča je izdelan tudi velik del kamnitega oltarja v kapeli sv. Frančiška Ksaverja v cerkvi Sv. Jakoba v Ljubljani (slika 2), kjer je bila v okviru konservatorsko-restavratorskih del izvedena dokumentacija oblik propadanja. Kamniti oltar je nastal v kamnoseški delavnici Franca Grumnika, kjer so delovali nekateri italijanski kiparji (Matthias Hendrichx, Paolo Gropelli, Jacopo Contieri, Angelo Putti) (DREŠAR in sod., 2005). Na podlagi litološkega kartiranja je bilo ugotovljeno, da oltar sestavljajo številne različne kamnine, izmed katerih prevladujejo sedimentne (apnenci in breče) ter metamorfne (marmor) (KRAMAR, 2006). Poleg kamnin slovenskega izvora so uporabljene tudi take, ki so najverjetneje tujega izvora.

Oblike propadanja črnega apnenca Drenov Grič

Oblike propadanja črnega apnenca z Drenovega Griča so določene na podlagi preiskave *in situ* na oltarju sv. Frančiška Ksaverja v cerkvi Sv. Jakoba. Oblike propadanja so bile dokumentirane po Fitzner-Heinrichsovi klasifikaciji (FITZNER & HEINRICH, 2002). Primeri oblik propadanja so prikazani na slikah 3, 4, 5 in 6. Vse ugotovljene oblike propadanja so prikazane na grafičnih prilogah (priloge 1, 2, 3 in 4), iz katerih je razvidno, da so te značilno razporejene po oltarju. Največji obseg propadanja apnenca je vezan na spodnji del oltarja, med-

tem ko so površine apnenca v zgornjih predelih oltarja manj poškodovane. V spodnjem delu oltarja na propadanje apnenca močno vpliva vlaga v območju kapilarnega dviga, kjer se pojavljajo tudi topne soli. Posebno spodnji deli oltarja so močno poškodovani zaradi kristalizacije topnih soli, medtem ko je v zgornjih predelih prvotna črna barva apnenca obledela.

Po vrsti si na oltarju sledijo naslednje oblike propadanja črnega apnenca:

(1) Najpogostejše oblike propadanja, ki spadajo v skupino *Izgube materiala (priloga 1)* so odpadanje površinskih slojev kamnine, nastanek reliefa (zaobljevanje in dolbenje ter izluževanje komponent kamnine) in odlom. Predvsem v spodnjem delu oltarja se odpadanje površinskih slojev izraža še posebej pogosto v obliki odpadanja lusk ali drobcev kamnine.

Odpadanje površinskih slojev zajema odpadanje materiala vzporedno z izpostavljenostjo površino kamnine zaradi izgube kohezijske sile. Debelina plasti je odvisna od globine, v kateri je kamnina izgubila kohezijsko silo do take stopnje, da je površinska plast kamnine lahko odpadla.

Pri *odpadanju lusk* gre za enovito izgubo materiala v smeri vzporedno z izpostavljenostjo površino kamnine (slika 3a). Ta se na površini lušči in nato sloj

kamnine odpade, pri čemer je luščenje neodvisno od teksture kamnine. Vzroki so po navadi v zmanjšanju kohezijske sile pod slojem zaradi pritiskov, ki so nastali pod površino kamnine zaradi fizikalnega in kemičnega preperevanja kamnine, npr. kristalizacije soli, zaradi termohidričnega pritiska, zmrzali (Kramar, 2010). Pojav je sicer značilen predvsem za zrnate kamnine, kot so sedimentne kamnine, npr. peščenjaki in magmatske kamnine, npr. granodiorit (Fitzner in Heinrichs, 2002).

Pri *odpadanju kosov kamnine* gre za enovito izgubo materiala vzporedno z izpostavljeno površino kamnine (slika 3b). Kamnina se na površini drobi.

Pri *nastanku reliefa* gre za morfološke spremembe površine kamnine zaradi delnega ali izbirnega odpadanja materiala.

Zaobljevanje in dolbenje vključuje nastanek reliefa na izpostavljeni površini, ki je nastal zaradi zaobljevanja robov, kar imenujemo pozitivni relief. Lahko nastane tudi zaradi zarezovanja oz. dolbenja, kar imenujemo negativni relief (slika 3c). Nastajajo naključne mehke konkavne ali konveksne oblike. Na nastanek te oblike propadanja lahko vpliva geografska lega vgrajene kamnine, ki omogoča npr. stalno izpostavljenost vetru, osončenju, padavinam, kar povzroča ponavljajoče se ogrevanje/hlajenje in vlaženje/sušenje. Pojav je nače-

loma značilen za vse kamnine s homogeno teksturo.

Pri *izbirnem (selektivnem) odpadanju* nastaja izluževanje oz. raztapljanje manj obstojnih sestavin (glinene in lapornate leče, limonitne nodule itd.) ali pa izpadajo obstojnejše sestavine (prodniki, delci fosilov itd.) – negativni relief (slika 3č). S časom obstojnejše sestavine (prodniki, delci fosilov, konkrecije) vedno bolj izstopajo iz površine – nastaja pozitiven relief. Vzrok je v različni obstojnosti komponent zaradi razlike v sestavi. Pojav je značilen za kamnine, ki vsebujejo različno obstojne komponente (mineralna zrna ali večji skupki kamnine) in razne manj obstojne vključke (žile, razpoke, prodniki, leče), kot so apnenci in konglomerati.

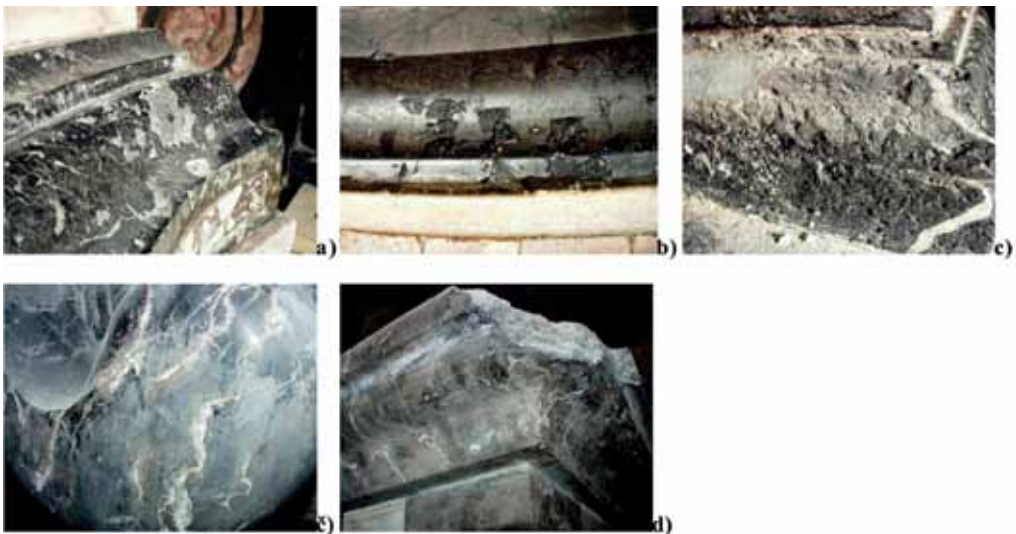
Odlom pomeni odpadanje kompaktnih delov kamnine zaradi delovanja zunanje mehanske sile (slika 3d). Odlom dela kamnine nastane zaradi različnih vzrokov, kot je odlom zaradi antropoloških dejavnikov, odlom zaradi naravnih vzrokov, kot je rast višjih rastlin, potresov, prepleta razpok, ki zmanjšajo trdnost kamnine pod vrednost nosilne trdnosti, naravni pojavi z destruktivnimi posledicami, npr. rast višjih rastlin, potresi. Odlom lahko nastane tudi zaradi konstrukcijskih vzrokov. Le-ti so posledica nepravilnega načina vgrajevanja kamnitega segmenta, zaradi česar nastanejo napetosti, ki povzročijo

