

POSTOJANOST TRAHIT-TRAHIANDEZITA UGRAĐENOG NA PJEŠAČKO-KOLNIČKOJ KONSTRUKCIJI

Ivan TOMAŠIĆ¹⁾, Maja VRKLJAN²⁾, Gordan HELINGER³⁾, Miroslav BUŠIĆ⁴⁾ i Darko TIBLJAŠ⁵⁾

^{1),2),3)} Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, L. Pierottija 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

⁴⁾ Institut građevinarstva Hrvatske, J. Rakuše 1, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

⁵⁾ Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Horvatovac bb, HR-10000 Zagreb, Hrvatska
E-mail: itomas@rudar.rgn.hr

Glavne riječi: Prirodni kamen, Trahit-trahiandezit, Fizičko-mehanička svojstva, Petrografska svojstva

Prirodni kamen određen kao trahit-trahiandezit s lokaliteta Colli Euganei u blizini Padove u Italiji ugrađen je na kolničko-pješačkoj konstrukciji Tkalčićeva ulice u Zagrebu. Uzorci kamena, prije ugradnje, podvrgnuti su brojnim određivanjima fizičkih i mehaničkih svojstava (gustoće, volumne mase, upijanja vode, poroznosti, tlačne čvrstoće, otpornosti na habanje struganjem, čvrstoće na savijanje, postojanosti na smrzavanje i na Na₂SO₄, brzine prolaza ultrazvučnih valova, te mikroskopskim i rendgenskim analizama, fotografiranju elektronskim mikroskopom). Utvrđeno je da oko 30% ugrađenog kamena ne odgovara postojećim važećim ili opće prihvaćenim kriterijima o kakvoći prirodnog kamena. Povećanog je upijanja vode i poroznosti, velikog pada tlačnih čvrstoća u vodom zasićenom stanju, nedovoljno otporan na habanje i na Na₂SO₄, anizotropan, sadrži bubrege gline iz skupine smektita, te brojne defekte posebice u obliku mikroblokova kao posljedice postdijagenetskih procesa. Premda uzorci pripadaju istoj vrsti stijene, razlike među kamenim elementima su velike. Makroskopski gledajući materijal je vrlo heterogen. U uzorcima kamena slabije kakvoće nalaze se manje ili više brojni subparalelni smeđi i sivi proslojci debljine približno 1–2 mm s povećanim udjelom sekundarnih minerala željeza. Željezovi oksidi i hidroksidi manje ili više impregniraju dijelove stijene, mrljasto ili trakasto, a ponegdje je intenzivno impregniran i čitav uzorak. Impregnaciju intenziviraju bubrege gline i brojne šupljine duž kojih se kamen osipava.

Uvod

Na kamenim elementima trahit-trahiandezita kojima je popločen obnovljeni dio Tkalčićeva ulice, od ulice Pod zidom do Skalinske, zapažene su značajke koje su upućivale na upitnost kakvoće dijela ugrađenog prirodnog kamena, osobito kamenih elemenata žućkasto-smeđe boje, prošaranih tamnijim mrljama i trakama. Na otvorenom prijelomu takvi su se uzorci kamenih elemenata zemljasto osipavali duž mrlja i traka i djelovali neestetski i trošno, odnosno »trulo«. Popločenje je izvedeno kao pješačko-kolnička konstrukcija.

S obzirom da nije bilo poznato jesu li fizičko-mehanička i petrografska svojstva kamena ispitana u Hrvatskoj, te da je ovakav kamen prema nekim saznanjima prvi puta primijenjen u nas, provedena su ispitivanja koja su omogućili djelatnici Cestograđevnog laboratorija Zavoda za prometnice Instituta građevinarstva Hrvatske u Zagrebu. Na zamolbu su na gradilištu dobiveni uzorci kamena za ispitivanja.

Tijekom istraživanja utvrđeno je da su kameni elementi efuzivni varijeteti trahit-trahiandezita porijeklom iz sjeverne Italije, s lokaliteta Colli Euganei u blizini Padove (Slejko et al., 1987).

Na ova istraživanja potaknula su nas neka iskustva stečena tijekom određivanja otpornosti na drobljenje tehničkog građevnog kamena andezita iz Fužinskog Benkovca (Tomašić et al., 1997), kojemu je navedeni kamen iz Italije sličan, te prilikom istraživanja poroznosti u odnosu na strukturno-teksturane i dijagenetske značajke kamena (Tomašić & Ženko, 1993).

Kameni elementi su pripremljeni, obrađeni i izrezani u spomenutom laboratoriju IGH, gdje su ispitana njihova

Key-words: Natural stone, Trachyte-trachytandesite, Physical-mechanical properties, Petrographic properties

Natural stone defined as trachyte-trachytandesite from the locality Colli Euganei near Padua in Italy is built into roadway-pedestrian construction of the Tkalčićeva street in Zagreb. Stone samples were subjected before in-building, to determinations of physical and mechanical properties (density, bulk density, water absorption, porosity, compressive strength, resistance to abrasion, flexural strength, frost resistance and to Na₂SO₄, velocity of ultrasonic propagation, microscopic and X ray analyses and to photographing by electronic microscope). It was found that about 30% in-built stones do not suit to existing criteria on the quality of natural stone. Water absorption and porosity are increased, compressive strength in the water saturated condition is very decreased, the stone is not enough resistant to wear-out and to Na₂SO₄, it is anisotropic and contains swelling clays of the smectite group and numerous defects especially in form of microblocks as consequences of postdiagenetic processes. Although the samples belong to the same rock type, the differences among stone elements are great. Macroscopically material is very heterogeneous. In less qualitative stone samples there are more or less numerous sub-parallel brown and gray partings of the thickness approximately 1–2 mm with enlarged share of secondary iron minerals. Iron oxides and hydroxides mainly impregnate the rock parts, spotty or stripy; somewhere the complete sample is impregnated intensively. The impregnation is intensified by swelling clays and numerous holes along which stone is crumbling.

fizičko-mehanička svojstva. U Zavodu za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta određen je njihovi mineraloško-petrografski sustav. Rendgenske analize izrađene su na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu u Mineraloško petrografskom zavodu, a fotografiranje elektronskim mikroskopom u laboratoriju tvrtke Naftaplin.

Kameno popločenje u Tkalčićevoj ulici izvedeno je kao pješačko-kolnička konstrukcija. Riješeno je u skladu sa suvremenim načinom polaganja koji se danas primjenjuje u urbanom okolišu. Odabran je tip konstrukcije koji se sastoji od nestandardnih kamenih elemenata položenih na podložnom sloju pijeska (3–5 cm) pomiješanom s cementom »na suho« i s dodatkom cementnog mlijeka neposredno prije montaže. Ispod se nalazi sloj dolomitnog drobljenca debljine cca 15 cm, te podložni sloj šljunka debljine do 30 cm.

Kod vanjskih radova izbor kamena je vrlo zahtjevan, posebice s obzirom na poroznost, upijanje vode, otpornost na atmosferilije, značajke urbanog okoliša (kisele kiše), te smrzavanje. Manje su ili veće razlike u svojstvima između kamena silikatnog i karbonatnog sastava. Stoga za izvedbu vanjskih vodoravnih gaznih površina treba odabrati kamen koji je otporan na habanje, otporan na smrzavanje, te otporan na agresivno djelovanje soli za snijavanje u zimskim uvjetima (Crnković & Šarić, 1992).

Posebno treba istaknuti upijanje vode. Opće prihvaćeno je da je za kamen koji se polaže na vanjske vodoravne površine dopušteno upijanje vode manje od

0,5 % mase kamena, a za upijanje vode veće od spomenutog treba pažljivo ocijeniti moguću uporabljivost kamena. Posebice se to odnosi na uvjete kontinentalne klime na području grada Zagreba, koju karakteriziraju topla i vlažna ljeta i hladne zime sa snijegom i ledom na gaznim površinama. Pritom je važno odrediti otpornost prema agresivnom djelovanju soli, a koje nije normirano.

Kamen kojim se popločuju podovi izloženi prometu velikog intenziteta trebao bi imati otpornost na habanje brušenjem manju od $15 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$, posebice ako se podne površine čiste podnim rotirajućim čeličnim četkama, te ako su one istovremeno izložene velikom pješačkom i povremenom kolničkom prometu što je slučaj za navedeni kamen, jer se nalazi u pješačkoj zoni.

Na temelju izloženoga se, u pravilu, za vanjska podna popločavanja koriste različiti kamen silikatnog sastava (graniti, gabri, sijeniti i dr.). U primorskom području gdje praktički nema smrzavanja i potrebe za posipanjem solju, ponajviše se upotrebljava kamen karbonatnog sastava (različiti gusti vapnenci, vapnenačke breče i konglomerati).

