

Vrednotenje vunduškega peščenjaka z vidika možnosti uporabe v restavratorske namene

¹VANJA KASTELIC, ²SABINA KRAMAR

¹ Oddelek za geologijo; Aškerčeva 12,1000 Ljubljana; vanja.kastelic@ntfgeo.uni-lj.si

² Oddelek za geologijo; Aškerčeva 12,1000 Ljubljana; bintza@email.si

Received: May 27, 2005 Accepted: September 15, 2005

Izveček: Pri restavratorskih posegih se v primerih, ko je stopnja propadanja naravnega kamna na določenih objektih tolikšna, ko niti čiščenje niti konsolidacija ne zadoščata več, pojavi potreba po zamenjavi, oziroma nadomestitvi poškodovane kamnine deloma ali v celoti. V tem prispevku obravnavava Vunduški peščenjak ter območje, ki predstavlja potencialno nahajališče tega peščenjaka, ki bi ga začeli izkoriščati s ponovnim odprtjem opuščenih kamnolomov te kamnine. Osredotočili sva se predvsem na ugotavljanje zalog peščenjaka, vrednotenje kamnoloma glede na možnosti pridobivanja blokov ter na petrografsko in strukturno vrednotenje peščenjaka z ozirom na obstojnost kamnine in ustrezno izbiro konservatorskega sredstva. Glavni petrografski in strukturni faktorji, ki vplivajo na obstojnost in oblike propadanja peščenjaka so vsebnost pirita, kremena, kalcita, biotita in glincev ter narava poroznosti in prisotnost ploskev diskontinuitet, ob katerih bo kamnina hitreje propadala.

Abstract: When working on a reconstruction of an object built out of a natural stone, the need for partial or complete replacement of the original stone becomes necessary, when other methods, like cleaning or consolidating techniques can not replace the damage or improve its state. This article presents the Vunduški sandstone and the area of its natural location that can be thought of as a possible extraction site, utilizing the abandoned quarries. Our attention was mostly put on identifying the petrographical and structural conditions of the sandstone in the largest of the abandoned quarry (Občinski quarry) with respect to its mechanical properties and a choice of a suitable conservation method. Further aim of our research was also the identification and assessment of resources of the Vunduški sandstone. The main petrographical and structural factors which affect the durability and weathering behaviour of the Vunduški sandstone are the presence of pyrite, quartz, calcite, biotite and feldspar grains, the nature of porosity and existence of predefined discontinuity planes along which the rock will eventually fail.

Ključne besede: peščenjak, restavriranje, Občinski kamnolom, obstojnost, propadanje, pirit, Silifikacija.

Keywords: historical building stones, sandstone, quarry, provenance, petrography, alteration, durability, pyrite, silicification .

Uvod

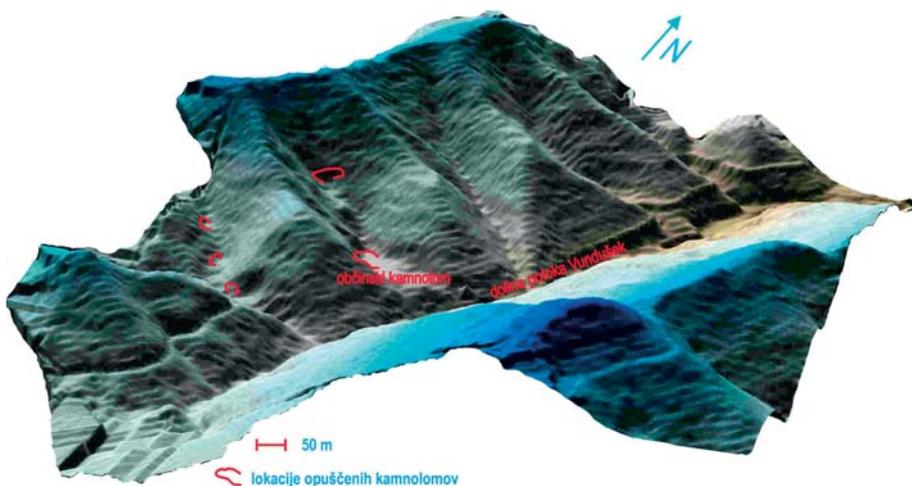
Na področju konservatorstva in restavratorstva spomenikov iz naravnega kamna se

pojavi potrebe po geološkem znanju, ki pripomore k razumevanju vzrokov propa-

danja naravnega kamna in ponudi rešitve za njegovo zaščito. Pri tem je pomembno predvsem petrografsko in strukturno vrednotenje kamnine, na podlagi katerega lahko določimo izvorno področje originalne kamnine in poiščemo ustrezno nahajališče kamnine, ugotovimo vzroke propadanja in izberemo primeren restavratorski poseg.

Na določenih objektih je stopnja propadanja naravnega kamna tolikšna, da je potrebna nadomestitev poškodovane kamnine deloma ali v celoti. Nova kamnina naj bi izvirala iz istega kamnoloma ali vsaj iz iste geološke formacije kot predhodna kamnina. Kadar to ni možno, se uporabi kamnino, ki je po svojih karakteristikah najbližje originalni kamnini. V tem prispevku obravnavava vunduški peščenjak (ANIČIĆ & RAMOVŠ, 1998) ter območje, ki predstavlja potencialno nahajališče tega peščenjaka, ki bi ga začeli izkoriščati s ponovnim odprtjem opuščenih kamnolomov te kamnine. V okolici Haloz so vunduški peščenjak v preteklosti veliko

uporabljali pri gradnji raznih objektov (ANIČIĆ & RAMOVŠ, 1998), ki so sedaj zaradi močne stopnje propadanja potrebni obnove. Za potrebe najti čimbolj primerno nahajališče izvorne kamnine so bile izvedene terenske raziskave, usmerjene v kartiranje območja opuščenih kamnolomov ter detaljnemu popisu litoloških členov in njihove lege v največjem, t.j. občinskem kamnolomu. Osredotočili sva se predvsem na ugotavljanje zalog peščenjaka, vrednotenje kamnoloma glede na možnosti pridobivanja blokov ter na petrografsko vrednotenje peščenjaka z ozirom na obstojnost kamnine in ustrezno izbiro konservatorskega sredstva. Vzroki preperevanja, obstojnost ter uporabna vrednost kamnine so bili torej ocenjeni na podlagi terenskih raziskav, s pomočjo petrografskih in mehansko-fizikalnih preiskav ter s opazovanjem načinov propadanja vgrajene kamnine. S tem je bila podana ocena možnosti uporabe vunduškega peščenjaka v restavratorske namene.



Slika 1. Digitalni model okolice opuščenih kamnolomov.

Figure 1. Digital relief model of the broader area of abandoned sandstone quarries.

