

## OTPORNOST DOLOMITNIH AGREGATA NA UDARNO HABAJUĆA OPTEREĆENJA I ZAMRZAVANJE

Ivan TOMAŠIĆ,<sup>1)</sup> Tomislav ŽENKO<sup>2)</sup> i Saša ALJINOVIĆ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 41000 Zagreb, Hrvatska;

<sup>2)</sup> Institut građevinarstva Hrvatske, J. Rakuše 1, 41000 Zagreb, Hrvatska

**Ključne riječi:** Dolomitni agregati, Otpornost na habanje i udar (Los Angeles), Otpornost na zamrzavanje

Dolomitni agregati iz kamenoloma Čelina, Podsusedsko Dolje i Jarče polje podvrgnuti su ispitivanju na udarno habajuća opterećenja i zamrzavanje. Pri tome su korištene nenormirane i normirane metode prema HRN-u i ASTM-u. Posebna pažnja posvećena je određivanju koeficijenta Los Angeles (KLA), koeficijenta drobitosti (KD) i indeksa pregranulacije (Ip) prije te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja. Dobivene vrijednosti, prikazane tabelarno i grafički, posljedica su strukturno-teksturnih i petrografskih značajki, geneze i različitih postgenetskih procesa, prije svega tektonike (mikroraspucanost i kataklaziranje) i rekristalizacije. Posebno je utvrđen utjecaj veličine, oblika i međusobne povezanosti kristala dolomita na udarno habajuća opterećenja te defekata u obliku savijanja, tlačnih sraslačkih lamela i kalavosti.

### Uvod

Izloženim istraživanjima prišlo se zbog postojanja niza znakovitih teškoća u ispitivanju i ocjeni kvalitete kamenih agregata, koji su na nekim objektima značajno oštećeni i dezintegrirani i pored zadovoljavanja svih normiranih i propisanih ispitivanja i kriterija u praksi.

Brojna su i raznolika oštećenja građevinskih konstrukcija u kojima je kameni agregat jedan od glavnih konstituenata. To se pretežno odnosi na dijelove kolničkih konstrukcija koje su izložene intenzivnim udarno-habajućim opterećenjima i zamrzavanju. S obzirom da su ta opterećenja i oštećenja najizraženija tijekom i poslije zimskog razdoblja, istraživanjem se htjelo utvrditi djelovanje zamrzavanja i udarno habajućih opterećenja na promjenu fizičko-mehaničkih svojstva kamenih agregata.

Istraživanjima se podvrgavaju karbonatni materijali zbog mogućnosti njihove primjene u izradi završnih slojeva kolničkih konstrukcija kao i potrebe zamjene eruptivnog kamena koji nedostaje na mnogim područjima. Utvrđivanje njihove granične vrijednosti kvalitete u primjeni (Ramljak et al., 1982) značajno je s obzirom da je jedan od osnovnih nedostataka kamenih materijala takvog sastava njihova relativno slaba otpornost prema drobljenju.

U tijeku istraživanja korištene su metode prema važećim normama HRN i američkom ASTM-u. Nenormiranim metodama pokušalo se u kvalitativnom i kvantitativnom pogledu odgovoriti na potrebu što jasnijeg definiranja vrijednosti novonastalih promjena. Prije ispitivanja kamen iz sva tri ležišta drobljen je u istom tipu drobilica.

**Key-words:** Dolomite aggregates, Resistance by abrasion and impact (Los Angeles), Stability of freezing

Dolomite aggregates from quarries Čelina, Podsusedsko Dolje and Jarče polje were subjected to tests of abrasive impact strain and freezing. The tests were performed mainly according to standard HRN and ASTM methods and only partly were unstandardized methods used. Emphasis was placed on the determination of the Los Angeles coefficient (KLA), the crushing coefficient (KD), and the re-crushing indexes (Ip), before and after 25 and 50 freezing cycles. The obtained data (presented both in tabular and graphic form) are a result of structural and textural petrographic features, genesis and various postgenetic processes, markedly tectonics (microfracturing and cataclasis) and recrystallisation. The influence of size, shape and alignment of dolomite crystals to abrasion and impact strain was investigated together with curving defects, stress twinning lamelle and cleavage.