odlom kamnine (oksidacija kovinskih vezi v kamnitem objektu) (FITZNER & HEINRICH, 2002). Nemalokrat pa povzročitelja ne moremo ugotoviti. Pojav ni odvisen od vrste kamnine.

elementi spojeni z malto ter ob stiku z zidom. Bele obloge so v večji meri predvsem v pasu na višini okoli 1 m od tal. Sprememba barve črnega apnenca je vidna predvsem v zgornjem delu oltarja.

(2) Sprememba barve, nevezane usedline soli ter obloge so najpogostejše oblike iz skupine *Usedanje materiala in sprememba barve* (priloga 2). Eflorescenca (kristalizacija soli na površini kamnine) in subflorescenca (kristalizacija soli pod površino kamnine) sta pogosti v spodnjem delu oltarja v območju kapilarnega dviga, v območju, kjer so bili kamniti

Sprememba prvotne barve kamnine opisuje spremembe, ki se kažejo z variiranjem enega ali več parametrov, ki definirajo barvo. To so ton, čistost in kromatičnost. Sprememba se lahko pojavi na večjih površinah ali pa lokalno. Sprememba barve obravnavanega apnenca je opazna predvsem v zgornjih delih oltarja.



Slika 3. Oblike propadanja apnenca Drenov Grič iz skupine Izguba materiala: a) odpadnje luske. Kristalizacija soli pod površino (subflorescenca) vodi do luščenja in posledično do izgube materiala zaradi odpadnje luske (dolžina slike 20 cm). b) Izguba materiala zaradi odpadnih drobcov kamnine (dolžina slike 30 cm); c) zaobljevanje/dolbenje (dolžina slike 30 cm); d) izluževanje komponent zaradi izbirnega propadanja (dolžina slike 20 cm); e) odlom (dolžina slike 50 cm).

Razbarvanje (slika 4a) opisuje spremembo barve zaradi kemičnega preperevanja mineralov, ki vsebujejo barvajoče prvine (redukcija železovih in manganovih komponent, oksidacija organske snovi) ali izločanja barvajoče snovi (izluževanje, izpiranje). Razbarvanje se pojavi tudi zaradi nastanka razpok na površini kamnine (izguba kohezije med zrn) oz. zaradi povečanja specifične površine zrn, ki sestavljajo kamnino, kar ima za posledico drugačno sipanje svetlobe (ZEHNDER, 2006). Razbarvanje se pojavi tudi, če se na površini ali po razpokah nalagajo sekundarni brezbarvni minerali. Vzroki za nastanek pojava sta lahko tako kemično kot fizikalno preperevanje kamnin. Pojav razbarvanja nastaja pri preperevanju barvastih kamnin, kjer nastaja redukcija železovih in manganovih spojin, medtem ko je razbarvanje zaradi nastanka razpok in zaradi nalaganja brezbarvnih sekundarnih mineralov na površini kamnine značilno za vse vrste kamnin. Pojav pri obravnavanem apnencu pripisujemo dekoheziji med zrn v površinskih delih apnenca, kar je bilo ugotovljeno z elektronskim mikroskopom (KRAMAR, 2010). Na nekaterih področjih oltarja je sprememba barve vezana na nastanek tanke plasti sadre na površini apnenca (KRAMAR, 2010). MARINONI (2007) navaja, da je dekohezija med zrn in s tem večja poroznost na površini apnenca rezultat termičnega propadanja, ki se nato kaže

v razbarvanju črnega apnenca. Zadnji navedeni mehanizem je predlagal tudi ZEHNDER (2003), medtem ko nekateri drugi raziskovalci razbarvanje črnega apnenca pripisujejo oksidaciji organske snovi, saj naj bi bili ogljikovodiki eden izmed manj stabilnih pigmentov (WINKLER, 1997).

Nevezane usedline soli so slabo vezane usedline zrn (delcev) soli, ki imajo svoj izvir v kamnini. Soli, ki bodo kristalizirale na površini apnenca kot eflorescenca, so odvisne od sestave raztopine soli, lastnosti podlage (površina apnenca) in okoljskih razmer med procesom kristalizacije (BLÄUER-BÖHM in sod., 2001). Pri oltarju je pojav eflorescence vezan na spodnjih 0,5 m višine, kar je razvidno s priloge 2.

Pri *eflorescenci* se na površini kamnine koncentrirajo drobnozrnate (kristalne ali amorfne) snovi, ki so navadno belkaste barve (slika 4b). Pri kristalizaciji soli se sestavine izlužujejo iz kamnine zaradi kemičnega preperevanja kamnine. Pojav je značilen za kamnine, ki vsebujejo minerale, topne v vodni raztopini. Lahko pa soli v kamnino prihajajo tudi iz okolice (tla, omet). Vse kamnine so bolj ali manj porozne, zato je mogoč transport soli po kamnini. Po drugi strani pojav eflorescence omogoča majhna poroznost preiskovanih apnencev, saj le-te po navadi nastajajo na gostih površinah (ARNOLD

& KUENG, 1985). Prisotnost vlaknate oblike topnih soli (angl.: whiskers) na površini preiskovanih apnencev izraža bodisi rahlo vlažno do skoraj suho površino apnencev, zelo omejen vir vode ali pa majhno hitrost evaporacije v primerjavi z nastankom oblog, ki zahtevajo veliko zalogo raztopine (ZEHNDER & ARNOLD, 1989). Eflorescenco na apnencu Drenov Grič sestavljajo sadra in magnezijevi sulfat hidrati (KRAMAR, 2010). Transport soli na površino apnencev poteka v fazi močenja, medtem ko v fazi sušenja soli kristalizirajo na površini. Vsako zmanjšanje relativne vlage v prostoru bo povzročilo, da bodo raztopljene soli potovale proti površini kamnine, kjer površinska voda izhlapeva in tako kompenzira spremembe v relativni vlažnosti okolja (COLSTON in sod., 2001).