Primjena trahita i andezita u graditeljstvu

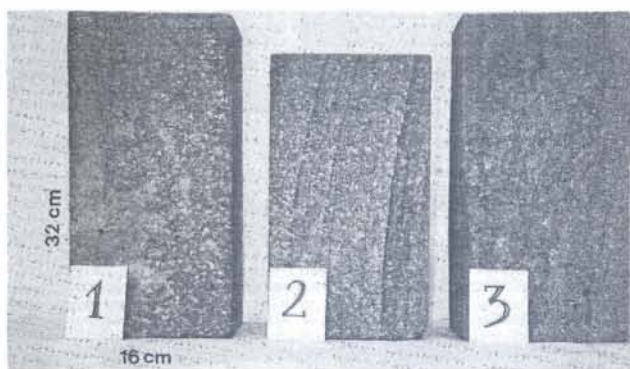
Fizičko-mehanička svojstva efuzivnih stijena, kao i njihove strukture i teksture, vrlo su različita što je posljedica uvjeta njihovog postanka. Primjena efuzivnih stijena slična je primjeni njima ekvivalentnih intruzivnih stijena, premda je u pravilu manje značajna. Iako njihova fizičko-mehanička svojstva mogu biti slična, zbog načina postanka brzim hlađenjem mogu biti i znatno različita, osobito u pogledu poroznosti, jednoosne tlačne čvrstoće, otpornosti na habanje i udarce. Osobito su nepovoljni izrazito portirni varijeteti s krupnim fenokristalima i staklom u osnovi, koji su pretrpjeli hidrotermalne izmjene, zbog čega su redovito oslabljenih fizičko-mehaničkih svojstava.

Kao tehnički građevni kamen mogu se rabiti samo svježije stijene, a ne i hidrotermalno izmijenjene. Kao prirodni kamen koriste se jedino ukoliko su dekorativne i sadrže malo fenokristala te gustu, potpuno kristaliziranu osnovu.

Trahit je neutralna, efuzivna stijena homogene ili fluidalne, a ponekad vezikularne teksture. Neki varijeteti natrijeva trahita sadrže tipične velike kristale sitastog (ili poikilitskog) kalijeveg feldspata sa staklastim rubovima u osnovi koja sadrži sanidin, žuti biotit i opake minerale (Mottana, et al., 1978). Kalijev trahit sadrži feldspatoide (sodalit, nozean, haijin), a napose leucit. Upotrebljava se kao izvrstan materijal za popločavanje jer habanjem ne postaje gladak (izlizan), po kojem je svojstvu i nazvan (grčki trachys znači grub, hrapav). Upotrebljava se i za oblaganje pročelja zgrada.

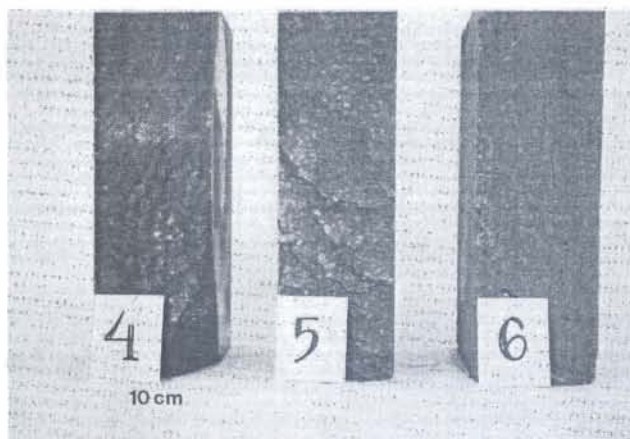
Andezit je neutralna, efuzivna stijena homogene teksture, crnkastosmeđa ili zelenkasta, osobito ukoliko je osnova pretežito staklasta. Opisani su andeziti iz okolice Padove u Italiji (Mottana et al., 1978) koji sadrže jasno vidljive sraslace plagioklasa, lamine korodiranog biotita na čijim su rubovima ponekad segregacije crvenog hematita, te jako korodirani amfibol u djelomično staklastoj osnovi koja sadrži ponekad orijentirane mikrolite plagioklasa tvoreći fluidalni raspored. Upotrebljava se uglavnom kao prirodni kamen.

Prema literaturnim podacima (Gesteinsprüfung DIN DVM 2100, 1939) prostorna masa andezita je između $2,55$ i $2,80 \text{ g/cm}^3$, gustoća $2,58$ i $2,83 \text{ g/cm}^3$, poroznost $0,4$ i $1,8 \text{ vol. \%}$, upijanje vode $0,2$ i $0,7 \text{ mas. \%}$, tlačna čvrstoća između 180 i 300 MPa .



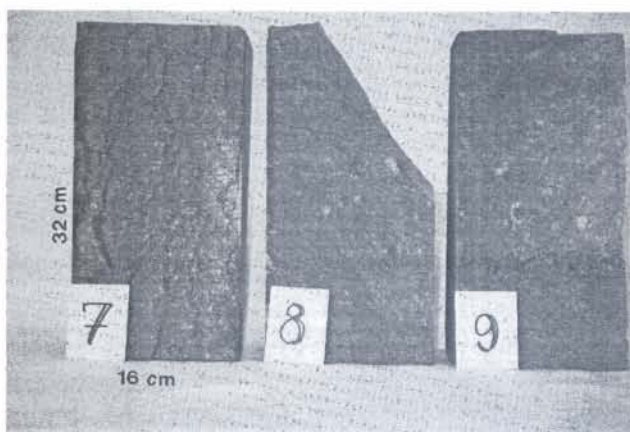
Sl. 1. Kameni elementi 1, 2 i 3 prije izrade uzoraka; prednja strana (gazna površina) s paralelnim trakastim impregnacijama različite širine

Fig. 1. Stone elements 1, 2 and 3 before making samples; front side (walking surface) with parallel stripy impregnation's of different width



Sl. 2. Kameni elementi 4, 5 i 6 prije izrade uzoraka; bočna strana; izražena pukotina na kamenom elementu 6

Fig. 2. Stone elements 4, 5 and 6 before making samples; lateral side; crack expressed on stone element 6



Sl. 3. Kameni elementi 7, 8 i 9 prije izrade uzoraka; prednja strana (gazna površina); izražene impregnacije na kamenom elementu 7

Fig. 3. Stone elements 7, 8 and 9 before making samples; front side (walking surface), impregnation's expressed on stone element 7

Izbor i priprema uzoraka

S gradilišta na lokaciji Tkalčićeve ulice uzeti su uzorci u dimenzija $32 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$, s odstupanjem do 2 cm . Za ispitivanje je odabrano devet varijeteta kamenih elemenata koji su se makroskopski međusobno razli-

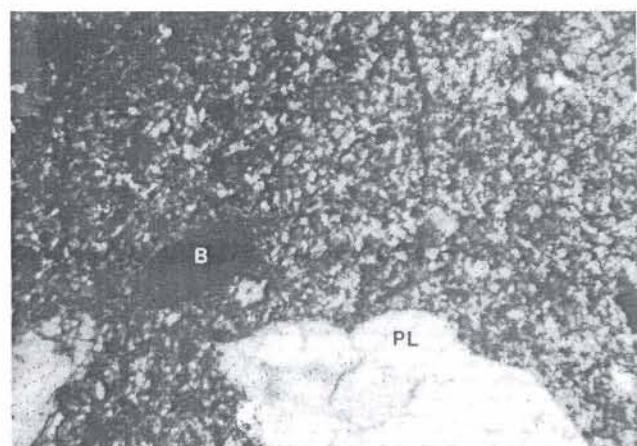
kovali po boji, sadržaju žilica i impregnacija, te količini vidljivih šupljina. Prije rezanja na normirane dimenzije za ispitivanje, 9 kamenih elemenata je fotografski dokumentirano (sl. 1, 2 i 3). Rezanjem je priređeno 85 kocaka dimenzija 5 cm x 5 cm x 5 cm za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće u suhom i vodozasićenom stanju, te poslije smrzavanja. Za određivanje čvrstoće na savijanje priređeno je 16 uzoraka dimenzija 5 cm x 5 cm x 20 cm. Na 6 uzoraka dimenzija 7,07 cm x 7,07 cm x 5 cm određena je otpornost na habanje, a 2 kocke dimenzija 12 cm x 12 cm x 12 cm upotrijebljene su za određivanje brzine prolaza ultrazvučnih valova. Preostala dva kamena elementa poslužila su za ispitivanje s otopinom Na_2SO_4 .

Uzorci su ispitivani prema hrvatskim normama. Prije ispitivanja su očišćeni. Neravnine nastale pri rezanju su izbrušene. Osušeni su pri 105 °C do stalne mase. Određena je masa uzoraka u suhom stanju, a nakon zasićenja vodom masa u vodozasićenom stanju, te masa pod vodom. Slijedilo je određivanje upijanja vode, prostorne mase i poroznosti, te gustoće i jednoosne tlačne čvrstoće u suhom stanju, vodozasićenom stanju i nakon 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Nakon određivanja čvrstoće na savijanje, određena je postojanost u otopini Na_2SO_4 , zatim otpornost na habanje struganjem, te brzina prolaza ultrazvučnih valova.

Za mineraloško-petrografska istraživanja izrađeni su mikroskopski preparati, priređeni su uzorci za elektronski mikroskop, a iz pukotina je izvađen materijal za rendgenske analize.