Određivanje postojanosti kamenog agregata na mraz obavljeno je prema HRN-u B.B8.001. Iako su njime propisani uvjeti ispitivanja kamena, ocjena postojanosti temeljena je na vizuelnoj procjeni, pa ona ima uglavnom subjektivno obilježje.

Ispitivanju postojanosti na udarno habajuća opterećenja metodom »Los Angeles« u suhom stanju, te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja, podvrgnuti su uzorci agregata gradacija B, C i D prema HRN-u B.B8.045. Uzorci su uzeti u kamenolomima dolomita trijasko starosti Podsusedsko Dolje kod Zagreba i Čelina kod Siraća te Jarče polje kod Karlovca u kojem je dolomit jurske starosti.

Fizičko-mehanička svojstva dolomita ponajviše ovise o njegovim strukturno-teksturnim značajkama. Strukturno-teksturne značajke dolomita posljedica su geneze te različitih postgenetskih procesa, prije svega rekristalizacije, dedolomitizacije i tektonike (Tišljarić, 1976 i 1987).

Ispitivani uzorci pripadaju ranodijagenetskim i kasnodijagenetskim dolomitima. Stijenska masa je vrlo često tektonskim procesima višestruko kataklazirana. U njoj se prilično jasno raspoznaju kompaktne zone od raspucanih. Tijekom drobljenja takvih stijena (Salopek et al., 1990) postupno se smanjuje prisustvo primarnih i raste udio sekundarnih pukotina. Njihov broj i veličina, uz fizičko-mehaničke značajke, ovise o intenzitetu naprezanja uzrokovano radom uređaja za sitnjenje.

Kasnodijagenetski dolomiti imaju niži stupanj uredenosti kristalne rešetke (Goldschmidt i Graf, 1958) i krupnije kristale (0,1–0,4 mm). Ranodijagenetski dolomiti imaju viši stupanj uredenosti rešetke i znatno sitnije kristale (<0,015 mm).

Također, bilo u pozitivnom ili negativnom pogledu, na promjene fizičko-mehaničkih značajki kamena, značajan utjecaj imaju rekristalizacijski procesi a koji su slijedili iza višestrukih faza kataklaziranja (Tomašić et al., 1990)

### Izbor i priprema uzoraka

Pri izboru uzoraka pošli smo od pretpostavke da bi za istraživanje najpogodniji bili kameni agregati šireg raspona strukturno-petrografskih značajki i fizičko-mehaničkih svojstava. Zbog toga se izabrani dolomitni agregati prema svojim značajkama međusobno bitno razlikuju.

Da bi istraživanja bila potpunija analizirani su rezultati dosadašnjih ispitivanja fizičko-mehaničkih značajki uzoraka kamena za razdoblje od 1980. do 1990. godine. U tablici 1 prikazane su srednje vrijednosti rezultata tih ispitivanja. Za kamen iz kamenoloma Jarče polje, zbog nemogućnosti uzorkovanja i pripreme epruveta odgovarajućih dimenzija, prikazane srednje vrijednosti odnose se na ispitivanje uzoraka jezgri iz istražnih bušotina.