REZULTATI IN RAZPRAVA

Splošen pregled

Ozemlje nahajališč vunduškega peščenjaka pripada Južnim Karavankam, ki se preko Boča nadaljujejo v Haloško antiklinalo. Geološka podlaga Haloz je sestavljena iz terciarnih kamnin večinoma otnangijske in karpatijske starosti. V spodnjem delu litološkega stolpca prevladujejo laporovci, peščeni laporovci in glinavci (ANIČIĆ & RAMOVŠ, 1998). Višje se ponekod menjavata peščenjak in laporovec. V severnem delu Haloz se v zgornjih delih sedimentne sekvence se pojavljajo konglomerati in peščenjaki. Med plastmi peščenjakov se pojavljajo tudi tanke pole laporovca, glinenega laporovca ali glinavca (ANIČIĆ & JURIŠA, 1985).

Peščenjak so v preteklosti pridobivali v devetih večjih in manjših kamnolomih, ki se v glavnem nahajajo na levem pobočju doline vunduškega potoka v zahodnem delu Haloz (slika 1). Nekaterim izmed opuščenih kamnolomov se pripisuje kulturno pričevalni pomen, saj so v njih vidni sledovi ročnega in novejšega strojnega pridobivanja. Največji opuščen kamnolom v dolini potoka Vundušek je Občinski kamnolom, katerega del je zaradi značilnih sedimentnih tekstur predlagan za geološko naravno dediščino lokalnega pomena (PLANJŠEK ET AL., 2002).

Na širšem območju lokacij opuščenih kamnolomov izdanja drobno do srednjezrnat plastnat kremenovo sljudnat peščenjak in drobnozrnat kremenovo karbonatno sljudnat konglomerat z vmesnimi plastmi sljudnatega muljevca. Kamnine so spodnjemiocenske starosti, nastajale so v priobalnem okolju

takratne Centralne Paratetide. V njih so prisotne razne sedimentne teksture, kot so erozijski kanali, tokovni odlitki, postopna zrnavost, horizontalna laminacija, deformacijske teksture in bioturbacija. Plasti vpadajo generalno 25° proti severozahodu in so v normalni legi. Debelina plasti je različna in znaša od nekaj cm do več kot 2 m. V spodnjem in vrhnjem delu kamnoloma so plasti tankoplastnate, v srednjem delu pa se pojavi pas debeloplastnatih različkov kamnin v skupni debelini več kot 30 m.

Produktivne plasti v kamnolomih predstavljajo debeloplastnati različki kamnin. Sestavljajo jih sekvence drobno do debelo-zrnatega peščenjaka in drobnozrnatega konglomerata s postopno zrnavostjo. V peščenjakih se kot leče, pole, lamine in plasti pojavljajo sljudnati muljevci.

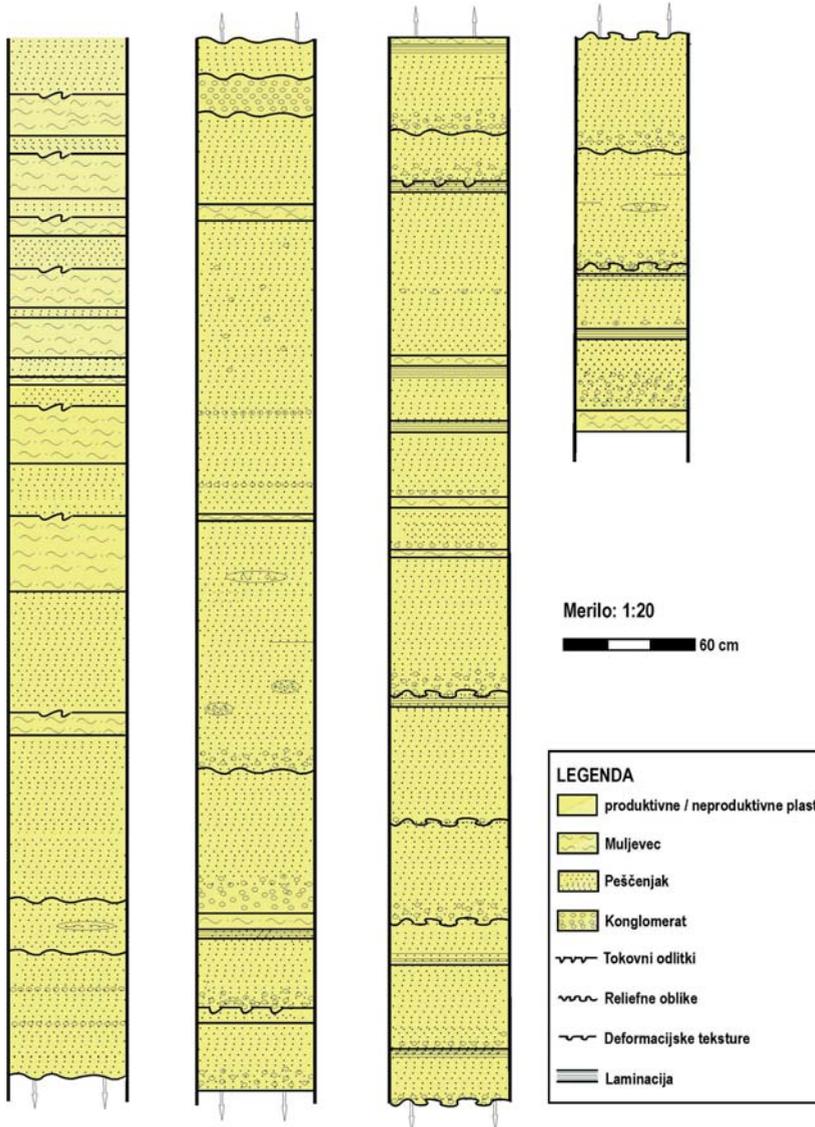
Geološke značilnosti nahajališč vunduškega peščenjaka

Značilni litološki členi v Občinskem kamnolomu so peščenjak, konglomerat in muljevec (slika 2). Debelina plasti posameznih členov se lateralno spreminja, plasti pa se ponekod tudi izklinjajo. V splošnem so v spodnjem delu kamnoloma prisotni debeloplastnati, v vrhnjem delu pa tankoplastnati različki kamnine. Debeloplastnate različke predstavljajo sekvence drobno do debelo-zrnatega peščenjaka in drobnozrnatega konglomerata s postopno zrnavostjo. V tankoplastnatih različkih se konglomerat ne pojavlja.

Kremenov karbonatno sljudnat peščenjak je primarno značilno sive barve, debelina plasti pa se spreminja od tanko do debeloplastnatih različkov. Dejanske debeline plasti

peščenjaka se gibljejo od 5 cm do 1m. V peščenjaku opazna je postopna zrnavost, ponekod je laminiran in povečini slabo sortiran. Vsebnost litičnih karbonatnih zrn, zrn sljude, zrnavost na splošno ter sortiranost se v peščenjaku spreminjajo.