Rezultati mineraloško-petrografskih istraživanja

Kameni elementi kojima je popločen dio Tkalčičeve ulice makroskopski su heterogen materijal, što je zapaženo već prilikom ugradnje. Premda pripadaju istoj vrsti stijene, razlike među pojedinim elementima su velike. Osobito su jasne razlike u boji (od svijetlosive do crvenkastosmeđe, žućkastosmeđe i smeđe), količini i debljini žilica ispunjenih sekundarnim materijalom, te u količini i dimenzijama šupljina (od vrlo sitnih, jedva zamjetnih, do onih dužine ili promjera i do 13 mm).



Sl. 4: Uzorak 4; granica impregniranog i neimpregniranog trahiandezita; plagioklas (PL), biotit (B); +N; širina fotografije 3,3 mm.

Fig. 4. Sample 4; border between impregnated and unimpregnated trachyandesite; plagioclase (PL), biotite (B); +N; photography wide 3,3 mm

Uzorci bez šupljina ili s malom količinom sitnih šupljina su u pravilu svijetlosivi i glatke površine, dok su uzorci s velikim brojem šupljina žućkasto do crvenkastosmeđasto obojeni i hrapave površine.

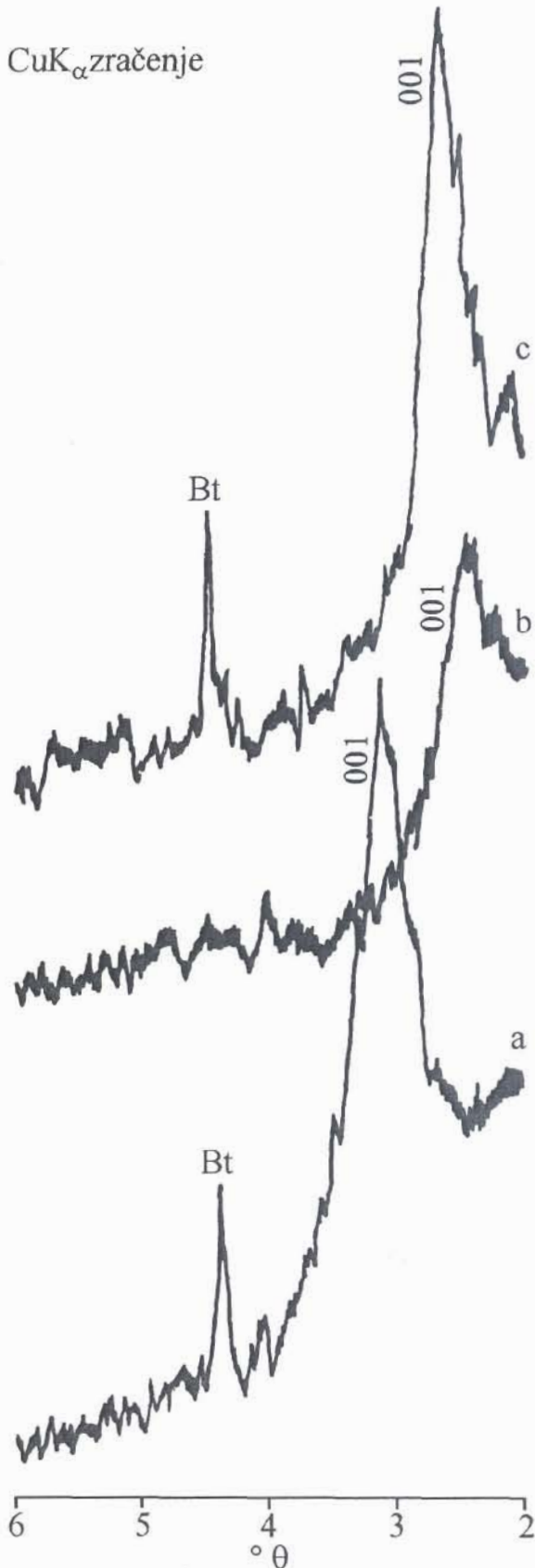
Mikroskopskim je istraživanjem zapaženo da su mineralni sastav, struktura i kristalinitet svih istraženih uzoraka slični. Određeni su kao trahiti i trahiandeziti. Porfirne do glomeroporfirne strukture obilježavaju fenokristali sanidina, plagioklasa, biotita i klinopiroksena, različitih dimenzija, od vrlo sitnih do onih veličine 5 mm x 6 mm. Zastupljenost fenokristala je različita. Općenito prevladavaju krupniji salski sastojci nad sitnijim femskim sastojcima. Među salskim sastojcima su najobilniji sanidin i plagioklasi. Zapažen je i mikroklin čiji je udio znatno manji od ostalih feldspata. U uzorcima trahita je udio alkalijskog feldspata sanidina prevladavajući, dok su u uzorcima trahiandezita alkalijski feldspati i plagioklasi podjednako zastupljeni. Sporedni su sastojci titanit i kvarc. U sitnozrnastoj holokristalnoj osnovi stijene nalaze se štapičasti feldspati, apatit, kalcit, magnetit i minerali iz skupine epidot-coisita.

Sanidini su mjestimično zonalne građe, pretežito svježe površine, a tek se ponegdje u subparalelnim ili nepravilnim pukotinama kojima su ispresijecani, zapaža malobrojni sekundarni sericit. Sadrže mnogo uklopaka među kojima su brojni igličasti apatiti. Neutralni plagioklasi su pretežito polisintetski sraslaci po albitnom zakonu. Sadrže sitne različite uklopke, a u pukotinama zrna nalaze se malobrojni produkti izmjene. Mikroklini su tipične rešetkaste građe sraslačkih lamela po albitnom i periklinskom zakonu. Presjeci biotita su jako pleokroitični, redovito korodiranih rubova na kojima su nagomilani sitnozrnasti agregati magnetita, a magnetit je uklopljen i u biotitu. Većinom su raspucani i na rubovima slabije ili jače savijeni. Malobrojni klinopirokseni različitih dimenzija su slabo obojeni, relativno svježi, ali jako raspucani. U nekim uzorcima imaju izgled malih sivozelenih krhotina. Samo ponegdje se u njima zapažaju sekundarni produkti izmjene. Izmjereni kut kosog potamnjenja ukazuje na augite (Nesse, 1991). Presjeci titanita su vrlo sitni, alotriomorfni i žućkasti, slabog pleokroizma, na rubovima izmijenjeni u leukoksen. Kvarc je pretežito prisutan u osnovi, a tek ponegdje se zapaža presjek dimenzija sitnijih fenokristala. Presjeci idiomornih do alotriomornih magnetita rasuti su po čitavoj stijeni s većom koncentracijom u rubnim dijelovima korodiranih presjeka biotita.

Za razliku od sličnih mineralnih sastava, struktura i kristaliniteta svih uzoraka kamenih elemenata, jasne su razlike među pojedinim uzorcima u intenzitetu impregniranosti željezovitom tvari, raspucanosti, te broju i veličini šupljina. U nekim se uzorcima nalaze manje ili više brojni subparalelni smeđi i sivi proslojci debljine približno 1–2 mm gdje je povećana koncentracija sekundarnih minerala željeza. Željezovi oksidi i hidroksidi manje ili više impregniraju mrljasto ili trakasto dijelove stijene, a ponegdje je intenzivno impregniran i čitav uzorak. Uz brojne nakupine u osnovi stijena, minerali željeza ispunjavaju većinu pukotina u fenokristalima. U uzorcima u kojima se kao brojni »proslojci« nižu povećane koncentracije sekundarnih minerala željeza i veći broj šupljina, fenokristali su uslijed impregnacija crvenkasti, alterirani i obrubljeni smeđecrvenim rubom sekundarnih minerala.

Impregniranje stijene željezovitom tvari uslijedilo je nakon njezinog formiranja i nejednoliko zahvatilo stjenjski masiv.

U nekim je izbruscima vidljiv kontakt impregniranog i neimpregniranog dijela stijene (sl. 4). Granična neravna linija zahvaća dijelove osnove i fenokristale, a sva su ostala obilježja stijene u oba dijela jednaka. Na



Sl. 6. Relativno svjež trahandezit tektonski razlomljen; jasno odvojeni ali još uvijek povezani mikroblokovi i međukristalna poroznost (snimak elektronskim mikroskopom)

Fig. 6 f Relatively fresh tectonically broken trachyandesite; clearly separated but still connected microblocks and intercrystal porosity



Sl. 7. Trošni varijetet trahandezita; vrlo izražene mikropukotine i mikroblokovi s tragovima minerala glina (snimak elektronskim mikroskopom)

Fig. 7. Weathered variety of trachyandesite; very expressive microcracks and microblocks with the traces of clay minerals (taken with electron microscope)

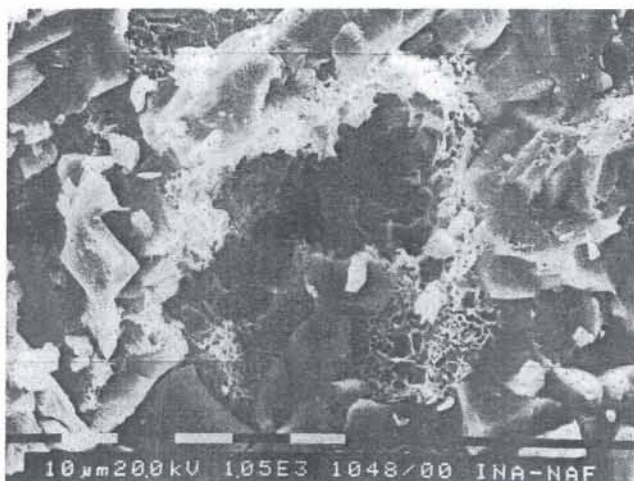
samoj je granici ponegdje povećana koncentracija minerala željeza.