Tablica 1 – Srednje vrijednosti fizičko-mehaničkih svojstava uzoraka kamena

Table 1 – Mean values physico-mechanical properties of stone samples

Ispitivanje Laboratory tests	Kamenolom – Quarry		
	Čelina	Podsused. dolje	Jarče polje
1. Tlačna čvrstoća (MN/m <sup>2</sup> ) Comprehensive strength (MN/m <sup>2</sup> )			
– u suhom stanju in dry condition	244,4	159,7	104,5
– u vodom zasićenom stanju water saturated condition	209,6	133,8	100,0
– nakon 25 ciklusa zamrzavanja after 25 freezing cycles	200,5	114,9	91,8
2. Pad tlačnih čvrstoća (%) Deterioration of compressive strength (%)			
– mraz / suho freezing / dry	18,0	28,0	12,1
– voda / suho water / dry	14,2	16,2	4,3
– mraz / voda freezing / water	4,3	14,1	8,2
3. Otpornost na habanje po Böhme-u (cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> ) Resistance by abrasion Böhme (cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> )	18,2	15,1	29,2
4. Upijanje vode (mas %) Water absorption (mass %)	0,23	0,28	1,1
5. Postojanost na mrazu Stability to freezing	postojan stable	postojan stable	postojan stable
6. Gustoća (t/m <sup>3</sup> ) Density (t/m <sup>3</sup> )	2,863	2,855	2,847
7. Poroznost (vol. %) Porosity (vol. %)	1,4	1,2	3,9

Prema podacima iz tablice 1 uočljive su znatne razlike vrijednosti svojstava i veliki pad tlačnih čvrstoća u vodozasićenom stanju i nakon 25 ciklusa zamrzavanja. Dolomit Čeline ima vrlo velike tlačne čvrstoće u odnosu na dolomit Podsusedskog Dolja i još znatnije u odnosu na dolomit Jarčeg polja, koji je uz to još slabo otporan na habanje i ima povećano upijanje vode.

Uzorci agregata uzimani su tijekom proizvodnje u separaciji neposredno ispod traka na mjestima skladištenja gotovih proizvoda. Od svake frakcije (0/4, 4/8, 8/16 i 16/32 mm) uzeto je po 50 kg uzorka. Frakcije su oprane i osušene a zatim su iz njih sijanjem izdvojene međufrakcije (gradacije B, C i D; HRN B.B8.045) koje su nakon homogeniziranja podijeljene na 4 dijela.

Prvi dio korišten je za ispitivanje oblika zrna, udijela trošnih zrna, upijanje vode, otpornosti na mraz i atmosferilije metodom Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Drugi dio korišten je za određivanje koeficijenta Los Angeles (KLA) nakon 100 i 500 okretaja, koeficijenta drobitivosti (KD) i indeksa pregranulacije (Ip).

Treći i četvrti dio uzorka korišteni su za ispitivanje kao i drugi, ali nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja.

### Petrografske značajke uzoraka

Stijensku masu kamenoloma Jarče polje čini izmjenjena intenzivno kataklaziranih ranodijagenetskih i kasnodijagenetskih dolomita.

Struktura ranodijagenetskih dolomita je stromatolita, dolopelmikritna i dolointrasparitna. Nepravilne i laminoidne fenestre i rekristalizirana gnijezda zastupljene su približno 5% i ispunjene mikrokristalnim druznim cementom u obliku svijetlijih kristalića dolomita presjeka od 0,02 do 0,04 mm. Uglavnom prevladavaju kristalići dolomita veličine presjeka <0,002 mm.

Kristali dolomita u rekristaliziranim dijelovima fenestri presjeka su do 0,2 mm, a ponegdje i do 0,5 mm. Kamen je sporadično ispresijecan subparalelnim mikropukotinama širine od 0,004 do 0,06 mm, a na razmacima od 0,06 mm na više. Kontakti dolomitnih kristala, a posebno pukotine, ispunjeni su sporadično bituminoznom supstancijom koja oslabljuje mehaničku vezu u kamenu. Kalavost i tlačne sraslačke lamele sa svojom različitom orijentiranošću i debljinom indikator su intenziteta kataklaziranja što pospješuje mehaničku dezintegraciju stijene i kristalića dolomita. Česte su dolomikritne breče s mnogobrojnim mikropukotinama i rekristaliziranim neodolomitom presjeka kristalića od 0,02 do 0,1 mm. Utvrđene su i račvaste mikropukotine i stilolitski šavovi ispunjeni limonitnom supstancijom.