Pri *subflorescenci* nastane kristalizacija soli v porah pod površino (slika 4c). Pojav vodi do odstopanja površinskih delov kamnine. Vzrok je kristalizacija topnih soli, ki se izlučujejo iz kamnine zaradi njenega kemičnega preperevanja kamnine. Soli lahko v kamnino prihajajo tudi iz okolice (tla, omet). V odvisnosti od atmosferske vlage se lahko izločajo na površini ali v kamnini. Porazdelitev topnih soli na objektu je odvisna od vrste soli v raztopini in od njihovega izvora (CHAROLA, 2000). Soli se načeloma koncentrirajo na področjih, ki zadržujejo vlago dlje časa. To območje se po navadi nahaja 1–5 cm pod površino

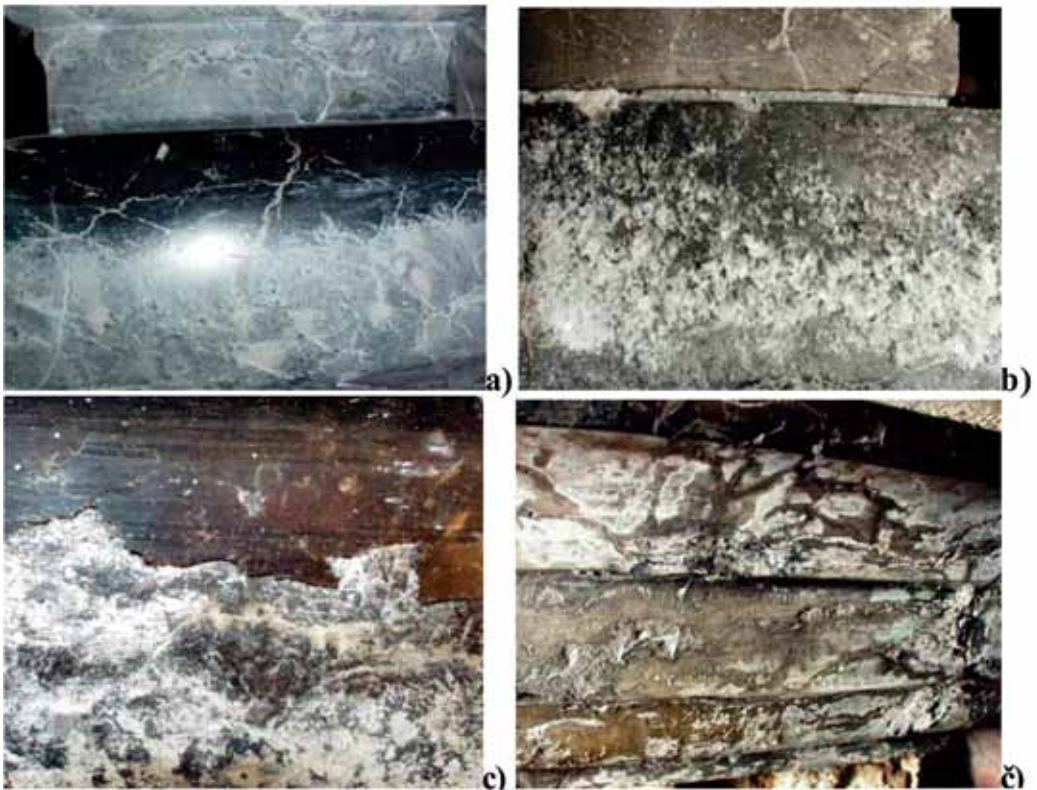
in je odvisno predvsem od poroznosti kamnine (CHAROLA, 2000). Pri apnencu z Drenovega Griča je to območje omejeno le na nekaj zgornjih kvadratnih milimetrov površine, verjetno zaradi njegove majhne poroznosti. Na tem območju nastajajo mehanski pritiski, ki vodijo do nastanka površinskih lusk in s tem razpada apnenca. Zaradi majhne poroznosti apnenca se voda laže zadržuje v kapilarah, saj je gibanje vode oteženo, s površine apnencev pa je omogočena hitrejša evaporacija (AMOROSO & FASSINA, 1983). Kristalizacija soli onemogoči reverzibilno dilatacijo apnenca, kar se pri preiskovanih apnencih izraža v obliki luščenja in drobljenja. Kristalizacija sadre (KRAMAR, 2010) pod površino (subflorescenco) vodi do razpada apnenca, kar se izraža v obliki luščenja in drobljenja ter s tem izgube materiala. Ko kristali sadre presežejo velikost pore, nastanejo pritiski, ki so lahko večji od natezne trdnosti preiskovanih apnencev. Mehanizmi propadanja zaradi kristalizacije soli temeljijo namreč na nastanku pritiskov na pore kamnine, ko sol kristalí pri ponavljajočih se cikličnih kristalizacije/raztapljanja soli. Kristali sadre dokazujejo, da je hitrost evaporacije večja od dovajanja vode v območju oltarja, kjer nastaja intenzivno luščenje. Medtem ko so v spodnjem delu soli na površini kamnine, se v zgornjem delu nahajajo pod površino. Iz tega sklepamo, da se razmerje evaporacija/transfer vode spreminja v odvisnosti od višine. Sadra zunaj dosega kapilarnega dviga

nakazuje na možnost transferja raztopine tudi z drugimi mehanizmi, kot je npr. kondenzacija. Pri relativni vlažnosti nad 75 % je namreč omogočena površinska penetracija s kapilarno sukcijo in kristalizacijo sadre v porah in razpokah pod površino kamnine (CHABAS & JEANETTE, 2001). Ko petrofizikalne lastnosti kamnine omogočajo hiter in dolg transfer vode, po drugi strani pa poroznost kamnine kot druga petrofizikalna lastnost kamnine omogoča, da je dotok vode enak količini vode, ki je odparela, soli kristalijo na površini. Eflorescenca v tem primeru ne povzroča dekohezije kamnine na površini objekta. Po drugi strani v primerih, ko odpari večja količina vode, kot je s kapilarnim dvigom migrira v površinsko plast kamnine, soli precipitirajo v kamnini pod površino, kar vodi do izgube materiala na površini (LEWIN, 1982; CHABAS & JEANETTE 2001). Zniževanje relativne vlažnosti močno vpliva na propadanje, kombinacija nizke relativne vlažnosti in daljšega sušnega obdobja pa povzroča nastanek večjih poškodb (COLSTON in sod., 2001). Pri spremljanju nihanja temperature (T) in relativne vlažnosti (RH) v kapeli ugotavljamo, da v obdobju enega leta RH variira od 40 % do 100 %, medtem ko se T giblje v območju od $-0,6$ °C do $28,1$ °C (KOLENC, 2006).