Drobnozrnat kremenov konglomerat se pojavlja v različno debelih plasteh (od enega 1 do 20 cm) in v lečah med plastmi peščenjaka. Pogosto zapolnjuje erozijske kanale. Velikost, zaobljenost in sortiranost prodnikov se spreminja, prav tako razmerje med zrn in osnovo.

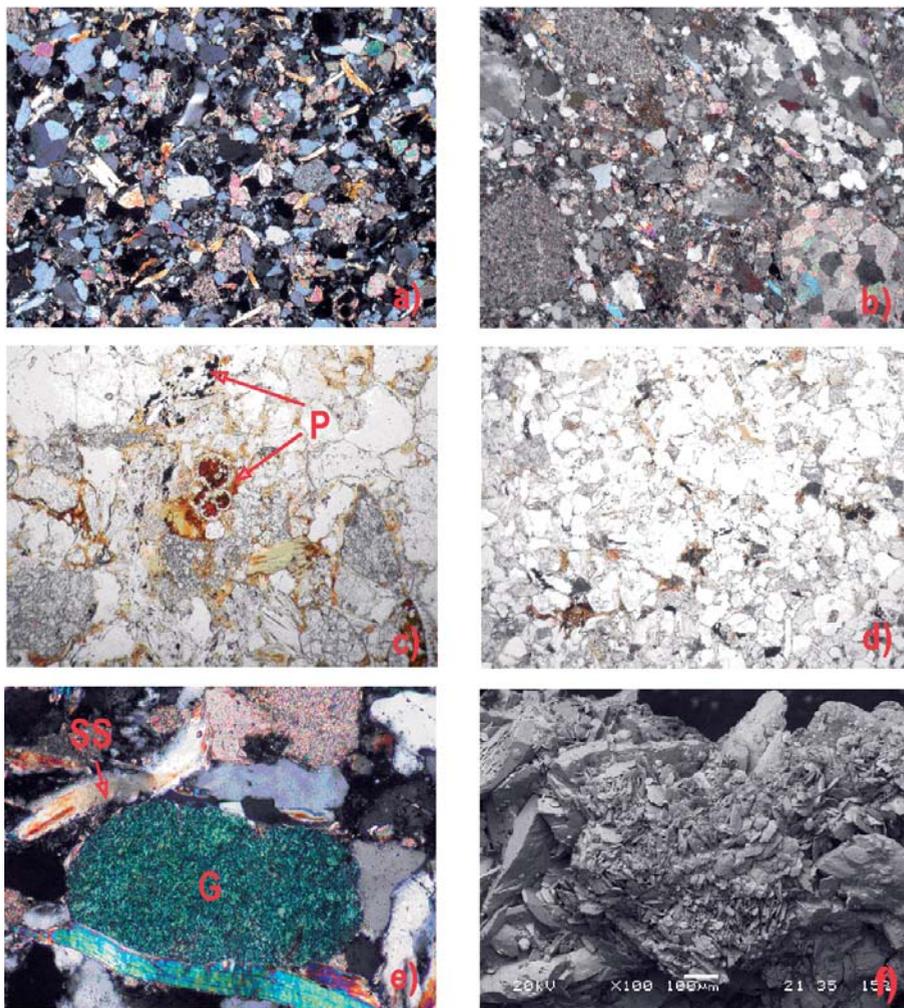


Slika 2. Litološki stolpec razvoja kamnin v Občinskem kamnolomu.

Figure 2. Lithological column of rocks present at the Občinski quarry.

Plasti muljevca so debele od nekaj mm do 30 cm. Pojavljajo se kot leče, pole, lamine in plasti v peščenjaki. Na podlagi makroskopskega opazovanja se sestava spreminja

glede na vsebnost sljude (od malo do zelo sljudnatih različkov) in karbonata. Strukturno pa so prisotni različki v intervalu od skrilavega glinavca do peščenega meljevca.



Slika 3. Mikroskopske slike Vunduškega peščenjaka. Slike so posnete pod optičnim mikroskopom, razen slike f), ki je bila posneta pod SEM; a) peščenjak, b) drobnozrnat konglomerat, c) in d) nespremenjen in oksidiran framboidalen pirit (P), ki zapolnjuje znotrajzrnske pore forameniferne hišice ali nastopa kot cement, e) zrno glavkonita (G) ter primer sekundarne silifikacije (SS) zrna muskovita, f) sadra, ki nastaja na površini peščenjaka v zavetnejših predelih kamnoloma.

Figure 3. Microscopic images (all taken under the optical microscope with the exception of image f) which was taken under SEM) of Vunduški sandstone; a) sandstone, b) fine-grained conglomerate, c) and d) unchanged and oxidized framboidal pyrite (P) which fills inner-grain pores of a fossil shale or appears as a cement, e) glauconite grain (G) and a representation of a secondary silification (SS) of a muscovite grain in contact with a quartz grain, f) gypsum which is formed on sandstone surface in the less exposed parts of quarry.

Različki kamnine s sekvencami peščenjaka in konglomerata so debelin od 0,5 m, lahko do 6 m. V teh plasteh se nahajajo tudi posamezne leče, pole in lamine muljevca ter leče konglomerata. Med fosilnimi ostanke so v peščenjaku prisotne foraminifere in lupine ostrig. V kamnini sva določili pred-sedimentne (erozijski kanali, tokovni odlitki), sinsedimentne (horizontalna laminacija, postopna zrnastost) in postsedimentne teksture (bioturbacija, deformacijske in plamenaste teksture).

Na osnovi določenih značilnosti kamnin predpostavljamo, da je vunduški peščenjak nastajal v priobalnem morskem okolju Paratetide, v območju plimovanja. Morsko okolje dokazuje prisotnost glavkonita, priobalno okolje pa organski (verjetno rastlinski) ostanke in nekatere sedimentne teksture (tokovni odlitki). Take sekvence lahko nastajajo v obalnem območju, saj podobno prerazporeditev materiala lahko opazujemo na marsikateri današnji obali. V splošnem lahko rečemo, da se zrnastost z višino zmanjšuje, se pravi, da gre za retrogradacijsko zaporedje kamnin. Slednje nam nakazuje poglobljanje sedimentacijskega bazena oziroma transgresijo morja.