Kasnodijagenetski dolomiti odlikuju se makrokristalostom i mikrokristalostom strukturom sa širokim rasponom presjeka kristalića veličine od 0,02 do 0,1 mm; od 0,01 do 0,3 mm te od 0,06 do 0,14 mm. Prevladavaju uzorci s alotriomorfnim do hipidiomorfnim kristalima zupčastog i pretežno poligonalnog prorastanja ponekad jednoličnog rasporeda.

U odnosu na ranodijagenetske dolomite, homogenitet kasnodijagenetskih dolomita izraženije je narušen. Veliki je broj mehaničkih diskontinuiteta posebice u obliku mikroklivaža. Na takvim mjestima, a ponekad i presjecištima diskontinuiteta, sporadična je ispunjena rekristaliziranim krupnije kristalastim dolomitom presjeka ponekad i do 0,5 mm. U zonama mikroklivaža, duž pojedinih mehaničkih diskontinuiteta, utvrđen je milonitizirani dolomit s kristalićima presjeka manjim od 0,01 mm. Mikropukotine su ispunjene kristalima dolomita presjeka 0,03 do 0,4

mm. Tamo gdje je rekristalizacija zahvatila kristale na stijenkama, kontakti su poligonalni, dakle mehanički čvršći s postupnim smanjenjem njihovih presjeka prema području oko pukotina. Utvrđene su i pojave kataklastičnih mikrobreča nastalih cementacijom razdrobljenog kasnodijagenetskog dolomita. Na pojave nehomogenosti ukazuju zrna polikristalnog dolomita s tragovima i konturama prijašnjih manjih zrna, odnosno prethodnih reliktnih struktura. Smanjeni homogenitet predstavljaju i ravni kontakti kod diskontinuiteta između prvobitno i novo nastalih kristala posebno ako postoji znatna razlika u njihovoj veličini. Kristali najmlađe generacije, nastali bilo rekristalizacijom ili iz nadolazećih otopina, ne pokazuju znakovitu kalavost i postojanje polisintetskih lamela.

U kamenolomu Čelina prema strukturnim značajkama prevladavaju homogeni makrokristalasti kasnodijagenetski i manjim dijelom jako rekristalizirani ranodijagenetski slabije homogeni mikrokristalasti dolomiti. Prevladava jednoličan raspored različito orijentiranih hipidiomorfni i alotriomorfni kristalića, ovisno od uzorka, u presjeku od 0,04 do 0,08 mm; 0,1 do 0,2 mm i 0,02 do 0,05 mm. Homogenitet narušava sporadično rekristaliziran agregat koncentriran u obliku nepravilnih gnijezda u kojima pretežu presjeci od 0,1 do 0,2 mm pa sve do 0,4 i 0,5 mm. Prevladava poligonalno i dijelom zupčasto proraštanje. Polisintetske tlačne sraslačke lamele uglavnom su vrlo tanke a mjestimice je kalavost dobro izražena. Mehanički diskontinuiteti su rijetki. U nekim je uzorcima utvrđen autigeni kvarc (od 1 do 3%). Nalazi se koncentrirano kao agregat s oštrim kontaktima među kristalima kojih se veličina smanjuje u kontaktu s dolomitom.

U nekim uzorcima zastupljeni su i rekristalizirani ranodijagenetski dolomiti s reliktima i značajkama stromatolitnih struktura. Presjeci kristalića dolomita u reliktima fenestri najčešće su 0,2 mm, te od 0,2 do 0,3 mm. Područja rekristalizacije podudaraju se sa stromatolitnim laminama. Zbog toga su izražene prugaste teksture, što je jedan od znakova jasne anizotropije. Utvrđene mikropukotine duž kojih je lakše odvajanje ispunjene su bituminoznom supstancijom a podudaraju se sa stromatolitnom laminacijom. Rekristalizirani dijelovi sadrže kristaliće dolomita do 0,06 mm u presjeku. U istraživanjima su uzorcima mehanički diskontinuiteti rijetki.