Obloge so kompaktna usedlina, močno vezane na površino kamnine, imajo lahko svoj izvir v kamnini ali prihajajo kot polutanti iz okolja. Obloge se pojavlja-

jo v pasu oltarja okoli 1,5 m nad tlemi (priloga 2).

Obloga, ki sledi površini kamnine, je kompaktna usedlina (slika 4č). Lahko je različnih barv, npr. črna, siva, bela ali rjava. Kompaktiranje usedline so omogočile soli, ki so se izluževale iz kamnine ali so se obarjale iz vode, ki je prinašala raztopljene soli iz zunanjega okolja – kemično preperevanje. Večinoma nastanejo zaradi procesov precipitacije brezbarvnih sekundarnih mineralov kalcita ali kremenice in drugih soli. Vzroki so polutanti iz atmosfere, interakcija polutantov s kamnino, izluževanje soli (npr. sadre) iz kamnine, obarjanje kalcita iz vode pri vodnjakih, ki vsebuje raztopljene minerale. Pojav načeloma ni odvisen od vrste kamnine, čeprav ga lahko favorizirajo kamnine, ki vsebujejo v vodi topne minerale. Lahko so v stiku z vodo, ki vsebuje raztopljene brezbarvne soli, oz. so v stiku z vodo, ki vsebuje raztopljene barvaste soli. Bele obloge na črnem apnencu, ki jih tvori sadra, se pojavljajo v pasu v spodnjem delu oltarja. Ker obloge nastajajo na mestih, kjer je substrat vlažen ali moker (ARNOLD & ZEHNDER, 1985), nakazujejo območja na oltarju, v katerih se v kamnini zadržuje več vode. Nekatere obloge sestavlja več vzporednih plasti sadre, ki izražajo ritmično kristalizacijo sadre iz raztopine zaradi ponavljajočih se ugodnih razmer za kristalizacijo (nasičenje, temperatura).



Slika 4. Oblike propadanja apnenca Drenov Grič iz skupine Usedanje materiala in sprememba barve: a) Razbarvanje – sprememba prvotne črne barve v siv odtenek (dolžina slike 30 cm); b) eflorescenca-kristalizacija soli na površini (dolžina slike 30 cm); c) subflorescenca-kristalizacija soli pod površino, ki vodi do luščenja apnenca (dolžina slike 10 cm); d) bela obloga na površini apnenca (dolžina slike 20 cm)

(3) Drobljenje, luščenje in cepljenje so najpogostejše oblike propadanja v skupini *Odstopanje materiala*. V odvisnosti od orientacije plastnatosti apnenca, vgrajenega v spomenik, je odstopanje bodisi izraženo kot cepljenje (ni vzporedno izpostavljeni površini) ali kot luščenje (vzporedno površini apnenca). Luščenje je stopnja propadanja apnenca pred odpadanjem materiala, še prej pa se poja-

vijo razpoke, ki so posledica ekspanzije zaradi kristalizacije soli pod površino. Odpadanje materiala je zadnja faza propadanja, ki sledi po luščenju kamnine. Najbolj intenzivno luščenje se pojavlja okoli 0,5 m od tal, čeprav je v manjši meri po vsem oltarju. V tem območju oltarja so po površini apnenca razpoke, ki so posledica kristalizacije soli pod površino preiskovanega apnenca.

Drobljenje zajema odstopanje večjih kosov kamnine nepravilnih oblik, ki mu kasneje sledi odpadanje.

Drobljenju so izpostavljene kamnine z izrazito nehomogeno sestavo. Odpadli kosi, ki jih sestavlja nespremenjen material, so trdi in nepravilnih oblik. Degradacija se kaže z delnim ali popolnim odstopanjem. Vzroki so v fizikalnem preperevanju kamnin z nehomogeno strukturo. Največkrat nastane razpad zaradi zmrzovanja vzdolž manj odpornih plasti in v območju kapilarnih por. Pojav je značilen za zrnate kamnine karbo-natnega in silikatnega izvora. Drobljenje in posledično izguba materiala je pri apnencu Drenov Grič vezana na žile, ki so zapolnjene s filosilikati. Minerali glin lahko nabrekajo, kar lahko vodi do nepovratnega razpada kamnine. Soli se nahajajo na območjih, ki zadržujejo vlagu dlje, tako lahko ti minerali glin povzročijo razpad kamnine tudi zaradi kristalizacije soli. Izmenično nabrekanje in krčenje glin lahko prav tako prispevata k drobljenju apnencev (RODRÍGUEZ-NAVARRO in sod., 1998). Transport vode je zaradi majhne poroznosti apnencev zmanjšan, kar ima za posledico večjo hitrost evaporacije s površine kamnine v primerjavi s hitrostjo kapilarnega dviga. Takšno območje je zato mehansko obremenjeno in vodi do razpada apnencev. Kristalizacijski pritiski topnih soli so mnogo večji od natezne trdnosti preiskovanih apnencev.

Luščenje zajema odstopanje majhnih, tankih kosov kamnine (lusk) neodvisno od njene teksture. Luščenje se pojavlja v pasu okoli 0,5 m nad tlemi, v manjši meri tudi mestoma po celotni površini oltarja.

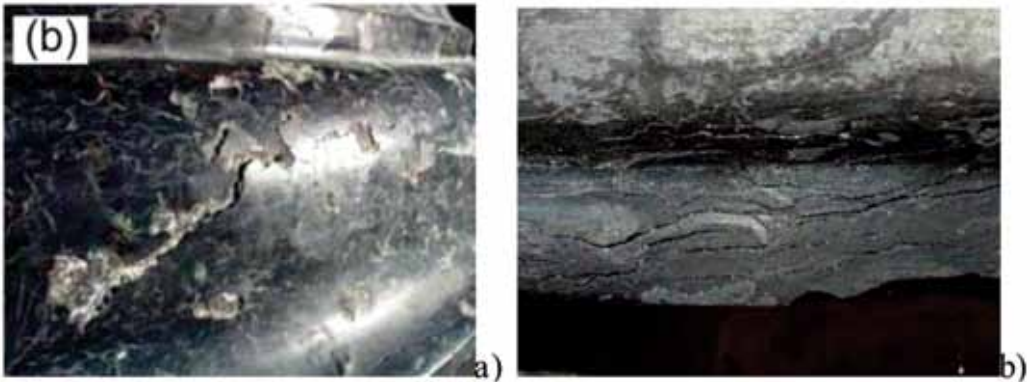
Posamezne luske – *enoplastno luščenje* pomeni odstopanje ene plasti v obliki posameznih lusk, ki se kasneje odluščijo od nespremenjene kamnine. Vzroki so v fizikalnem ali kemičnem preperevanju kamnine, ki povzroči, da popusti kohezijska sila tanke površinske plasti kamnine. Pojav je sicer značilen za drobnozrnate goste kamnine.