Izgledom najtrošnija stijena izrazito je crvenkasta i hrapava s velikom količinom šupljina razvedenog oblika dimenzija i do 10 mm x 5 mm. U toj su stijeni gotovo sve pukotine i u fenokristalima i u osnovi ispunjene oksidima i hidroksidima željeza, a sama osnova je intenzivno njima impregnirana.

Uz navedena obilježja koja čine kameni materijal heterogenim, zapaženi su u nekoliko uzoraka i različiti ksenoliti magmatskih stijena. Neki pripadaju porfirnoj stijeni koja sadrži manju količinu fenokristala sitnijih od onih u opisanim uzorcima, te obilni češljasti ilmenit u

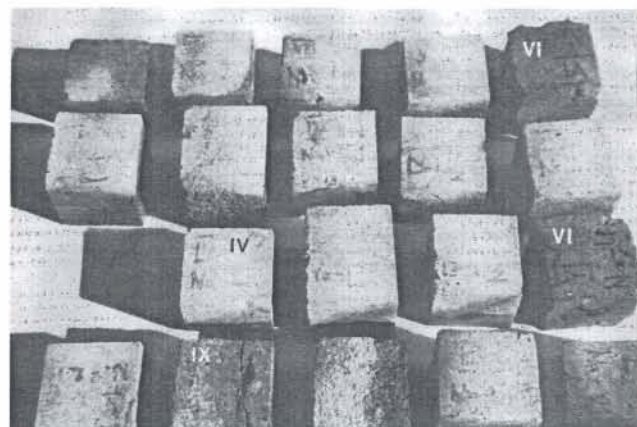
Sl. 5 Difraktogrami praha s vidljivim pomakom 001 difrakcijskog maksimuma smektit: a) prirodni uzorak; b) uzorak zasićen s Mg i tretiran s glicerolom; c) uzorak zasićen s Mg i bubren s etilenglikolom. Bt=biotit.

Fig. 5. X ray diffraction powder patterns showing apparent moving of 001 diffraction maximum of smectite: a) natural sample; b) Mg - saturated sample treated with glycerol; c) Mg - saturated sample swelled with ethylene glycole. Bt = biotit.



Sl. 8. Trošni trahandezit u pornom prostoru sadrži jasno izražene bubreće minerale glina iz skupine smektita (snimak elektronskim mikroskopom).

Fig. 8. Weathered trachyandesite in pore space contains clearly expressed swelling minerals of clay from smectite group (taken with electron microscope)



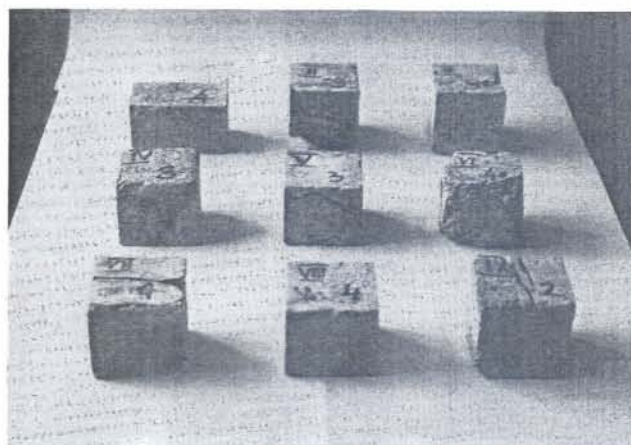
Sl. 9. Uzorci nakon 5-og ciklusa određivanja postojanosti na mraz uporabom otopine Na_2SO_4 ; jače izraženo proširenje postojeće pukotine na uzorku 9 i proširenje šupljina na uzorku 6.

Fig. 9. Samples after the 5th cycle of determining frost resistance using the solution Na_2SO_4 , more explicitly expressed widening of the existing crack on sample 9 and widening of cavities on sample 6.

osnovi. Drugi pripadaju šupljikavoj porfirnoj stijeni koja sadrži relativno krupne fenokristale kalcitiziranog klinopiroksena, te brojne presjeka sitnih feldspata, kvarc, biotita, magnetita i iglice apatita. Na nepravilnim kontaktima ksenolita i trahit-trahandezita nisu zapažene kontaktne promjene. U nekim su uzorcima zapažene i malobrojne nodule promjera do 3 mm koje sadrže feldspate i kvarc.

Mineralni sastav četiriju makroskopski različitih varijeteta koji su se razlikovali prvenstveno po boji, određen je kvalitativnom metodom difrakcije rendgenskih zraka na praškastim uzorcima Philipsovom vertikalnim goniometrom uz uporabu Cu-cijevi čije je zračenje monokromatizirano grafitnim monokromatorom.

Uz primarne uzorke, nakon bubrenja s etilen glikolom i glicerolom snimljen je tamno sivi uzorak, na čijem je difraktogramu bio najljepše izražen difrakcijski maksimum na približno 14Å , i to nakon što je tretiran dva dana s 1M otopinom MgCl_2 pri temperaturi do 80°C . Rezultati kvalitativne rendgenske fazne analize pokazali su da su uz minerale koji su određeni mikroskopom u uzorku prisutni i bubreći minerali glina iz skupine smek-



Sl. 10. Uzorci nakon 10-og ciklusa određivanja postojanosti na mraz uporabom otopine Na_2SO_4 ; izrazit gubitak mase po rubovima na uzorku 6; uzorak 9 raspadnut po pukotini.

Fig. 10. Samples after the 10th cycle of determining frost resistance using the solution Na_2SO_4 ; expressive loss of mass on edges on sample 6; sample 9 disintegrated along the crack.

tita. Na njihovu prisutnost osim difrakcijskog maksimuma na približno 14Å , vidljivog na difraktogramu izvornih uzoraka ukazuje i pomak tog maksimuma na $16,9\text{Å}$ nakon tretmana s etilenglikolom, odnosno pomak maksimuma na $18,1\text{Å}$ nakon obrade s glicerolom (sl. 5). Osim navedenog lijepo izraženog maksimuma na 14Å na difraktogramima nisu vidljivi drugi maksimumi koji bi se mogli pripisati smektitu, dakle nisu opažene niti hk difrakcijske vrpce niti viši redovi bazalnih refleksa. Prisutnost minerala glina iz skupine smektita objašnjava loše značajke ispitivanog kamena zbog poznatog svojstva tih minerala da na sebe vežu promjenjivu količinu vode, koju ugrađuju među T-O-T pakete, pri čemu bubre tj. povećavaju volumen.

Uzorci kamena snimljeni su i elektronskim mikroskopom. Uzorak na sl. 6 prikazuje relativno svježi trahandezit s brojnim mikroblokovima koji su još uvijek relativno cjeloviti, dobro povezani deformirani kristalni agregati s naznakama oštro izražene međukristalne poroznosti. Posljedica su postdijagenetskih procesa posebice tektonskih naprezanja i deformacija kamena.

Uzorci na slikama 7 i 8 odnose se na trošne varijetete trahandezita s vrlo izraženim mikropukotinama i porama duž kojih se uočavaju tragovi minerala glina od kojih onaj na sl. 8 (povećanje $1050\times$) u pornom prostoru sadrži bubreće minerale glina iz skupine smektita koji su utvrđeni i rendgenskom analizom.

Rezultati određivanja fizičko-mehaničkih svojstava i brzine ultrazvučnih valova

Numeričke srednje vrijednosti navedenih ispitivanja prikazane su tablicom 1. U njoj su prikazane i navedene srednje vrijednosti rezultata laboratorijski ispitivanih fizičko-mehaničkih svojstava kamena kao i rezultati mjerenja brzine prolaza ultrazvuka.