U kamenolomu Podsusedsko Dolje stijenska se masa sastoji pretežno od ranodijagenetskih dolomita s izraženom stromatolitnom građom. Ispresjecana je tektonskim mikropukotinama vrlo često s položajem kontra laminacije. Nerekristalizirani dolomit sastoji se pretežno (do 90%) od kristalića dolomita koji izgrađuju stromatolitne lamine. Presjeka su manjeg od 0,006 mm. Nepravilne fenestre ispunjene su mikrokristalastim do makrokristalastim hipidiomorfni dolomitom presjeka od 0,04 do 0,2 mm međusobno poligonalno sraslim. Jače rekristalizirani dolomit isprespjecan je gušćim spletom mikropukotina. Debljina pukotina a i presjeka kristala u njima iznosi 0,02 do 0,2 mm, rjeđe do 0,5 mm. Pored stromatolitnih lamina dolomit sadrži pelsparitne, pelmikritne i intrasparitne prosljoke i fenestre ispunjene

mikro do makrokristalastim dolomitom. Stijena predstavlja izrazito kataklazirani i tektonizirani ranodijagenetski dolomit.

## Rezultati ispitivanja

Sva su ispitivanja obavljena na gradacijama B, C i D. Gradacija B sastoji se od 5 kg agregata veličine zrna od 12,5 do 25,0 mm. Gradacija C sastoji se od 5 kg agregata veličine zrna od 6,3 do 12,5 mm, a gradacija D od 5 kg agregata veličine zrna od 3,15 do 6,3 mm.

Rezultati prvog dijela ispitivanja kamenog agregata prikazani su u tablici 2. Vidljivo je da osim oblika zrna postoji naglašena razlika kvalitete agregata u korist dolomita Čeline u odnosu na Podsusedsko Dolje i još više Jarče polje. Značajne razlike naglašene su kod udjela trošnih zrna, postojanosti na mrazu (gubitak u mas. % nakon 25 i 50 ciklusa) i otpornosti na udar i habanje metodom Los Angeles.

Tablica 2 – Fizičko-mehanička svojstva kamenog agregata  
Table 2 – Physico-mechanical properties of stone aggregate

Ispitivanje <i>Laboratory tests</i>	Gradacija <i>Grade</i>	Kamenolom – Quarry		
		Čelina	Podsused. dolje	Jarče polje
Udio zrna nepovoljnog oblika (mas %)	D	10,9	2,8	7,4
<i>Percentage of irregularly shaped grains (mass. %)</i>	C	12,5	3,4	2,9
Upijanje vode (mas %)	B	8,5	5,1	2,0
<i>Water absorption (mass %)</i>	D	0,58	0,78	0,24
	C	0,47	0,71	0,67
	B	0,34	0,71	0,88
Trošna i kalava zrna (mas %)	D	1,20	2,2	6,2
<i>Weathered and cleveaged grains (mass %)</i>	C	0,9	2,8	12,9
	B	0,5	2,6	11,9
Postojanost na mrazu <i>Stability of freezing</i>				
Gubitak nakon 25 ciklusa zamrzavanja (mas %)	D	0,4	3,1	2,5
<i>Loss after 25 cycles (mass %)</i>	C	0,3	2,1	3,8
	B	0,2	4,3	3,8
Gubitak nakon 50 ciklusa zamrzavanja (mas %)	D	1,6	3,4	4,6
<i>Loss after 50 cycles (mass %)</i>	C	0,4	3,9	4,9
	B	0,2	4,3	4,7
Postojanost na mraz metodom Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mas %)	D		1,2	2,2
<i>Resistance to freezing (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> method), (mass %)</i>	C		4,1	3,9
	B		3,5	3,7
Otpornost na udare i habanje metodom Los Angeles (mas %)	D	18,6	22,1	28,7
<i>Resistance by abrasion and impact in the Los Angeles machine (mass %)</i>	C	15,5	21,0	30,3
	B	18,3	22,3	39,9

Određivanje otpornosti kamenog agregata na zamrzavanje obavljeno je prema HRN B.B8.001. Uzorci zasićeni vodom podvrgnuti su naizmjeničnom cikličkom tretmanu zamrzavanja (-20°C) i odmrzavanja (+15°C). Postojanost na mrazu utvrđena je mjerenjem gubitka mase nakon ukupno predviđenog broja ciklusa (25, 50). Ovaj postupak ocjene postojanosti nije posebno normiran.