Cepljenje (lamelarno odstopanje) opisuje odstopanje slojev kamnine, ki ni vzporedno s površino kamnine (slika 5b). Odstopanju kasneje sledi odpadanje slojev kamnine. Vzroki so v fizikalnem preperevanju kamnine, zaradi česar odstopajo sloji kamnine po ravninah foliacije, plastnatosti, laminarnosti. Značilno je za plastnate in laminirane kamnine ter kamnine z izraženo foliacijo, npr. peščenjake.

(4) Oblike propadanja četrte skupine, to so *razpoke in deformacije*, so zastopane z zlomi, ki so na nekaterih kamnitih elementih, ki delijo kamnit element na dva dela (mehanska poškodba).

Zlomi nastajajo v primeru, ko zaradi razpok nastane delitve kamnine na dva ali več delov. Vzroki za nastanek zlo-

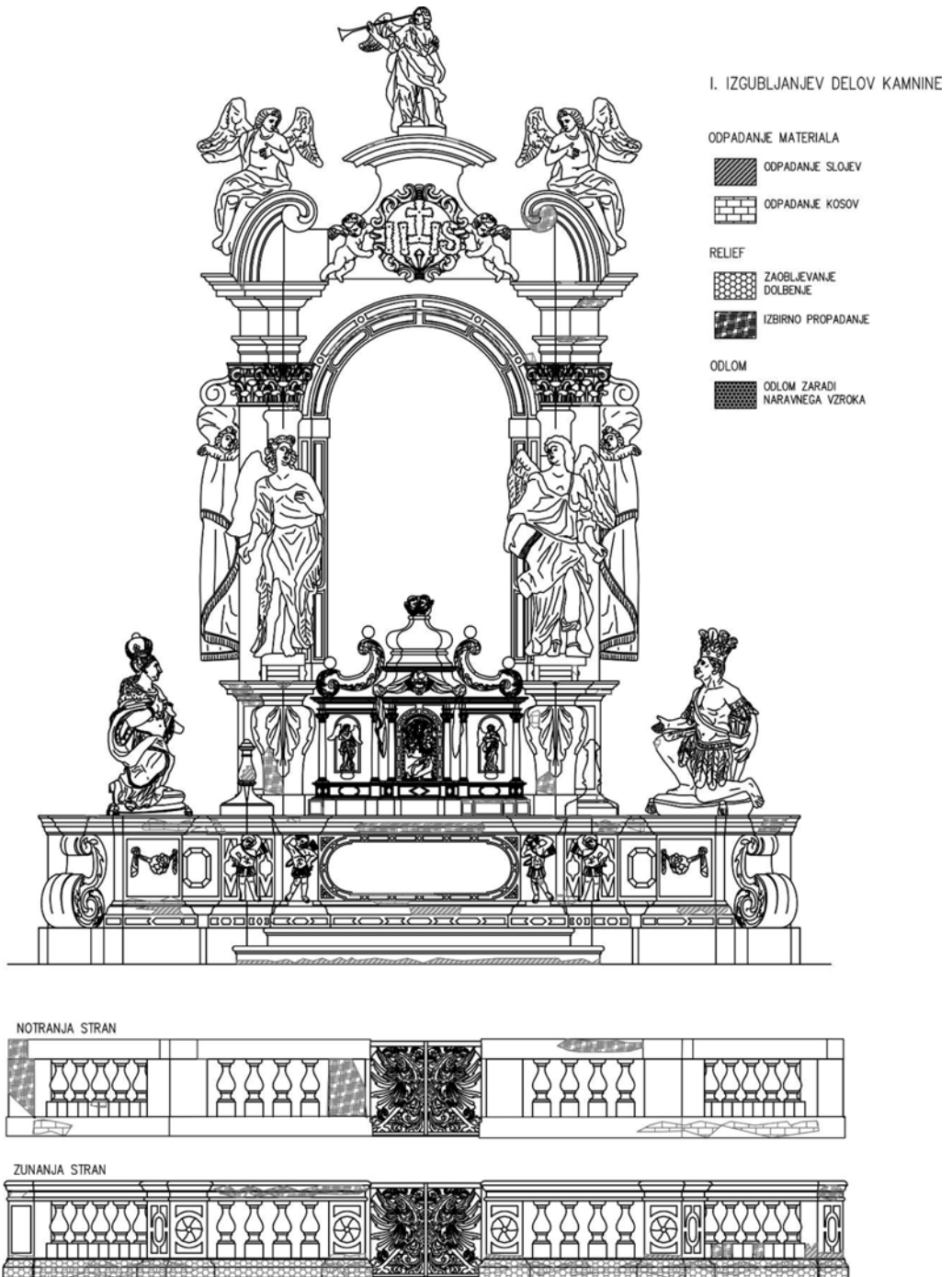
mov so fizikalne narave, ko je mehanska sila, ki deluje na kamnino, večja od kohezijske sile kamnine. Razpoka je tako velika, da kamnina razpade na več ločenih delov. Pojav ni odvisen od vrste kamnine.