Mikroskopski opis

Drobnozrnat do srednjezrnat srednje sortiran peščenjak sestavljajo prevladujoča kremenova zrna, zrna sljude, litični delci sedimentnih karbonatnih, magmatskih in metamorfni kamnin, sledijo zrna sericitiziranih glincev ter nekateri težki minerali (cirkon in sfen), mestoma pa se v kamnini pojavljajo tudi zrna glavkonita (slika 3). Interval velikosti zrn se giblje od 0,07-0,5 mm, najpogostejša so zrna velika od 0,1-0,3 mm. Kontakti med zrnami so večinoma

ravni, tudi konkavno-konveksni in podrejeni suturni. Struktura peščenjaka je polzrela. V kamnini so prisotne foraminifere, ob katerih se pojavlja framboidalen pirit, ki je lahko deloma ali v celoti limonitiziran (sliki 3c in 3d). Peščenjak je mestoma silificiran. Predvsem nekatera zrna muskovita so deloma ali v celoti silificirana. Opazne so tudi razpoke, ki so zapolnjene s kremenom. Nekatera litična karbonatna zrna so razpokana zaradi pritiskov med diagenozo. Zrna veže medzrnski in znotrajzrnski kalcitni cement, medzrnski in obrobni kremenov cement, framboidalen piritni cement, ki je mestoma limonitiziran in ga lahko ponekod smatramo za limonitni cement.

Drobnozrnat kremenovo karbonatno sljudnat konglomerat sestavljajo prevladujoča kremenova in karbonatna zrna, zrna muskovita ter v manjši meri tudi zrna magmatskih in metamorfni kamnin. Osnovo v konglomeratu predstavljajo slabo do dobro zaobljena zrna kremenova, sljude, glinenci se pojavljajo podrejeni. Zrna večinoma plavajo v drobnozrnatih osnovi, nekaj se jih dotika s točkovnimi, ravnimi, konkavno-konveksnimi in tudi suturnimi kontakti. Klase med seboj veže kalcitni cement, pojavlja se framboidalen piritni cement, ki je ponekod limonitiziran.

Propadanje vunduškega peščenjaka

Načine propadanja, oziroma nastanek določenih sprememb v vgrajeni kamnini lahko predvidimo na osnovi njenih fizikalnih in kemičnih lastnosti oziroma mineralne sestave.

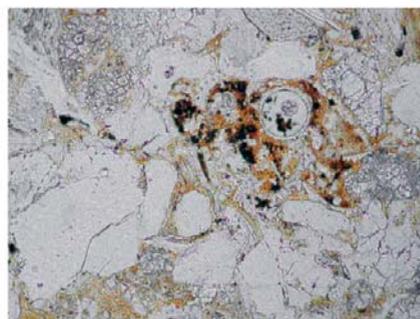
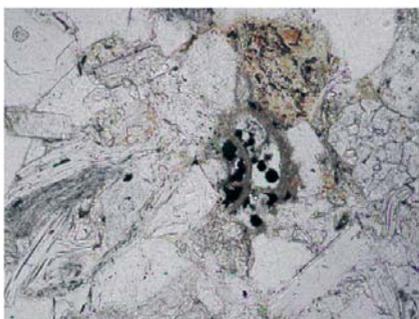
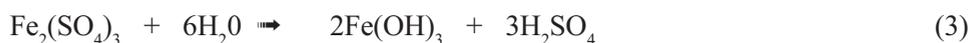
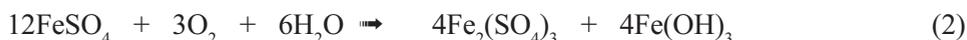
Zanimala naju je predvsem možna povezava med oblikami propadanja in lastnostmi peščenjaka. Glavni petrografski faktorji, ki

vplivajo na obstojnost vunduškega peščenjaka, so mineraloška sestava, tekstura (ploskve in točke šibkosti) in struktura (poroznost) kamnine.

Oblike propadanja in spremembe vgrajenega vunduškega peščenjaka lahko opazujemo na različnih objektih, kjer je bil peščenjak uporabljen (ANIČIĆ & RAMOVŠ, 1998). Na peščenjakih se politura ne obdrži dolgo. Zlasti karbonatne komponente se pod vplivom deževnice raztapljajo, kar skrajša čas obstojnosti politure. Obnašanje kamnine pri poliranju je odvisno od sestave, strukture ter tuksture kamnine. S poliranjem površine zaviramo učinek preperevanja, saj s tem zmanjšamo stično površino med kamnino in vodo na površini.

Najpogosteje kamnina propada zrnato in se luska (slika 5b). Glavni povzročitelji tega tipa razpadanja so zmrzal, kristalizacija topnih

solí, spremembe temperature in izbirnega raztapljanje, npr. raztapljanje slabše odporne karbonatnega veziva v peščenjakih. Zaradi teh dejavnikov posamezna zrna izpadajo iz kamnine. V primeru vunduškega peščenjaka je v preperinski skorji dokazana prisotnost sadre (GOLEŽ, 1999), ki je vzrok razpada kamnine (slika 3f, slika 4). Proces sulfatizacije, ki vodi k nastanku sadre škodljivo vpliva na obstojnostne lastnosti kamnine predvsem z dveh vidikov. Zmanjšuje namreč mehansko trdnost kamnine, kristalizacija sadre tik pod površino kamnine pa povzroča kristalizacijski in hidratacijski pritisk na okolna zrna, kar pripelje do zrnatega razpada in luščenja kamnine. Sadra nastaja na površini peščenjaka kot posledica raztapljanja kalcita in oksidacije ter hidratacije pirita, in sicer v zavetnejših predelih Občinskega kamnoloma, kjer jo deževnica ne izpira. Nastanek sadre poteka v skladu z naslednjimi enačbami;



Slika 4. Framboidalni pirit.
Figure 4. Framboidal pyrite.

Mehanizem preprevanja pirita je oksidacija. Razpad pirita poteka po ustaljeni poti reakcijske verige, ki se zaključi z nastankom sadre. V prvem koraku poteče transformacija železovih sulfidov v železove sulfate (FeSO_4 (1), $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (2)) in hidrokside ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ (3)), nato okside ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) (4). Istočasno v sistemu nastaja pa tudi H_2SO_4 pri reakciji (1) in (3).

Prva posledica te oksidacije je nastanek železovih hidroksidov, ki so vzrok obarvanju peščenjaka rumeno. Druga pomembna posledica je povezana z nastankom žveplove (VI) kisline, ki v kamnini reagira z mineralnimi delci v okolici in povzroča njihovo raztapljanje, še posebno, če so le ti karbonatni. Tretja posledica omenjene reakcije je kristalizacija sadre ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (5),(6)).



Hitrost reakcije je odvisna od več faktorjev: koncentracije kisika, vlažnosti, temperature, velikosti in oblike delcev, prisotnosti avtotrofnih bakterij in pH vrednosti okolja (DIVET, 1996).