Određivanje otpornosti na udarno-habajuća opterećenja obavljeno je normiranom metodom Los Angeles (HRN B.B8.045.). Toj metodi pridodali smo nenormirano ispitivanje pregranulacije agregata (nakon 500 okretaja uzorak je prosijan na sitima

otvora 0,09; 0,71; 2,0; 3,15; 4,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0 i 25,0 mm).

Na temelju spomenutih ispitivanja određeni su koeficijent otpornosti na udar i habanje Los Angeles (KLA), koeficijent drobljivosti (KD) i indeks pregranulacije (Ip). Ova ispitivanja obavljena su nakon 0; 25 i 50 ciklusa zamrzavanja.

Koeficijenti Los Angeles (KLA) određeni su na gradacijama nakon 100 i 500 okretaja u bubnju, prosijavanjem na situ otvora 2 mm (prolaz kroz situ izražen u mas. %).

Koeficijent drobljivosti (KD) utvrđen je odnosom koeficijenta Los Angeles nakon 100 i 500 okretaja prema izrazu:

$$KD = (KLA(100)/KLA(500)) \times 100(\%)$$

Vrijednosti KLA i KD za uzorke agregata ispitivane prije zamrzavanja, te nakon 25 i 50 ciklusa, odnosno nakon 100 i 500 okretaja bubnja, prikazane su u tablici 3. Najpovoljnije vrijednosti dobivene su za dolomitne agregate Čeline, zatim Podsusedskog Dolja te najslabije za kameni materijal Jarčeg polja. Odnos drobljivosti nakon 100 i 500 okretaja bubnja najpovoljniji je za dolomite s lokaliteta Čelina, dok se kod druga dva povećava, posebno kod dolomita Jarčeg polja. To znači da su kameni materijali slabijih fizičko-mehaničkih svojstva skloniji intenzivnijem drobljenju u prvih 100 okretaja.

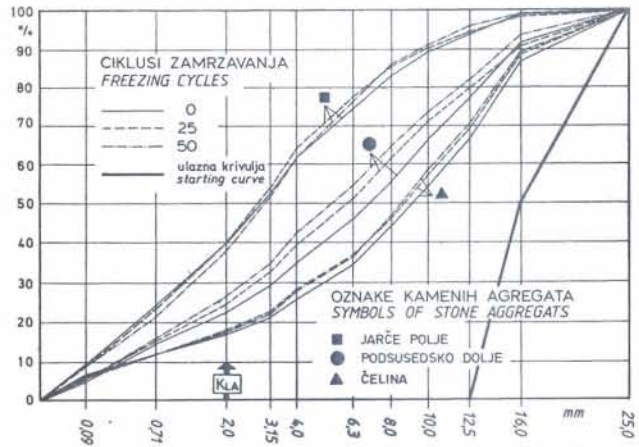
Tablica 3 – Koeficijenti KLA (100), KLA (500) i KD prije (0), te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja  
Table 3 – Coefficients KLA (100), KLA (500) and KD before (0) and after 25 and 50 freezing cycles

Kamenolom Quarry	Gradacija Grade	Prije smrzavanja Before freezing			Nakon 25 ciklusa After 25 cycles			Nakon 50 ciklusa After 50 cycles		
		KLA 100	KLA 500	KD (%)	KLA 100	KLA 500	KD (%)	KLA 100	KLA 500	KD (%)
Čelina	B	4,5	16,9	26,6	4,6	17,8	25,8	4,5	17,5	25,7
	C	4,4	16,2	27,2	4,6	17,1	26,9	4,4	16,6	26,5
	D	5,1	18,4	27,7	4,8	17,8	27,0	4,9	17,6	27,8
Podsusedsko dolje	B	6,6	22,2	29,7	7,0	24,6	28,5	7,2	26,3	27,4
	C	6,0	20,0	30,0	6,4	21,7	29,5	6,8	22,1	30,8
	D	9,1	25,6	35,3	9,0	26,4	34,1	8,6	24,4	35,2
Jarče polje	B	14,6	39,9	36,6	15,0	40,0	37,5	13,7	37,8	36,2
	C	10,7	30,3	35,3	9,3	28,3	32,9	8,6	28,7	30,0
	D	10,6	28,7	36,9	9,9	28,1	35,2	10,0	28,2	35,5