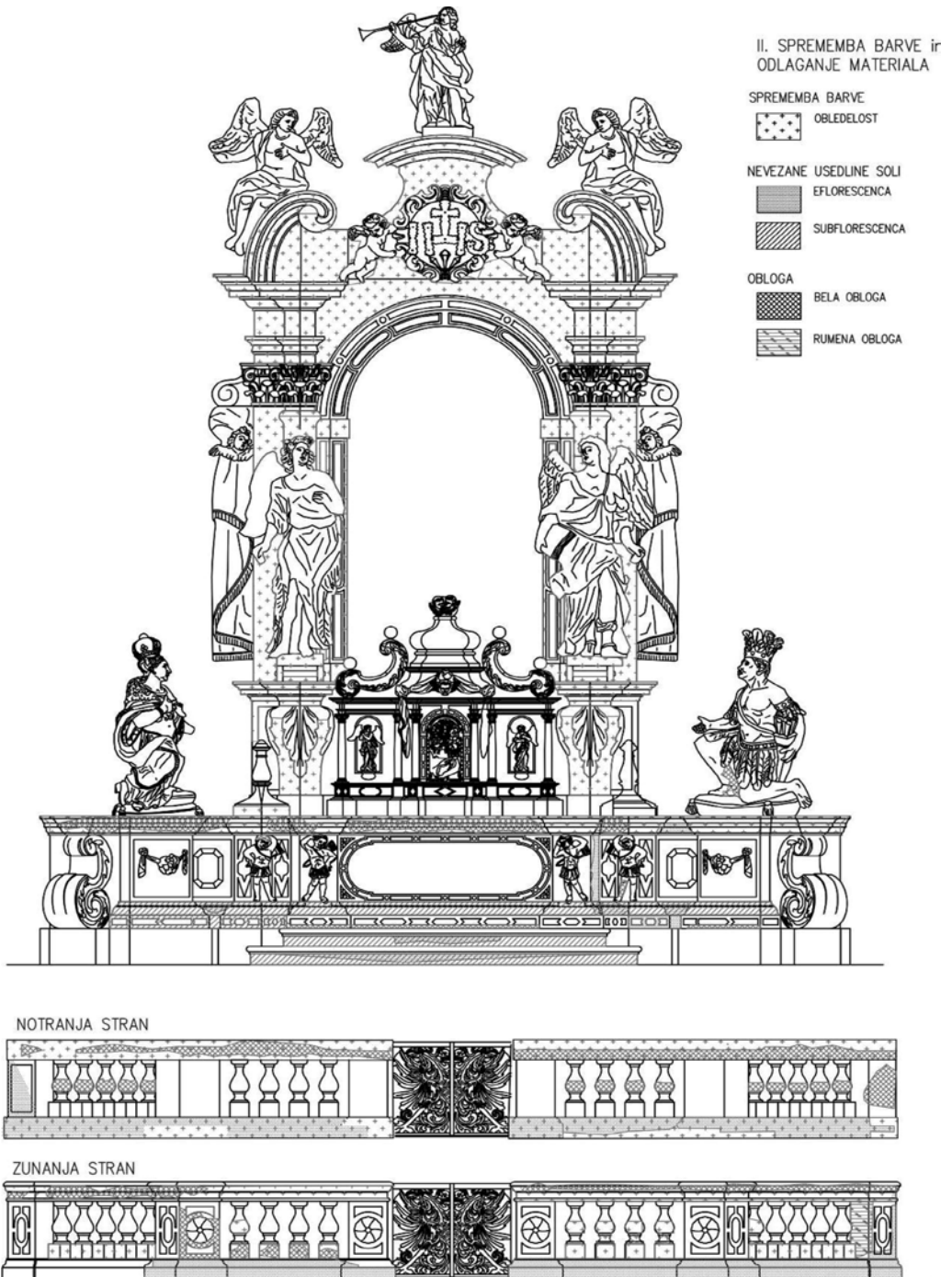
Slika 5. Oblike propadanja apnenca Drenov Grič iz skupine Odstopanje materiala: a) luščenje apnenca (dolžina slike 10 cm); b) cepljenje apnenca (dolžina slike 5 cm)



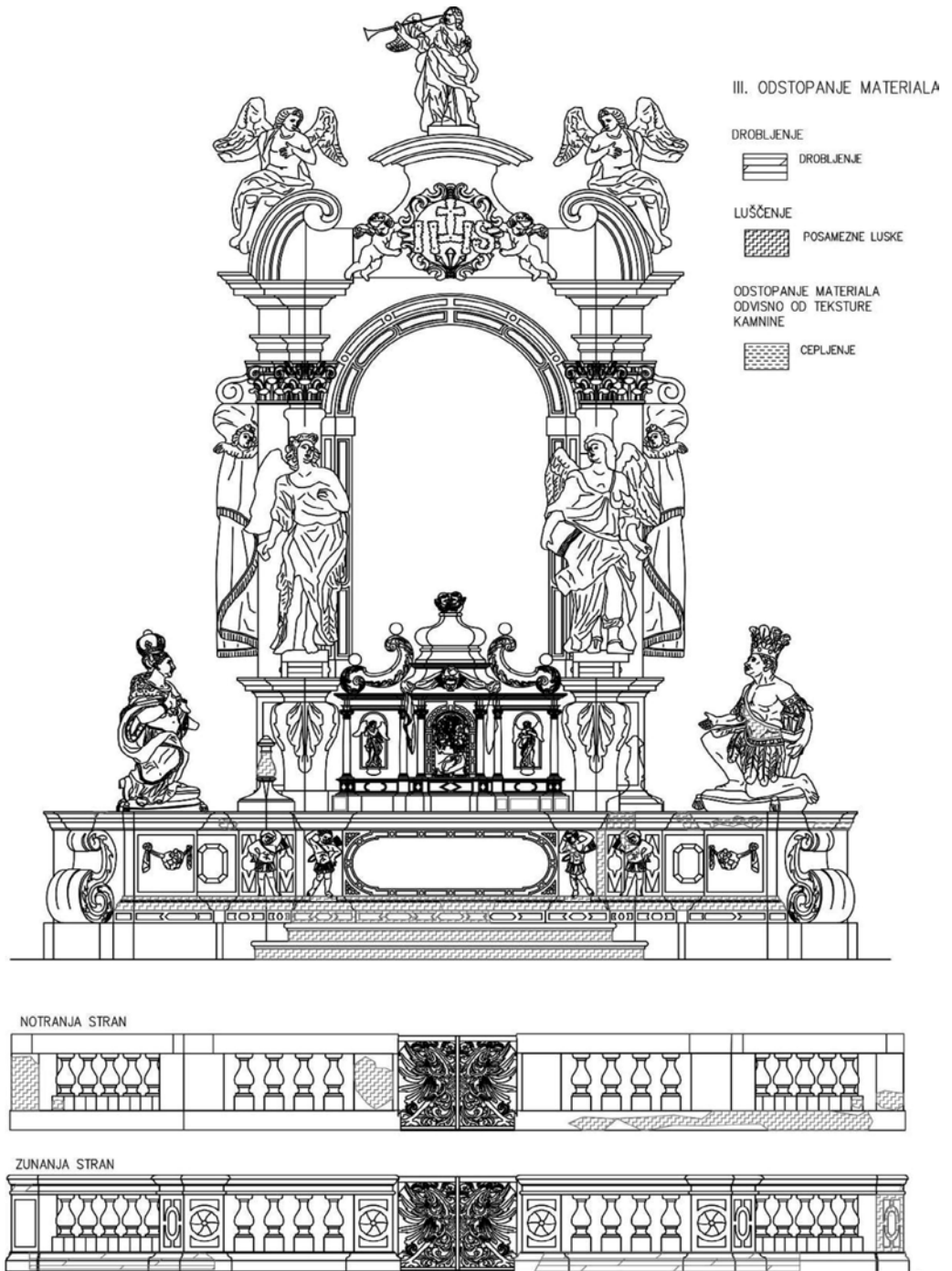
Slika 6. Oblike propadanja apnenca Drenov Grič iz skupine Razpoke in deformacije: a) razpoke, neodvisne od teksture kamnine (dolžina slike 100 cm)