Tekom celotne reakcije oksidacije in nastanka sadre (enačbe 1-5), je možno spremljanje volumske bilance reakcij. Iz teh podatkov je možno izračunati spremembo volumna, ki spremlja reakcijo pirita v sadro. Izračun je posplošen izračun volumna (V) vsake posamezne mineralne faze, upoštevajoč podatek o njeni gostoti (d) in molski masi (M) na osnovi spodnje enačbe:

$$d = M/V \quad ; \quad V = M/d \quad (7)$$

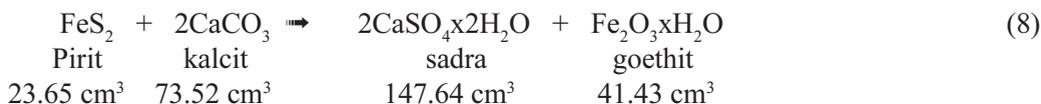


Tabela 1. Fizikalni in kemijski parametri mineralov, ki vstopajo v reakcijo prehoda pirita v sadro (DEER ET AL, 1962 v QUENEE, 1990).

Table 1. Physical and chemical parameters of minerals that take part in the pyrite- gypsum transition (DEER ET AL, 1962 in QUENEE, 1990).

	Gostota	Molska masa (g)	Molski volumen (cm ³)
Pirit	4.99	118	23.65
Kalcit	2.72	100	36.76
Apno	2.34	74	31.62
Sadra	2.33	172	73.82
Goethit	4.20	174	41.43

Reakcije (1), (3), (4) in (5) kažejo, da reakcija prehoda pirita v sadro tekom vseh vmesnih stopenj, na en mol pirita povzroči nastanek dveh molov sadre in enega mola goethita na dva mola kalcita.

Po izračunu vidimo, da znaša presežek volumna 91,90 cm³. Upostevajoč odprtost sistema (omogočeno prosto pretakanje fluidov), je teoretično povečanje volumna, ki spremlja oksidacijo pirita v sadro 94,57 % glede na začetno mineralno združbo. Omenjeno kemijsko reakcijo spremlja tudi nastanek pritiska kot posledica kristalizacije novih mineralnih faz, torej pritisk, ki se sprošča ob reakciji prehoda pirita v sadro. Ta pri 0 °C znaša 28,5 MPa, pri 50 °C pa 33,8 MPa (QUENEE, 1990). Za primerjavo podajava podatek, da so vrednosti pritiska 33,8 MPa enake litostatičnemu pritisku v Zemljini skorji na globini 1276 metrov.

Na obstojnost kamnine poleg njene mineralne sestave vplivata tudi njena tekstura in struktura. Vsaka oblika diskontinuitete predstavlja potencialno ploskev šibkosti v kamnini, kjer bo kamnina hitreje preperevala. Pri vunduškem peščenjaku take ploskve šibkosti predstavljajo leče, pole lamine in plasti glinavca v peščenjaku, razpoke ter sprememba velikosti zrnivosti.

Po ploskvah diskontinuitet, ki jih predstavlja foliacija in laminacija prihaja do intenzivnejšega procesa luskanja kamnine. Kamnina, vgrajena pravokotno na plastnatost, bo po takih ploskvah hitreje razpadala, kot če bi bila vgrajena vzporedno s plastnatostjo. Peščenjak se kroji v večcentimetrске pasove, prihaja do t.i. delaminacije (slika 5a).

V primeru vunduškega peščenjaka lahko govorimo tudi o njegovem selektivnem preperevanju, ki je posledica prisotnosti različnih litoloških različkov. Glede na prisotnost posameznega litološkega člena kamnina različno intenzivno prepereva. Tako na primer plasti peščenjaka glede na plasti konglomerata hitreje

zrnato razpadajo in kot posledica konglomeratne plasti izstopajo iz površine. Vzrok temu je višja mehanska trdnost prevladujočih kremenovih klastov v konglomeratu in relativno dobro obstojno vezivo.

Pri vgradnji kamnine je pomembna tudi barvna obstojnost kamnine. Obstojnost barve kamnine je odvisna od mineralne sestave kamnine. Pogojuje jo obstojnost posameznih mineralov proti preperevanju. Barvo peščenjaku dajejo lastne barve posameznih mineralnih zrn. Glede barvne obstojnosti ločimo barvno obstojne, to je tiste minerale, ki pod vplivom zunanjih dejavnikov ohranijo svojo barvo in barvno neobstojne minerale, ki svojo barvo pod takimi pogoji spremenijo. Med slednje v vunduškem peščenjaku uvrščamo minerala pirit in biotit. Kot posledica sekundarnih sprememb v mineralni sestavi Vunduškega peščenjaka ta mestoma spremeni svojo prvotno sivo v rjavkasto barvo.

Na obstojnost kamnine vpliva tudi prisotnost mikroorganizmov na njeni površini. Dovzetnost kamnine za naselitev mikroorganizmov je odvisna od okoljskih faktorjev, kot so prisotnost vode, pH, izpostavljenost vremenskih vplivov, nutrienti in petrološki parametri (mineralna sestava, vrsta cementa, poroznost in permeabilnost kamnine). V kamnolomu ni videti opazne naselitve organizmov, razen v vlažnejših predelih, ki jih poseljujejo mahovi in alge. Na nekaterih opazovanih objektih, zgrajenih iz vunduškega peščenjaka, so prisotni lišaji. Po literaturi (WARSCHIED ET AL., 2000) so kamnine, ki vsebujejo opazno količino mineralov, kot so glinenci, glineni minerali in železovi minerali, ki so nagnjeni k hitrejšemu preperevanju in s tem bolj dovzetni za naselitev mikroorganizmov.

Glavni vzroki za opisano propadanje peščenjaka so močno odvisni od lastnosti same kamnine in ne samo od geografske lokacije in mesta vgrajene kamnine.

Minerali, ki vplivajo na obstojnost vunduškega peščenjaka

Pirit

V peščenjaku se pojavlja izključno kot framboidalni pirit in je prisoten v dokaj velikih količinah (približno 10 %). Mono in poliframboidalni pirit nastopa ob forameniferah, zapolnjuje kamrice posameznih foramenifer, nadomešča celično strukturo posameznih rastlinskih ostankov ter nastopa ob zrnih biotita ali v njegovih laminah. Velikost posameznih skupkov framboidalnega piritja je različna in znaša od 1,5 μm pa tudi do 250 μm .

Nastanek piritja je ponavadi vezan na procese zgodnje diageneze, lahko pa je tudi sin-genetski in poznodiagenetski (SAWLOWICZ, 2000). Nastanek framboidalnega piritja ob organskih delcih zavisi predvsem od dostopnosti organskega materiala, ki je potrebno za bakterijsko sulfatno redukcijo in od dostopnosti železa. Vir slednjega je lahko tudi biotit. Pirit v stiku z vodo limonitizira, kar obarva kamnino rjavorumenno. Pri oksidaciji piritja pa nastaja tudi žveplova kislina, ki raztaplja kalcitno vezivo, kar vodi do nastanka sadre (SHAYAN, 1988), ki kvarno vpliva na obstojnost kamnine.