Pri određivanju postojanosti uporabom otopine Na_2SO_4 na uzorcima su, nakon petog ciklusa, zapažene promjene boje kamena u smeđu, osipavanje i proširenje postojećih prslina (sl. 9). Na uzorcima 1 i 5 nisu bile vidljive bitne promjene, dok su uzorci 6 i 9 izrazito promijenjeni u smislu otkidanja dijelova kamenih kocaka na dodir, promjene boje u jaču smeđu i proširenja postojećih pukotina i šupljina. Uzorak 9 gotovo se potpuno raspao duž postojeće pukotine. Boja kamena se promijenila u smeđu na uzorcima 1 i 5, te na uzorcima 4, 7 i 8. Osipavanje pri trljanju

Tablica 1. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja uzoraka
Table 1. Mean values of the results from sample testing

Broj kamenog elementa Number of stone element	Prostorna masa i upijanje vode (g/cm ³ /mas. %) Bulk density and water absorption (g/cm ³ /mass %)	Postojanost na Na ₂ SO ₄ (gubitak u mas. %) Stability to Na ₂ SO ₄ (mass loss %)	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa) S-V-M One-axial compressive strength (MPa) D-W-F	Habanje po Böhme-u u suhom stanju (cm ³ /50 cm ²) Resistance to abrasion (Böhme) in dry condition (cm ³ /50 cm ²)	Gustoća (g/cm ³) Density (g/cm ³)	Poroznost (%) Porosity (%)	Čvrstoća savijanja (MPa) Flexural strength (MPa)	Ultrazvuk (m/s) Ultrasonic method (m/s)
1	2,444/1,94	–	179–134–106	15,0	2,666	8,4	19,3	3993
2	2,418/2,62	0,99	169–100–116	20,3	2,656	9,0	–	4010/3901
3	2,392/2,68	1,10	164–101–97	20,2	2,639	9,4	16,5	–
4	2,431/2,27	0,52	185–107–111	18,7	2,654	8,4	12,5	–
5	2,472/2,34	0,42	180–114–115	16,6	2,651	6,4	15,4	–
6	2,309/3,79	6,00	86– 52– 50	33,6	2,652	12,9	–	–
7	2,412/2,73	1,64	151– 91– 93	–	2,654	9,1	14,9	–
8	2,417/2,57	0,77	169– 80– 84	–	2,658	9,1	15,5	–
9	2,335/3,58	1,80	141– 56– 68	–	2,645	11,7	–	–

S – suho stanje
D – dry condition

V – vodom zasićeno stanje
W – water saturated condition

M – poslije smrzavanja
F – after freezing

prstima zapaženo je na uzorcima 2, 3, 4, 7 i 8, a proširenje postojećih prslina na uzorcima 4 i 5.

Nakon završetka desetog ciklusa uzorci su, u svrhu odstranjivanja zaostalog natrijevog sulfata, isprani u toploj vodi, osušeni pri 105 °C i izvagani, te je zabilježen gubitak mase u gramima i postocima. Promjene, zapažene nakon petog ciklusa, primijećene su i nakon završetka ispitivanja. Uzorci kamenog elementa 9 su se pri dodiru potpuno raspali duž postojećih pukotina. Djelovanje otopine Na₂SO₄ na uzorke vidljivo je na fotografiji (sl. 10).

Diskusija i zaključak

Svrha prikazanih istraživanja bila je određivanje mineraloško-petrografskih i fizičko-mehaničkih svojstava prirodnog kamena kojim je popločena pješačko-kolnička konstrukcija dijela Tkalčičeve ulice u Zagrebu. Varijetet upotrijebljenog kamena se do sada u nas nije koristio, pa su podaci o navedenim svojstvima novi.

Veći dio ugrađenog kamena je homogen. Kod dijela kamenih elemenata (oko 30%) zapaža se veća ili manja heterogenost građe. To se posebno odnosi na značajke uzrokovane prije svega naprezanjima i deformacijama uslijed singenetskih i postgenetskih procesa.

Upotrijebljeni nestandardni kameni elementi uglavnom su svijetlosivi do smeđesivi, dijelom žučkastosmeđi. Na nekim se elementima jasno vidi granica između sivog i smeđeg dijela. Ponekad su granice nepravilne, a ponekad vrlo pravilne. Na nekim se heterogenim kamenim elementima sivi i smeđi dijelovi izmje-njuju kao paralelni nizovi. Duž takvih zona kamen se lakše cijepa ili lista. Zapaženo je da su kameni elementi pretežito ugrađivani na način da su paralelno orijentirani dijelovi kamena različite boje okomiti na gaznu površinu. O tim se značajkama dakle vodilo računa pri piljenju i obradi pojedinih kamenih elemenata, što je, s obzirom na navedene nehomogenosti, povoljnije od ugradnje u pješačko-kolničku konstrukciju paralelno – »po daski«. Na nekoliko mjesta gdje su kameni elementi ugrađeni »po daski« uočeno je izrazito ljuskanje i osipavanje gaznih površina kamena neposredno nakon ugradnje.

Velike su razlike u količini i debljini pukotina ispunjenih sekundarnim materijalom, a osobito u količini i dimenzijama okruglih i izduženih šupljina. Presjeci šupljina su od jedva vidljivih do veličine približno 13 mm. Zapaženo je da su uzorci bez šupljina ili s malom količinom šupljina u pravilu svijetlosivi i glatke površine, a uzorci s velikim brojem šupljina žučkasti do crvenkastosmeđi i vrlo hrapave površine.

Uzorci pripadaju neutralnim efuzivnim stijenama, vjerojatno iz istog ležišta –kamenoloma, i imaju sličan mineralni sastav, te slične strukture uz manje varijacije udjela pojedinih sastojaka. Sadrže krupnije bijele i sitnije tamne fenokristale različitih dimenzija. Strukture su pretežito porfirne s obilježjima glomeroporfirne, tj. fenokristali su ponegdje prisutni kao nakupine koje sadrže bilo istovrsne, bilo raznovrsne minerale. Osnova stijene je holokristalina. Razlika u krupnoći fenokristala u odnosu prema matriksu je jedno od bitnijih strukturnih svojstava koje znatno utječe na fizičko-mehanička svojstva kamena, osobito na čvrstoću i tvrdoću.

Mineralni sastav uzoraka je sličan. Među fenokristalima najzastupljeniji su sanidin, plagioklas i biotit, a manji je udio klinopiroksena, mikroklina i magnetita. Ostali sastojci su apatit, titanit i kvarc, te sekundarni oksidi i hidroksidi željeza, leukoksen, sericit, kalcit i minerali iz skupine epidot-coisita. Presjeci fenokristala svih mineralnih vrsta su relativno svježiji s malobrojnim alteracijama i sekundarnim sastojcima, pretežito u pukotinama minerala, osim što su neki uzorci manje, a neki više impregnirani željezovim oksidima i hidroksidima koji prvenstveno ispunjavaju pukotine i prsline, te migriraju stijenom duž fronte nepravilnih kontura.

Uzorci kamenih elemenata broj 2, 3, 6 i 7 su determinirani kao trahiti, a uzorci kamenih elemenata broj 1, 4, 5 i 8 kao trahiandeziti. S obzirom na slična ostala petrografska svojstva i relativno krupne fenokristale i njihove nakupine veličine presjeka i do 8 mm, moguće je da svi uzorci pripadaju istom stjenskom masivu, a da je mikroskopskim izbruskom za pojedini uzorak zahvaćena veća odnosno manja količina jedne ili druge vrste feldspata.

Slične su stijene opisane u Italiji u području Venecije (Veneto regija) između jezera Garda i rijeke Brenta (De Vecchi et al., 1995; Milani et al., 1999). U tom je području u razdoblju od paleocena do oligocena ustanovljeno desetak odvojenih i kratkotrajnih faza magmatske aktivnosti u kojima je lava ispunila pretходно formiranu strukturu plitkih magmatskih ćelija, polugraba, čemu autori pripisuju varijabilnost stijena tog područja. Polugrabe su formirane intenzivnom tektonikom, a u svakoj od njih je proces frakcione kristalizacije bio različit. Pretpostavlja se i moguća različita ishodna magma nastala iz različitih izvora u omotaču nejednakog stupnja parcijalnog taljenja, a na konačni sastav stijena mogla je utjecati i kontaminacija od strane stijena kore kroz koje se magma probijala, kao i djelovanje morske vode, jer su autori magmatsku aktivnost donjooligocenske starosti opisali kao subvulkanisku (submarinsku i kopnenu), a magmatska tijela kao oblike slične lakolitima, dajkovima i tokovima lave. Magma aktivnost je rezultat ekstenzije predgorja južnih Alpa, pravcem istok-zapad, kao posljedica kompresije Alpa pravcem sjever – jug u završnoj fazi alpske orogeneze. Autori su utvrdili da u Veneto regiji prevladavaju bazične stijene, a jedino se u krajnjem jugoistočnom dijelu, na području Colli Euganei, nalaze diferencirane kiselije stijene, slične stijenama opisanim u ovom radu. Autori navode da prevladavaju porfirne strukture koje su često glomeroporfirne, a među fenokristalima spominju amfiboole, klinopiroksene sastava salita i augita, plagioklase sastava andezina, sanidin i biotit, te kao mikrofenokristale titanomagnetit. Po svom sastavu, osobito po sastavu mikroelemenata, smatraju stijene tipičnima za neorogeno tektonsko područje unutar ploče.

Spomenuta tektonika na području Colli Euganei, a s kojeg je lokaliteta dobiven u ovom radu opisani kameni materijal, zahvatila je stjenski masiv i proizvela naprezanja i deformacije, te uzrokovala kasnije formiranje spomenutih impregniranih zona. Tektonskim pokretima su u stjenskom masivu oslabljene međukristalne veze, te formirane mikropukotine i makropukotine širine od mikrometarskih dimenzija do nekoliko milimetara, što je olakšalo prolaz hidrotermalnim otopinama. Na tektonsku aktivnost ukazuju optičke anomalije (undulozno potamnjene minerala), savijeni rubovi mineralnih presjeka, osobito biotita, segmentacija i usitnjavanje minerala, mozaična struktura zrna i mehanički sraslaci. Često plagioklasi, osobito nakupine plagioklase, imaju nepravilne granice kao posljedicu dinamičke rekristalizacije koja je uzrokovana deformacijom stijene (Passchier et Trouw, 1996). Dakako da se sve to odrazilo na ukupno povećanje poroznosti a time i upijanja vode u kamenu, odnosno u kamenim elementima.