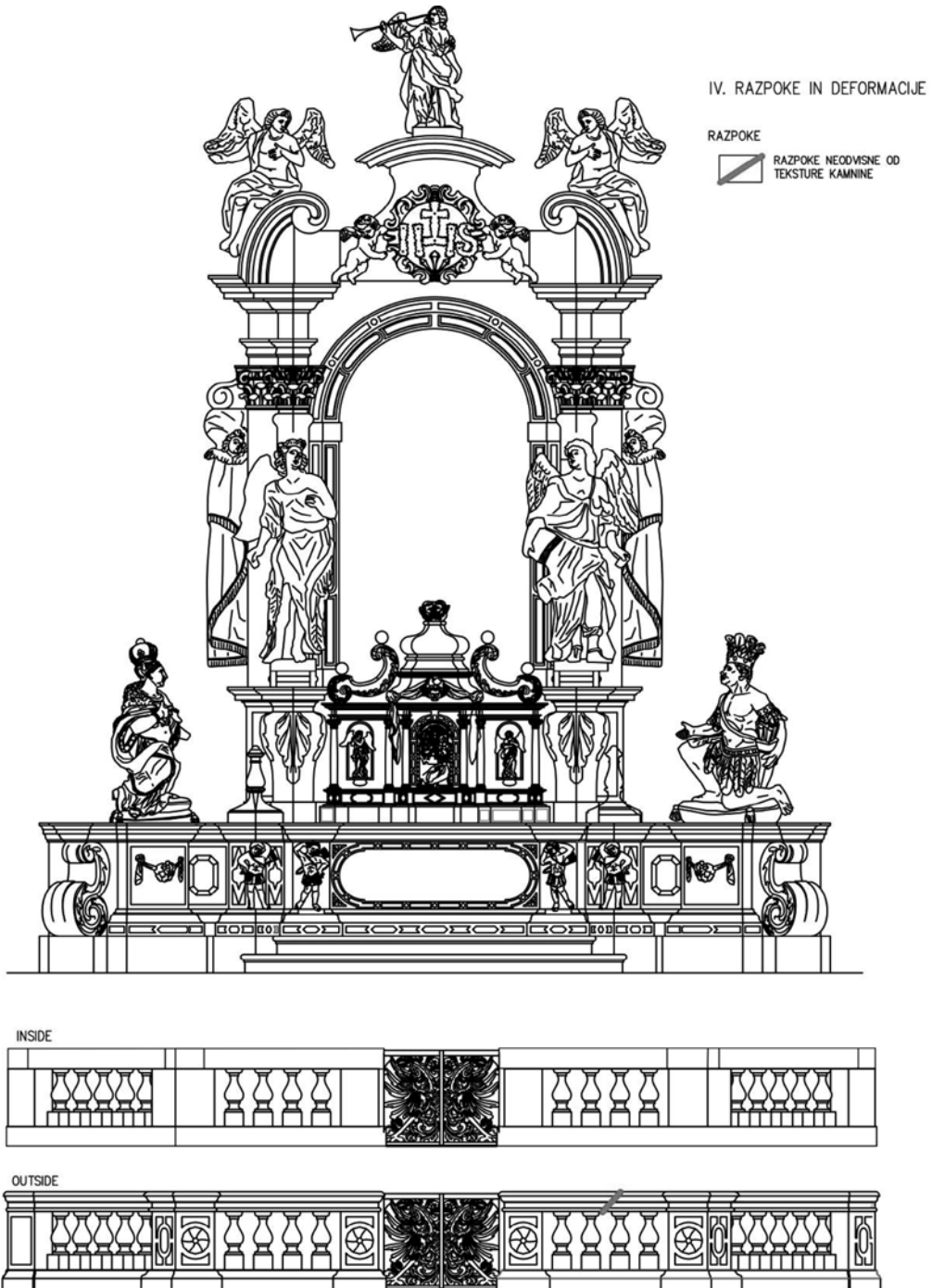
Priloga 1. Karta oblik propadanja v skupini Izguba materiala



Priloga 2. Karta oblik propadanja v skupini Sprememba barve in odlaganje materiala



Priloga 3. Karta oblik propadanja skupine Odstopanje materiala



Priloga 4. Razpoke in deformacije

SKLEPI

Izčrpne raziskave o vzrokih in mehanizmih propadanja naravnega kamna so ključnega pomena na področju ohranjanja objektov kulturne dediščine. Dokumentiranje makroskopskih sprememb oziroma karakterizacija, kvantifikacija in interpretacija oblik propadanja naravnega kamna na določenem objektu je eden osnovnih korakov pred restavratorsko-konservatorskim posegom. V prispevku je podan pregled skupin in glavnih oblik propadanja naravnega kamna, ki je prirejen po nemški klasifikacijski shemi, na podlagi katere klasificiramo posamezne oblike propadanja. Prikaz določanja oblik propadanja naravnega kamna na objektih kulturne dediščine in grafična predstavitev le-teh sta podana na primeru črnega apnenca Drenov Grič.

Kot je razvidno z grafičnih prilog, so oblike propadanja značilno razporejene po oltarju. Največji obseg propadanja apnenca je vezan na spodnji del oltarja, medtem ko so površine apnenca v zgornjih predelih oltarja manj poškodovane. Prepoznanih je bilo veliko različnih oblik propadanja v skupini izgube materiala, razbarvanja/odlaganja, odstopanja materiala ter razpok/deformacij.

Glavni dejavnik propadanja je kristalizacija topnih soli, ki ima za posledico številne različne oblike propadanja

apnenca. Zaradi različnih okoljskih dejavnikov se soli pojavljajo v več oblikah, in sicer kot eflorescenca, subflorescenca ali kompaktna obloga. Glavni vzrok propadanja je lahko kapilarni dvig in posledično kristalizacija topnih soli. Največja poškodovanost kamnine je bila identificirana prav v območju kapilarnega dviga. Rastopine soli potujejo skozi kamnino s kapilarnim dvigom, nato pa ob evaporaciji kristalizirajo bodisi na površini ali pod površino apnencev. Obloge so vezane na vlažnejše predele oltarja.

Zahvale

Raziskavo je finančno omogočil ARRS; številka pogodbe 3211-05-000545. Avtorici se zahvaljujeta g. Jožetu Drešarju, ki je omogočil preiskave oblik propadanja na oltarju v kapeli Sv. Frančiška Ksaverja, kjer pod njegovim vodstvom potekajo konservatorsko-restavratorska dela.