Kremen

Kremen v obliki sekundarnega kremenja povišuje obstojnost kamnini. V peščenjaku se sekundarni kremen pojavlja kot obrobni in medzrnski cement, opazujemo pa lahko tudi posamezna silificirana muskovitna zrna

(slika 3e). Med kompakcijo kamnine lahko zaradi pritiska pride do raztapljanja terigenih kremenovih zrn. Kremen nato zapolni pore ali se odloži kot obrobni cement ob kremenovih zrnih, lahko pa nadomešča tudi druge minerale. Viri silicija za silifikacijo lahko vstopijo v sistem tudi kot posledica razpadanja silikatov in vdor s silicijem bogatih fluidov med tektonskimi dogajanjem. Tako lahko preperevanje muskovita povzroci presežek silicija (PARFENOVA and YAPASKURT, 2001). V primeru vunduškega peščenjaka opazujemo sekundarno spremenjena zrna muskovita in biotita. Pri njunem preperevanju se je iz kristalne rešetke izločal silicijev ion, ob vdoru fluidov med tektonskimi procesi je lahko prislo do njegove mobilizacije in s tem do sekundarne silifikacije tako izvornih mineralov, kateri so vir presežnih silicijevih ionov kot tudi drugih mineralov, ki v svojo rešetko lahko vežejo silicijeve ione. S tem ko se kremen izloča v porah, zmanjšuje poroznost in s tem povečuje trdnost kamnine (FRANKLIN, 2000). Dokazano je bilo, da se lahko poroznost peščenjaka iste formacije v predelih, kjer je bila prisotna silifikacija v primerjavi z nesilificiranimi deli peščenjaka, zmanjša do 5 % (GAL, 2004).

Kalcit

V peščenjaku je prisoten kalcitni cement, ki se ob prisotnosti deževnice v primerjavi z ostalimi mineralnimi komponentami hitreje raztaplja. Pojavu pravimo izbirno raztapljanje, zaradi katerega kamnina zrnato razpada. Raztopljene komponente kalcita se lahko naknadno na površini ali pod površino kamnine odlagajo v obliki sadre.

Glinenci

V peščenjaku so prisotni v majhnih količinah (do 2 %), zato ne igrajo pomembne vloge.

Prisotnost glincev drugače kvarno vpliva na obstojnost kamnine, saj pri preperevanju prehajajo v minerale glin. Minerali glin namreč neugodno vlivajo na obstojnost kamnine, ker imajo nižje mehanske trdnosti in v svojo kristalno zgradbo vežejo molekule vode, zaradi česar nabrekajo. Dilatacija kamnine z veliko vsebnostjo glinene komponente je zato zelo velika. Poleg tega z mehanskimi površinskimi procesi kot je vodna in vetrna erozija, kristalizacija soli in abrazivne čistilne metode glinenci hitro preperevajo, njihov izguba mase je v primerjavi z ostalimi komponentami večja (FRANKLIN, 2000).

Biotit

Biotit prepereva hitreje od muskovita. Iz silikatne mreže izgublja železo hitreje kot ostali železovo - magnezijevi silikati, kamnino pa zaradi oksidacije v železove

oksidi in hidroksidi obarva rjavorumenno (WINKLER, 1997). V vunduškem peščenjaku se ob zrnih biotita pojavlja framboidalen pirit, kar lahko nakazuje da je vir železa, ki je potreben za nastanek framboidalnega pirita, tudi preperevanje biotita.

Vpliv teksture in strukture na obstojnost kamnine

Poroznost

Količina, oblika (tipologija), velikost, porazdelitev in povezanost (permeabilnost) por med drugimi lastnostmi določata trdnost in obstojnost kamnine. Na podlagi teh parametrov lahko namreč ocenimo vsebnost in gibanje vlage in soli v kamnini, ki sta ena izmed glavnih povzročiteljev propadanja. Iz mikroskopske analize in mehansko-petrografskih analiz (GOLEŽ, 1999) je razvidno, da ima peščenjak nizko poroznost. Načeloma



Slika 5. Primera propadanja objektov zgrajenih iz vunduškega peščenjaka; a) plastenje kamnine po ploskvah diskontinuitete na znamenju v okolici Ptujске Gore, b) zrnato propadanje peščenjaka na steburu na Ptujski Gori.

Figure 5. Two example of deterioration of objects build out of vunduški sandstone; a) delamination of the rock along the discontinuity planes on a pillar near the Ptujсka Gora, b) granular deterioration of a column at Ptujсka Gora.

velja, da manj kot je peščenjak porozen, bolj obstojen je. Obstojnost je močno odvisna od vrste poroznosti. Če pore med seboj niso dobro povezane, bo kamnina hitreje preperevala, posebno to velja za znotrajzrnsko poroznost. Voda se v tem primeru zadržuje v notranjosti in pri znižanju temperatur nastali kristali ledu izvajajo pritisk na stene por, kar povzroči degradacijo kamnine. V vunduškemu peščenjaku je poroznost sekundarno zmanjšana s prisotnostjo kremenca in železovih oksidov ter hidroksidov.

Ploskve in točke šibkosti kamnine

Vsaka oblika diskontinuitete predstavlja potencialno ploskev šibkosti v kamnini, kjer bo kamnina hitreje preperevala. Pri vunduškem peščenjaku take ploskve šibkosti predstavljajo leče, pole lamine in plasti glinavca v peščenjaku, razpoke ter sprememba velikosti zrnivosti. Po ploskvah diskontinuitet, ki jih predstavlja foliacija in laminacija pride do luskanja kamnine oz. t.i. delaminacije (Slika 5a). Slednja se ponavlja pojavlja samo v kamninah, ki vsebujejo sljudo (STOREMYR ET AL., 2002). Večja je vsebnost sljude, lažje prihaja do luskanja. Potrebno je ločevati luskanje, ki je popolnoma odvisno od foliacije kamnine oz. laminarne teksture ter luskanje (imenovano tudi luščenje, krojitev), ki nastane predvsem zaradi strukturne in mineralne šibkosti, neodvisno od teksture kamnine

SKLEPI

Produktivnost plasti v kamnolomih je ovrednotena na podlagi prisotnosti mehanskih diskontinuitet, mehanskih razlik, mineraloške sestave in s tem obstojnosti kamnine v različnih delih kamnoloma (GRUNERT ET AL. 1995).