Dijelovi mikroskopskih izbrusaka impregnirani sekundarnim željezovim oksidima i hidroksidima sadrže jače izražen sustav pukotina koje su osobito vidljive na presjecima krupnijih fenokristala. Ponegdje pojas impregnacije zahvaća samo dio fenokristala i taj je dio jače raspucan od preostalog dijela presjeka. U promatranim izbruscima nije uočena pravilnost u odnosima dimenzija sastojaka i raspodjele impregnacija.

Na temelju petrografskih istraživanja i određivanja fizičko-mehaničkih svojstava zapaženo je da fizičko-mehanička svojstva ovise o broju šupljina i stupnju impregniranosti kamenih elemenata željezovim oksidima i hidroksidima. Posebno je važna njihova učestalost, nakupljanje i zoniranje različitog stupnja nehomogenosti odnosno anizotropije.

Kakvoća ispitivanog kamena ocijenjena je na temelju laboratorijskih određivanja.

Poroznost je velika kod svih uzoraka i varijeteta. Kod sivih varijeteta trahita i trahandezita ona iznosi 8,4%, dok je kod ostalih obojenih uzoraka kamena u granicama od 6,4 do 12,9% (tab. 1), a raste s porastom udjela željezovite komponente. Iznenaduje činjenica da se sivi varijeteti s obzirom na poroznost najmanje razlikuju od ostalih uzoraka kod kojih je prosječna vrijednost 9,5%. Kod upijanja vode te su razlike za 50 do 100% veće u odnosu na sivi varijetet. Ova činjenica ukazuje na znatno veću povezanost pora kod obojenih varijeteta kamenog materijala. Pretpostavlja se da su pore u sivom varijetetu izolirane, što je jedno od njegovih povoljnih fizičko-mehaničkih svojstava.

Upijanje vode je najmanje kod sivog varijeteta kamena koji je prema gruboj procjeni zastupljen u pješačko-kolničkoj konstrukciji s približno od 60 do 70%. U granicama je između 1,86 i 2,09 mas. % (u tablici su prikazane srednje vrijednosti za pojedine uzorke). Kod žućkastosmedih i smeđih varijeteta upijanje vode je u granicama između 1,87 i 3,98 mas. % (u tablici su prikazane srednje vrijednosti). Ovako veliko upijanje vode (dopušteni iznos je 0,5 mas. %), kao i velike varijacije upijanja vode, ukazuju na veliku poroznost i nehomogenost dijela ispitivanog kamena.

Pri određivanju *postojanosti na djelovanje otopine natrijeva sulfata* kroz deset ciklusa sivi varijetet nije imao gubitak mase (uzorak 1), dok je za obojene varijetete gubitak iznosio od 0,42 do 6,0%. Najveći je gubitak mase kod uzoraka iz kamenog elementa 6 koji je i po ostalim svojstvima najlošije kakvoće. Nakon pet i deset ciklusa uočena je promjena osnovne boje uzoraka kamena. Bijeli i sivi uzorci postali su žućkasti i smeđasti i obojili su prethodno bezbojnu i bistru otopinu sulfata žutosmede.

Tlačna čvrstoća je zadovoljavajuća za većinu ispitivanih uzoraka u suhom stanju i iznosi od 141 do 185 MN/m². Izuzetak je uzorak 6 (86 MN/m²). Ustanovljen je veliki pad tlačnih čvrstoća u *vodozasićenom stanju* u odnosu na vrijednosti u suhom stanju. Smatra se da je kamen pogodan za ugradnju u konstrukcije sličnog tipa ako mu je koeficijent razmekšavanja uslijed upijanja vode veći od 0,7 (omjer između tlačne čvrstoće u vodozasićenom stanju prema čvrstoći u suhom stanju). Prema ovom kriteriju sivi varijetet, za koji je srednja vrijednost koeficijenta razmekšavanja 0,75, je jedini koji zadovoljava navedenu vrijednost omjera. Ostali uzorci imaju znatno niže koeficijente razmekšavanja (od 0,40 do 0,63) što je za navedenu namjenu kamena vrlo loše.

Otpornost na habanje po Böhmeu brušenjem najpovoljnija je kod sivog varijeteta kamena (15 cm³/50 cm²), dok je kod ostalih uzoraka u granicama od 16,6 do 33,6 cm³/50 cm². Prema nekim saznanjima preporuča se da ona bude manja od 15–16 cm³/50 cm², a kriterij za izbor kamena za ovakav tip pješačko-kolničkih konstrukcija s obzirom na otpornost na habanje nije utvrđen. Habanje je ispitano samo na prvih šest uzoraka kamena.

Brzine prolaza ultrazvučnih valova ispitane su zbog utvrđivanja stupnja nehomogenosti (anizotropije) zapažene u obliku izmjene i nizanjanja sivih neizmijenjenih i žućkastosmedih željezovim sekundarnim mineralima impregniranih dijelova kamena. Izmjerene su brzine prolaza ultrazvučnih valova u dva pravca na relativno zdravim uzorcima. Duž nizanjanja spomenutih obojenih uzoraka dobivena je vrijednost od 4010 m/s, a poprečno na njih 3901 m/s. Ovi podaci jasno ukazuju na nehomogenost i nepovoljan utjecaj impregniranih zona, te na postojanje znatnih dislokacija među kristalima.

Otpornost na smrzavanje je ispitana s 25 ciklusa smrzavanja. Tijekom ispitivanja nisu zapažene promjene koje bi ukazivale na negativan utjecaj mraza.

Tijekom ispitivanja utvrđeno je da najlošija fizičko-mehanička svojstva ima uzorak broj 6, a sličan mu je uzorak broj 9. Najnepostojaniji je pri tretiranju s otopinom Na_2SO_4 (5 do 6 puta veći gubitak od ostalih uzoraka), ima povećano upijanje vode (3,79 mas %), slabu jednoosnu tlačnu čvrstoću (2 puta manje vrijednosti od ostalih uzoraka), vrlo slabu otpornost prema habanju ($33,6 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$), te veliku poroznost (12,9%). Oba su uzorka potpuno impregnirana željezovim sekundarnim mineralima koji ispunjavaju čitavu osnovu, te sve pukotine u kamenu i mikropukotine u mineralima, a uzorci obiluju pukotinama i šupljinama čiji je promjer ponegdje i 5 mm. Već pri dodiru prstima, te pri rezanju i pripremi kamenih elemenata za ispitivanje, oni su se raspadali.

Najbolja su fizičko-mehanička svojstva kamenog uzorka broj 1 koji je svijetlosiv, bez značajne količine šupljina i bez impregnacija željezovim sekundarnim mineralima. Ima najmanje upijanje vode (1,94 mas. %), najveću čvrstoću u vodozasiceanom stanju (134 MN/m^2), najveću otpornost prema habanju brušenjem ($15,0 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$), kao i najveću čvrstoću na savijanje ($19,3 \text{ MN/m}^2$).

Na temelju provedenih ispitivanja, te vremenski relativno kratkog opažanja na pješačkoj konstrukciji, može se zaključiti da dio odabranog i ugrađenog prirodnog kamena, trahit-trahandezita, ne zadovoljava u potpunosti brojne spomenute kriterije koji su općeprihvaćeni u kamenarstvu i graditeljstvu pri ocjeni upotrebljivosti.

Jedna od malobrojnih pretpostavljenih povoljnih značajki kamena, uz povoljan koeficijent razmekšavanja, je prisutnost veće količine zatvorenih pora nedostupnih vodi u sivom varijetetu (uzorci kamenog elementa 1). Međutim, i uz tu pretpostavku upijanje vode je veće od dozvoljenog. Obojeni varijeteti kamena nikako ne zadovoljavaju uvjete ugradnje i opterećenja vezane za endogene i egzogene faktore trošenja koji se predviđaju na mjestu ugradnje.

Analizom rezultata navedenih istraživanja i ispitivanja može se zaključiti da u ovom radu opisane magmatske neutralne efuzivne stijene, trahit-trahandeziti, upotrijebljeni za vanjsko vodoravno podno popločenje, nisu jednakovrijedan prirodan kamen. Velike su razlike u kakvoći pojedinih kamenih elemenata. Osobito treba razlikovati jedar kamen od onoga koji sadrži brojne šupljine, pukotine i impregnacije. Povećana količina pora i pukotina u većini varijeteta ispitivanog kamena vjerojatno je djelomice posljedica singenetskih procesa gubitka lakohlapljivih sastojaka tijekom očvršćivanja stijena, a djelomice, osobito kod obojenih varijeteta, tektonskih naprezanja i djelovanja hidrotermalnih otopina koje su migrirale predisponiranim dijelovima stjenkog masiva duž pukotina nastalih tektonskim naprezanjima i uzrokovale promjenu sastava stijena u smislu povećane impregnacije željezovim sekundarnim mineralima, a smeđom i žućkastosmeđom bojom se vrlo jasno razlikuju od svježeg, sivog trahita i trahandezita. Loše značajke dijela ispitivanog kamena objašnjava i prisutnost minerala glina iz skupine smektita zbog poznatog svojstva tih minerala da na sebe vežu promjenjivu količinu vode, koju ugrađuju u T-O-T pakete, pri čemu bubre, tj. povećavaju volumen.