VIRI

- AMOROSO, G. G. & FASSINA, V. (1983): Stone decay and conservation, Amsterdam. *Elsevier Science Publisher*, 453 str.
- ARNOLD, A. & KUENG, A. (1985): Crystallization and habits of salt efflorescences on walls, I., *Methods of investigation and habits*. V

- Proceedings of 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Editor G. Felix. Laussane: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, str. 255–267.
- ARNOLD, A. & ZEHNDER, K. (1988): Decay of stony materials by salts in humid atmosphere. V Proceeding of 6th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. Editor J. Ciabach. Torun: Nicolas Copernicus University Press Department, str. 138–148.
- BILBIJA, N. & GRIMŠIČAR, A. (1987): Obstočnost arhitektonskega naravnega kamna iz Slovenije. *Geološki zbornik*; št. 8, str. 151–160
- BLÄUER-BÖHM, C., KÜNG, A. & ZEHNDER, K. (2001): Salt Crystal Intergrowth in Efflorescence on Historic Buildings. *Chimia*, Vol. 55, str. 996–1001.
- CHABAS, A. & JEANETTE, D. (2001): Weathering of marbles and granites in marine environment: petrophysical properties and special role of atmospheric salts. *Environmental Geology*; Vol. 40, str. 359–368.
- CHAROLA, E. A. (2000): Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the Institute of American Conservators*; Vol. 39, str. 327–343.
- COLSTON, B. J., WATT, D. S. & MUNRO, H. L. (2001): Environmentally-induced stone decay: the cumulative effects of crystallization-hydration cycles on a Lincolnshire oopelsparite limestone. *Journal of Cultural Heritage*; Vol. 4, str. 297–307.
- DREŠAR, J., KLAJDER, M., HIRCI, B. (2005): Restavratski projekt za obnovo kapele Sv. Frančiška Ksaverja, Ljubljana, Cerkev Sv. Jakoba. Ljubljana: Restavratski center, 12. str.
- FITZNER, B. & HEINRICHS, K. (2002): Damage diagnosis on stone monuments - weathering forms, damage categories and damage indices. V Understanding and managing stone decay, Proceeding of the International Conference “Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET 2001)”. Editors R. Prikfyl in H. A. Viles. Charles University in Prague: The Karolinum Press, 2002, str. 11–56.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K. & LA BOUCHARDIERE, D. (2002): Limestone weathering of historical monuments in Cairo, Egypt. V Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies. Editors S. Siegesmund, T. Weiss, in A. Vollbrecht. *Geological Society*; Special Publication, Vol. 205, str. 217–239.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K. & LA BOUCHARDIERE, D. (2003): Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor-Egypt. Building and Environment, Vol. 38, str. 1089–1103.
- FITZNER, B. & HEINRICHS, K. (2004): Photo atlas of weathering forms on stone monuments. <http://www.stone.rwth-aachen.de>
- FITZNER, B. (2004): Documentation and evaluation of stone damage on monuments. V Proceedings of the 10th International congress on

- deterioration and conservation of stone. Editors D. Kwiatkowski in R. Löfvendahl. Stockholm: ICOS; str. 677–690.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K. & LA BOUCHARDIERE, D. (2004): The Bangudae Petroglyph in Ulsan, Korea: studies on weathering damage and risk prognosis. *Environmental Geology*; Vol. 46, str. 504–526.
- GRAD, K. & FERJANČIČ, L. (1968): Osnovna geološka karta. Tolmač za list Kranj. L33–65. Socialistična Federativna Republika Jugoslavija. Geološki zavod Ljubljana.
- JARC, S. (2000): Vrednotenje kemične in mineralne sestave apnencev kot naravnega kamna: magistrsko delo. Ljubljana, 88 str.
- KOLENC, I. (2006): Sv. Jakob, Prikaz meritev temperature in vlage. Ljubljana: *Restavratorski center*.
- KRAMAR, S. (2006): „Cerkev Sv. Jakoba“ Kapela Sv. Frančiška Ksaverja: mnenje o vrsti in izvoru kamnin. Ljubljana: ZVKDS, *Restavratorski center*, 12 str.
- KRAMAR, S. (2010): Vrednotenje apnencev z vidika vpliva okoljskih dejavnikov na njihovo propadanje: doktorska disertacija. Ljubljana, 119 str.
- LEWIN SZ. (1982): The Mechanism of Masonry Decay through Crystallization. V Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments. Editro N. S. Baer. Washington DC: National Academic Press, str. 120–144.
- MARINONI, N., PAVESE, A., BUGINI, R. & DI SILVESTRO, G. (2002): Black limestone used in Lombard architecture. *Journal of Cultural Heritage*; Vol. 3, str. 241–249.
- MARINONI, N., PAVESE, A., RIVA, A., CELLA, F. & CERULLI, T. (2007): Chromatic weathering of black limestone quarried in Varenna (Lake Como, Italy). *Building and Environment*, Vol. 42, str. 68–77.
- MARSZALEK, M. (2007): The mineralogical and chemical methods in investigations of decay of the Devonian Black »marble« from Dębnik (Southern Poland). V Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation. Editors R. Přikryl in B. J. Smith. London: Geological Society, Special Publications 2007, Vol. 271, str. 109–115.
- RAMOVŠ, A. (2000): Podpeški in črni ter pisani lesnobrdski apnenec skozi čas. *Mineral*; 115 str.
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, C., SEBASTIAN, E., DOEHNE, E. & GINELL, W. S. (1998): The role of sepiolite-palygorskite in the decay of ancient Egyptian limestone sculptures. *Clays and Clay Minerals*; Vol. 46, str. 414–422.
- ROTHERT, E., EGGEERS, T., CASSAR, J., RUEDRICH, J., FITZNER, B. & SIEGSMUND, S. (2007): Stone properties and weathering induced by salt crystallization of Maltese Globigerina Limestone. V Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation. Editors R. Přikryl in B. J. Smith. London: Geological Society. Special Publications; Vol. 271, str. 189–198.
- ZEHNDER, K. & ARNOLD, A. (1989): Crystal growth in salt efflorescence. *Jour-*

- nal of Crystal Growth*; Vol. 8, str. 513–521.
- ZEHNDER, K. (2003): Grey veils on black polished limestones-nature and conservation concepts, V EURO-MAT, Symposium P2 – Materials and Conservation of Cultural Heritage. Lausanne: EPFL.
- ZEHNDER, K. (2006): Greying of black polished limestone – a case study to clarify the phenomenon. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, Vol. 2, str. 361–367.
- WINKLER, E. M. (1997): *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Berlin: *Springer*; 313 str.
- UNI 11182:2006, Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni, Sostituisce NORMAL 1/88, 1988.
- Illustrated glossary on stone deterioration patterns, ICOMOS-ISC: 2008.