V Občinskem kamnolomu sva glede na velikosti možnih pridobljenih blokov določili kategorije produktivnosti plasti (slika 6). Slednje so bile osnovane na podlagi kompaktnosti kamnine oziroma prisotnosti diskontinuitet, ki jih predstavljajo tanjše plasti muljevca in razpoke, ki določajo velikost pridobljenih blokov kamnine. Tanjše plasti oz. lamine muljevca, ki se pojavljajo znotraj plasti, ne vplivajo na pridobivanje blokov, pač pa je treba upoštevati, da bodo ta mesta po vgradnji kamnine hitreje preperevala.

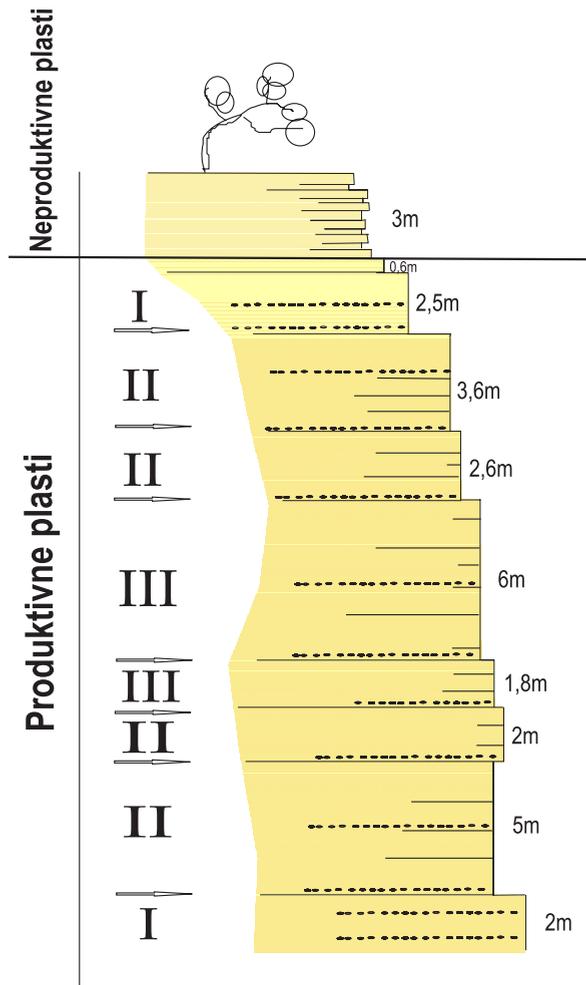
Pri pridobivanju kosov naravnega kamna iz kamnoloma je uveljavljena klasifikacija o velikosti posameznega bloka. Po tej razvrstitvi znašajo dimenzije najmanjšega komercialnega standardnega bloka 30x100x120 cm, optimalni standardni bloki pa dosežejo dimenzije 120x150x290 cm.

Kategorije produktivnosti plasti v Občinskem kamnolomu so naslednje:

- I. kategorija:** kamnina je kompaktna brez večjih diskontinuitet, ki bi predstavljale točke in ploskve šibkosti. Možno je pridobivanje blokov optimalnih dimenzij (več kot 2m).
- II. kategorija:** v kamnini so mestoma prisotne diskontinuitete, ki jih predstavljajo tanke plasti in leče glinavca, ob katerih se lateralno bolj ali manj intenzivno izdvojijo posamezne plasti. Možno pridobivanje blokov manjših dimenzij, maksimalne debeline 2 m.
- III. kategorija:** v kamnini so prisotne diskontinuitete, ki jih predstavljajo tanjše plasti glinavcev in razpoke. Možno pridobivanje blokov manjših dimenzij, maksimalne debeline 1m.

Zaloge kamnine na obravnavanem območju so, ob upoštevanju njihove razprostranjenosti v prostoru ter debeline produktivnih plasti, velike. Vsaj trije izmed devetih opušenih kamnolomov so zaradi svoje velikosti, količine produktivnih kamnin in lahke dostopnosti perspektivni za ponovno odprtje za potrebe obnovitvenih del. Produktivne plasti v kamnolomu predstavljajo debelo-

plastnati različki kamnine, ki so zastopani kot sekvence drobnozrnatega do srednjezrnatega kremenovo sljudnatega peščenjaka in drobnozrnatega kremenovega konglomerata. Najbolj verjeten vzrok propadanja vunduškega peščenjaka je prisotnost pirita v njem. Pirit ne vpliva samo na slabšo obstojnost barve, temveč je vzrok tudi mehanskemu preperevanju kamnine, saj ob



Slika 6. Pregledna skica vrednotenja kamnine v Občinskem kamnolomu glede na njene geološke značilnosti in produktivnost.

Figure 6. Representation of the Občinski quarry, according to geological characteristics and productivity of the sandstone layers.

prisotnosti kalcita v določenih razmerah pogojuje nastanek sadre. Ta mineral je eden izmed glavnih dejavnikov preperevanja, saj povzroča luskanje in zrnato razpadanje peščenjaka. Sekundarni kremen povečuje mehansko trdnost peščenjaka, kamnina bo v predelih z večjo vsebnostjo sekundarnega kremena obstojnejša. Peščenjak ima majhno poroznost, kar je načeloma ugodno za obstojnost kamnine, toda za dorečenost vpliva poroznosti bi bilo potrebno natančneje oceniti naravo poroznosti.

Vsekakor so za popolnejše ovrednotenje nahajališča potrebne nadaljne raziskave. Za ocenitev zalog bi bilo smiselno načrtovati izvedbo vrtine z namenom ugotovitve zalog peščenjaka v globini in detajlnejše strukturno kartiranje za določitev razprostranjenosti peščenjaka v prostoru.

Dodatni laboratorijski in simulacijski testi ter sistematičen študij procesov propadanja peščenjaka na že obstoječih objektih, bi bili potrebni za nadaljne določevanje obstojnosti kamnine. Predvsem bi bile nujne še nekatere petrofizikalne preiskave (skupna poroznost, ocenjevanje zaprte/odprte poroznosti, vodovpojnost, dilatacija, adsorbcija/desorbcija vlage, evaporacija), ki bi doprinesle k boljšemu poznavanju mikrostrukture kamnine in ocenjevanju parametrov gibanja vode, ki je glavni povzročitelj mineralnih transformacij. Z omenjenimi raziskavami bi tako zagotovili izbiro primerne kamnine za restavratorske posege.

S tem prispevkom bi avtorici radi poudarili tudi pomen petrografskih raziskav na izbiro restavratorskega posega. Določanje petrofizikalnih lastnosti kamnine je nujno potrebno za ugotavljanje in zagotavljanje

kompatibilnosti med kamnino in konservatorskim sredstvom. Omenjene raziskave bi pripomogle k uspešnejšemu iskanju primerne posega z namenom omejiti propadanje kamnine. S tem bi močno zmanjšali potrebe po novi kamnini, predvsem pa bi ohranili original.