Nepovoljna je okolnost za dalji tijek trošenja kamena lokacija ugradnje i njezin pješačko-kolnički značaj. Tkalčićeva ulica se nalazi u strogom centru grada Za-

greba. Iako nije osobito prometna u smislu prometa osobnih vozila, jedna je od najfrekventnijih lokacija u gradu s obzirom na veliki broj ugostiteljskih objekata i trgovina s intenzivnim pješačkim prometom. Stoga se u zimskom razdoblju obilato posipa solju. Lupom su u kamenim elementima duž stijenki pora zapaženi sitni, ponegdje gusto zbijeni kristalici bezbojnih minerala, možda halita. Naime, povećani bočni i uzdužni nagibi zimi zaledene pješačko-kolničke konstrukcije zahtijevaju, radi sprečavanja sklizanja, obilno posipavanje solju.

U dekorativnom smislu opisani kameni materijal ima na urbanoj površini, pješačko-kolničkoj konstrukciji, najbolji izgled poslije kiše ili pranja, kada je čist i suh. Tada do punog izražaja dolaze sve nijanse boje, siva, žućkastosmeđa i crvenkasta, kao i strukturno-teksturna obilježja s fenokristalima izrazito različite boje od boje osnove stijene. Nažalost, kameni materijal je s obzirom na svoju poroznost najčešće prljav i siv, jer se na njegovoj grubo hrapavoj gaznoj površini, koja je obrađena mehanički štokanjem, zadržavaju prašina i nečistoće različitog porijekla. Vlažan, ili poslije kiše zasićen vodom, žućkastosmeđi varijetet kamena dugo ostaje taman, gotovo crn.

Danas se, nakon gotovo dvije godine korištenja spomenute kamene konstrukcije u Tkalčićevoj ulici, jasno opažaju promjene u površinskim dijelovima kamenih elemenata. One se prije svega odnose na obojene varijetete. U odnosu na jesen 1998. godine kada je izvedeno popločenje, naziru se oštećenja ponajviše povećanjem broja i veličine presjeka vidljivih pora na gaznim površinama. Pretpostavlja se da je uzrok osipavanje unutrašnjih rubnih dijelova pora. Na mnogo su se mjesta produbile obojene trošne zone, posebice one orijentirane paralelno i dijelom poprečno (okomito) na gazne površine.

Utvrđivanje vremenske postojanosti kamena, posebice ovog, za koji u nas nema iskustvenih podataka, vrlo je delikatno. Vjerojatno će se nakon razdoblja od nekoliko godina korištenja moći s većom sigurnošću ocijeniti u tehničkom pogledu ukupna vrijednost upotrijebljenog kamenog materijala.

Primljeno: 2000-05-09

Prihvaćeno: 2000-09-21

LITERATURA

- Crnković, B. i Šarić, Lj. (1992): Građenje prirodnim kamenom. – RGN fakultet, 184 str., Zagreb.
- De Vecchi G. & Sedea R. (1995): The Palaeogene Basalts of the Veneto Region (NE Italy). *Mem. Sci. Geol.*, 47, 253 – 274.
- Gesteinsprüfung DIN DVM 2100 (1939): Prüfung von Naturstein. DIN DVM 2100 Beuth Vertrieb, Berlin W 15.
- Milani, L., Beccaluva, L. & Coltorti, M. (1999): Petrogenesis and evolution of the Euganean Magmatic Complex, Veneto Region, North-East Italy. *Eur. J. Mineral.*, 11, 379 – 399.
- Mottana, A., Crespi, R. & Liborio, G. (1978): Rocks and Minerals. Simon & Schuster's Inc., 607 p. New York.
- Nesse, W.D. (1991): Introduction to Optical Mineralogy. – Oxford University Press, Inc., 335 p. New York, Oxford.
- Passchier, C.W. & Trouw, R.A.J. (1996): Microtectonics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 289 p. New York.
- Slejko, D., Carulli, G.B., Carraro, F., Castaldini, D., Cavallin, A., Doglioni, C., Illiceto, V., Nicolich, R., Rebez, A., Semenza, E., Zanferrari, A. & Zanolli, C. (1987): Modello sismotettonico dell'Italia nord-orientale. C.N.R., G.N.D.T., Rend. n. 1., Trieste.
- Tomašić, I., Vrkljan, M., & Fistić, M. (1993): Estimation of Resistance of Stone Aggregates to Recrushing. *Rud.-geol.-naft.-zb. Vol. 9*; str. 41–47; Zagreb.
- Tomašić, I. & Zenko, T. (1993): Utjecaj strukturno-teksturnih značajki i dijagenetskih procesa na poroznost arhitektonskog kamena. *Rud.-geol.-naft.-zb. Vol. 5*; str. 165–172; Zagreb.

The Persistence of Trachyte-Trachyandesite Built into Pedestrian-Roadway Construction

I. Tomašić, M. Vrkljan, G. Helinger, M. Bušić and D. Tibljaš

On stone elements of trachyte-trachyandesite by which the restored part of the Tkalčićeva street was paved, some characteristics were noticed indicating the question of quality of the part of in-built natural stone, especially of the yellow-brown stone elements, dappled with darker spots and strips. Paving was performed as pedestrian-roadway construction.

During exploration it was proved, that stone elements originate from the Nord Italy, from the locality Colli Euganei in the vicinity of Padova (Slejko et al., 1987).

Before cutting to standardized dimensions for testing stone elements were photographically documented (Figs. 1, 2 and 3). By cutting, 85 cubes with dimensions 5 cm x 5 cm x 5 cm were prepared to determine one-axial compressive strength in dry and water-saturated conditions and after freezing. To determine flexural strength 16 samples with dimensions 5 cm x 5 cm x 20 cm were prepared. On 6 samples with dimensions 7.07 cm x 7.07 cm x 5 cm, resistance to abrasion was defined, and 2 cubes with dimensions 12 cm x 12 cm x 12 cm were used to determine the velocity of ultrasonic propagation. The remaining two stone elements were used for testing with the solution Na₂SO₄. The samples were tested according to Croatian standards.

Stone elements are macroscopically heterogeneous material. Although they belong to the same rock type, individual elements differ very much. The differences in color are specially clear (from light-gray to red-brown, yellow-brown and brown) as well as those in quantity and thickness of veinlets filled with secondary material, and in quantity and dimensions of small holes (from very tiny ones, hardly noticeable, to those with length or diameter even to 13 mm). Samples without holes and with few tiny holes are in rule light-gray and with even surface, while the samples with a big number of holes are yellowish to red-brownish colored and with rough surface.

In some thin sections the contacts between impregnated and not impregnated rock parts are visible (Fig. 4). Uneven border-line covers both the parts of groundmass and phenocrysts, and all other features of rock are equal in both parts. On the border itself there is somewhere increased concentration of iron minerals.

The results of X-ray phase analysis have proved, that beside the minerals defined by microscope there are also the swelling clay minerals of the smectite group (Fig. 5) which explains bad characteristics of the examined stone.

The stone samples were also taken by electron microscope. The sample on Fig. 6 presents relatively fresh trachyandesite with numerous microblocks, which are still relatively complete, well linked deformed crystal aggregates indicating clearly expressed intercrystal porosity. They are the consequence of postdiagenetic processes, particularly of tectonic strains and deformations of stone.

Samples on Fig. 7 and 8 relate to ruinous varieties of trachyandesite with very expressive microcracks and pores along which there are visible traces of clay minerals of which the one on Fig. 8 (magnification 1050 x) in pore space contains clay minerals from the smectite group found by X-ray analysis, too.

Table 1 illustrates numerical mean values from the results of the laboratory tested physical-mechanical properties of stone as well as the results of measuring the velocity of ultrasonic propagation.

In determination of persistence by using the Na₂SO₄ solution after the fifth cycles, on the samples were noticed changes of stone color into brown, crumbling and widening of existing cracks (Fig. 9). On samples 1 and 5 there were no significant changes visible, while the samples 6 and 9 were explicitly changed in sense of breaking off of the stone cubes parts by touching; color changing into more intensive brown and widening existing fissures and cavities. The sample 9 has almost completely disintegrated along the existing crack. The color of stone has changed into brown on samples 1 and 5, as well as on samples 4, 7 and 8. Crumbling by rubbing with fingers was noticed on samples 2, 3, 4, 7 and 8, and widening of existing cracks on samples 4 and 5. Those changes noticed after the fifth cycles were seen also after the end of examination. The samples of stone element 9 have completely disintegrated along existing cracks by touching. The action of Na₂SO₄ solution on samples is obvious at the photography (Fig. 10).