Zahvala

Zahvaljujemo se kolegoma Roku Zalokarju in Boštjanu Bradaškji, ki sta nama s svojimi plezalskimi sposobnostmi pomagala posneti litološki profil. Zahvaljujemo se tudi Zavodu za Gradbeništvo, predvsem Mateji Golež, za možnost uporabe SEM mikroskopa.

SUMMARY

Pre-restoration research of cultural heritage represents a complex task and requires a multidisciplinary approach, in which the geology plays an important role. When investigating historical building stones, the major questions relate to the types and provenance of used natural stones, identification of the weathering phenomena, and finding the appropriate rock for replacement. When carrying out a conservation project on highly degradable materials, the ideal course of action is to replace the damaged material by another with the same or similar characteristics.

This article presents the results of the study of Vunduški sandstone from the ancient quarry region near Haloze, locally used in heritage buildings. The present study was aimed especially at characterisation of sandstone from the abandoned Občinski quarry, including petrographic studies to

assess the behaviour of sandstone as building stone, and its susceptibility to weathering. A petrographic analysis is made in two parts. Firstly, the mesoscale or visual assessment, followed by microscopic analysis using standard petrological microscope and scanning electron microscopy.

Vunduški sandstone originates from the stratigraphic horizons of the Early Miocen sediment basin of the Central Parathetys. Layers consist mostly of sandstone, conglomerate and mudstone.

Sandstone is thin to medium layered, fine to medium coarse, with pore-filling cement consisting mainly of calcite cement, framboidal pyrite and secondary iron oxide and hydroxide, and authigenic quartz overgrowths. There is a range of degradation phenomena related to the sandstone weathering. Examples of some common weathering forms are the granular disintegration, delamination (exfoliation) and excessive iron colouration due to iron oxide and hydroxide deposition.

Petrographic factors affecting the durability of Vunduški sandstone are:

- presence of pyrite
- amount of secondary silica deposition

- the nature, percentage and distribution of clay minerals in the host rock
- presence of biotit
- nature of porosity: percentage of pores, their size and distribution
- the presence of planes and zones of structural weakness in the host stone

We consider the oxidation of pyrite (equations 1-5) to be the initial reaction responsible for the degradation of Vunduški sandstone, which in its final state enables the formation of gypsum. After the oxidation of pyrite starts, one of the resulting products of this reaction, H_2SO_4 , reacts with calcium carbonate, releasing the excess calcium ions into the observed system. The result of the reaction between calcium ion and sulphuric acid is the formation of gypsum. Total reaction causes a volume increase, which probably leads to mineral desintegration and scaling of the material.

The results provided a comprehensive basis for evaluating the provenance of ancient building sandstones and their resources. Furthermore, they might contribute to the interpretation of weathering damage on historical monuments, and also give useful hints towards their current conservation and reconstruction activities.

REFERENCE

- ANIČIĆ, B. & JURIŠA, M. (1985): *Tolmač lista Rogatec L 33-68. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000*. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- ANIČIĆ, B. & RAMOVŠ, A. (1998): Vunduški peščenjak namesto ptujskogorski peščenjak-zahodne Haloze, *Geologija* 41, 103-108, Ljubljana.
- DIVET, L. (1996): *Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxidation de pyrites contenues dans les granulats*. Synthèse bibliographique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris.
- DIVET, L. (1996): *Etude des risques d'oxidation de la pyrite dans le milieu basique du béton*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris.

- FRANKLIN, B. J. (2000): *The role of petrography in the selection of sandstone for repair*. Seminar on Material evidence; Conserving historic building fabric, April 13-14, 2000. Gradivo je dostopno na internetnem naslovu: <http://www.heritage.nsw.gov.au/docs/franklin.pdf>
- GAL, G. (2004): *Influence de la microstructure de différents grès en oeuvre et de carrière sur leur résistance e l'altération*. Application aux grès a meules de la cathédrale Notre-Dame de Strasbourg. Travail de diplôme. Lausanne.
- GOLEŽ, M. (1999): *Geološko vrednotenje kamnitih izdelkov iz miocenskih peščenjakov vzhodne Slovenije*. Unpublished Msc. Thesis, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 122 p., Ljubljana.
- GRUNERT, S. & KUTSCHE, D. (1995): *Der Elbsandstein als Werk-und Dekorstein, -wichtige Abbaugebiete, markante bauwerke*, Exkursion B3, bilten, Dresden.
- GRIMIŠČAR, A., OCEPEK, V. (1965): *Petrografske in mehanske lastnosti okrasnih kamnin v Sloveniji*. Informacije za raziskavo materiala in konstrukcij v Ljubljani, leto VI. 8-9, Serija:Preiskave.
- PARFENOVA, O.V., YAPASKURT, O.V. (2001): Some problems of Clastogenic Mica Transformation during Anchimetamorphism (Metagenesis). *Lithology and Mineral Resources*, Vol. 36, No.3, pp. 262-267.
- PLANJŠEK, M., MIRTIC, B. & ANIČIĆ, B. (2002): Naravovarstveno ovrednotenje nahajališč miocenskih sedimentnih kamnin v kamnolomih severovzhodne Slovenije, *Geologija* 45/2, pp. 485-492, Ljubljana.
- QUENEE, B. (1990): *Transformations minéralogiques et texturales de matériaux rocheux, mortiers et bétons d'ouvrages varies. Approche de la cinétique des mécanismes et identification des facteurs responsables*. These. Université de Nancy I. Laboratoire de géologie des ensembles sédimentaires. Equipe de géologie appliquée, Nancy.
- SAWLOWICZ, Z. (2000): *Framboids: From their origin to application*. *Prace mineralogiczne*. Polska Akademia Nauk – Oddzial w Krakowie, Komisja Nauk Mineralogicznych, No; 88, 1- 80 pp.
- SHAYAN, A. (1988): Deterioration of a concrete surface due to the oxidation of pyrite contained in pyritic aggregates. *Cement and Concrete Research*, Vol. 18, pp. 723-730.
- STOREMYR, P., WENDLER, E., ZEHNDER, K. (2002): *Weathering and Conservation of Soapstone and Greenschist Used at Niardaros Cathedral (Norway)*. Preliminary summary of results-a work document. Programme-European heritage Laboratory. Report No.2/2001, The restoration Workshop of Niardaros Cathedral, Trondheim, Norway.
- WARSCHEID, TH., BRAAMS, J. (2000): Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration&biodegradation* 46, 434-368, Elsevier.
- WINKLER, E., M. (1997): *Stone in Architecture. Properties, Durability*. Springer-Verlag Berlin, 313 p., Heidelberg.