A larger part of the in-built stone is homogeneous. On the part of stone elements (about 30%) less or larger heterogeneity is noticeable. This refers especially to features caused first of all by strain and deformations due to syngenetic and postgenetic processes.

The used nonstandard stone elements are mostly light-gray to brown-gray, partly yellow-brown. On some elements the boundary between gray and brown parts can be clearly seen. Sometimes the boundaries are irregular and sometimes very regular. On some heterogeneous stone elements gray and brown parts exchange as parallel series. Along such zones stone can be easier split or flocculated. It has been noticed, that stone elements are predominantly in-built in a way, that parallelly oriented stone parts of different colors are vertical to

walking surface. These characteristics were taken into account in sawing and in treatment of individual stone elements, which is, considering the mentioned unhomogeneities, more suitable than inbuilding into pedestrian roadway construction parallel - »on the board«. On some places where stone elements are in-built »on the board«, explicit peeling and crumbling of walking surfaces of stone immediately after inbuilding were noticed.

There are great differences in quantity and thickness of cracks filled with secondary material, especially in quantity and dimensions of round and elongated cavities. The samples without cavities or with few cavities are in rule light gray and with even surface, and the samples with a large number of cavities are yellowish to reddish-brown with very rough surface.

The samples are probably from the same deposits (quarry) and have similar mineral composition and similar structures with smaller variations of share in individual components. They contain bigger white and smaller dark phenocrysts of different dimensions. Structures are predominantly porphyritic with glomerophytic characteristics. The groundmass is holocrystalline. The difference in largeness of phenocrysts when compared with groundmass, is one of more essential structure properties which considerably influences physical-mechanic properties of stone, especially strength and hardness.

Mineral composition of the samples is similar. Among phenocrysts the most frequent are sanidine, plagioclase and biotite, while clinopyroxene, microcline and magnetite have less share in composition. Subordinate are apatite, titanite and quartz and secondary iron oxides and hydroxides, leucoxen, sericite, calcite and minerals of the epidote-zoisite group. Cross-sections of all phenocrysts are relatively fresh with a small number of alterations and secondary components, except that they are differently impregnated with iron oxides and hydroxides, which primarily fill cracks and migrate through the rock along the front of irregular contours.

The samples of stone elements 2, 3, 6 and 7 are determined as trachytes and the stone elements 1, 4, 5 and 8 as trachyandesites. Regarding similar other petrography properties and relatively big phenocrysts and their accumulations in diameter even to 8 mm, it is possible that all samples belong to the same rock massif, and that by microscopic thin section for individual sample a larger or less amount of one or the other feldspar type was seized.

Similar rocks were described in Italy in the Venice area between the Garda Lake and the Brenta River (De Vecchi et al., 1995; Milani et al., 1999).

The mentioned tectonics in the area Colli Euganei, from which locality stone material discussed in this report was taken, spread over the rock massif and produced strains and deformations, and consequently caused later formation of the mentioned impregnated zones. By tectonic movements, intercrystal links were weakened in the rock massif, and crevices were formed with the length of micrometric dimensions to some millimeters, which made easier passing to hydrothermal solutions. Undulatory extinction, bended edges of mineral cross-sections - particularly biotite, segmentation and mineral grambing, mosaic structure of grains and mechanic twins point to the tectonic activity. Plagioclases, especially their accumulations, have often-irregular boundaries as a consequence of dynamic recrystallisation caused by rock deformations (Passchier et Trouw, 1996). Certainly, all this has reflected on the total growth of porosity and therewith on water absorption in stone, that is, in stone elements.

The parts of microscopic thin sections impregnated with secondary iron oxides and hydroxides contain a more explicit system of cracks, which are particularly apparent on the cross-sections of bigger phenocrysts. Somewhere the zone of impregnation covers only a part of phenocrysts and this part is more cracked than the remaining part of the cross-section. In the observed thin sections the regularity in relations among components dimensions and impregnations distribution has not been noticed.

Based on petrographic research and defining physical-mechanical properties it has been observed, that physical-mechanical properties depend on the number of cavities and on the degree of impregnation of stone elements by iron oxides and hydroxides.

Especially important are their frequency, accumulation and zoning of different degree of unhomogeneity, that is anisotropy.

The quality of the tested stone has been evaluated on the basis of laboratory determinations.

Porosity is considerable in all samples and varieties (table 1) and it grows with the increase of iron component. There is a surprising fact, that gray varieties considering porosity differ least from other samples with average value 9.5 %. In water absorption these differences are 50% to 100% greater, compared with the gray variety. It is supposed, that the pores in gray variety are isolated, which is one of favourable physical-mechanical properties of gray stone variety.

Water absorption is the slightest by the gray variety of stone, that is according to rough estimate represented in pedestrian-roadway construction with approximately 60% to 70%. Large water absorption by yellowish-brown and brown varieties indicates considerable porosity and unhomogeneity of a part of tested stone.

In determining *the persistence to sodium sulphate action* through ten cycles, there was no mass loss of the gray variety (sample 1) while the biggest mass loss of the colored element 6 has also other properties with worst quality. After five and ten cycles a change of the basic color of stone sample has been observed. White and gray samples became yellowish and brownish, coloring previously colorless and clear solution in yellow-brown.

Compressive strength is satisfying for the most tested samples in dry condition (except sample 6). Its great decrease in water-saturated state was founded. The gray variety having the mean value of softening coefficient 0.75 (0.7 allowed) is the only one satisfying the mentioned criterion. Other samples have considerably lower coefficients of softening (from 0.4 to 0.63) which is very bad for the mentioned purpose of stone.

The resistance to abrasion according to Böhme is most favourable by gray variety of stone. According to some knowledge it is recommended to be less than $15-16 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$.

The velocities of ultrasonic propagation were tested in order to find the degree of unhomogeneity noticed in form of exchanging and occurring gray and yellowish-brown parts of stone. The velocities of ultrasonic waves in two directions on relatively sound samples were measured. The obtained values of 4010 m/s along lining of colored elements and 3901 m/s transversally to them, obviously indicate the unhomogeneity and inconvenient influence of impregnated zones and the existence of considerable dislocation among crystals.

The frost resistance was tested with 25 cycles of freezing. During testing performance there were no changes observed pointing to a negative influence of frost.

It was found, that the sample 6 has the worst physical-mechanical properties and the sample 9 is very similar to it. It is mostly unstable in treating with Na_2SO_4 (5 to 6 times bigger loss than in other samples), it has increased water absorption, weak one-axial compressive strength (2 times less value than in other samples), very weak resistance toward abrasion and great porosity. The groundmasses of both samples are completely impregnated with iron secondary minerals.

The best physical-mechanical properties belong to the stone element 1, which is light-gray, without considerable amount of cavities and without impregnations with iron secondary minerals. It absorbs least water, it has the biggest strength in watersaturated condition, the greatest resistance to abrasion as well as the biggest flexural strength.

Based on performed testings and relatively short-time observations on pedestrian construction, it can be concluded, that a part of in-built

trachyte-trachyandesite doesn't satisfy completely the criteria which are generally accepted in stone occupation and building when estimating usability.

One of few presumed favourable stone characteristics, beside coefficient of softening, is the presence of a larger number of closed pores inaccessible to water in gray variety (stone element 1). However, with this presumption water absorption is greater than allowed. The colored stone varieties in no way satisfy the conditions of in-building and loading related to endogenous and exogenous abrasion factors presumed on the place of in-building.

By the analysis of quoted results one can conclude, that described trachyte-trachyandesites are not equally worth natural stones. There are great differences in quality of individual stone elements. A gray trachyte-trachyandesite has to be differed from the one with an increased impregnation with iron secondary minerals in brown and yellowish-brown color. Bad characteristics of a part of tested stone are explained by the presence of swelling clay minerals of the smectite group.

An unadvantageous situation for further process of stone abrasion is the location of in-building. In winter, because of intensive traffic, abundant salt is used for strewing. Magnified lateral and longitudinal inclines on the parts of pedestrian-roadway construction also contribute to increased need for salting.

In decorative sense the described stone material has best characteristics after rainfall or washing, when it is clean and dry. Then all color nuances and structure features with phenocrysts of explicitly different color than the rock base color, are fully expressed. Unfortunately, stone material is, due to its porosity, mostly dirty and gray, because on its rough-hewn walking plane, treated mechanically by kernel, hold dust and impurities of different origin. Yellowish-brown variety of stone, wet or water saturated after rainfall, remains dark almost black for a long time.

Today, after almost two years of using, one can clearly point to the changes in stone elements. They relate first of all to colored varieties. Comparing with autumn 1998, when paving was completed, damages can be noticed mostly in form of increased number and dimension of cross-section by visible pores on walking surfaces. It is supposed, that the cause for this is crumbling of inner edge parts of pores. On many places colored ruinous zones have been deepened, especially those oriented parallelly and partly transversally (vertically) to walking surface.

Establishing the time persistence of stone, especially of that one, for which we do not have any experienced data, is very delicate. It will probably be possible, after the period of several years use, to evaluate more certainly the total worth of the stone material used, from technical point of view.