Ispitivanje granulometrijskog sastava dolomitnih agregata gradacija B, C i D sa spomenuta tri lokaliteta, nakon podvrgavanja udarno habajućim opterećenjima, omogućilo je utvrđivanje odgovarajućih promjena izraženih pregranulacijom kamenog materijala prije te poslije 25 i 50 ciklusa zamrzavanja. Rezultati dobiveni tijekom istraživanja, krivulje prosijavanja nakon ispitivanja KLA, prikazani su dijagramima (sl. 1–3). Za svaku gradaciju utvrđene su po 3 krivulje.

Svaka krivulja prosijavanja nakon ispitivanja KLA odraz je pregranulacije kamenog agregata. Dobivena je za svaki uzorak dolomitnog agregata. Ispod svake krivulje izračunata je površina elektroničkim računalom. To je omogućilo izračunavanje indeksa pregranulacije (Ip), koji je definiran izrazom:

$$I_p = N/P,$$



Sl. 1 Dijagrami pregranulacije kamenih agregata prije (0), te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja (gradacija B)

Fig. 1 Diagrams of stone aggregate re-crushing before (0) and after 25 and 50 cycles of freezing (grade B)

gdje su (N) površina ispod krivulje poslije i (P) prije pregranulacije. Taj indeks odgovara mjeri izvršenog predrobljavanja agregata. Odraz je svih već spomenutih značajki kamenih agregata u uvjetima udarno-habajućih opterećenja i zamrzavanja.

Intenzitet pregranulacije kamenog agregata određen je usporedbom krivulja prosijavanja odnosno odgovarajućim odnosom, prije i nakon testiranja, kako bi se što realnije prikazao intenzitet promjena.

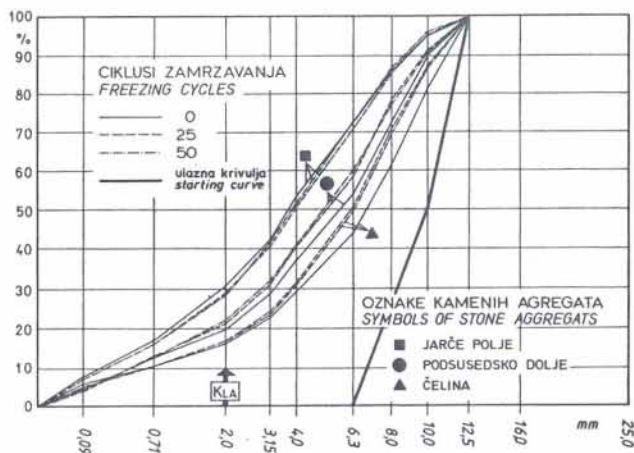
Granulometrijski sastav uzorka prije ispitivanja (P) definiran je integralom ispod krivulje prosijavanja nultog uzorka u intervalima ( $a=3,15$  do  $b=6,3$ ;  $a=6,3$  do  $b=12,5$  i  $a=12,5$  do  $b=25,0$ ) ovisno odgovarajućim gradacijama (B, C i D) kako slijedi:

$$P = \int f(x)dx, \quad \text{za } x = 4,399 \times d^{0,45}$$

Granulometrijski sastav uzorka poslije ispitivanja (N) definiran je integralom ispod krivulje prosijavanja u intervalima ( $c=0$  do  $d=6,3$ ;  $c=0$  do  $d=12,5$  i  $c=0$  do  $d=25,0$ ) ovisno od odgovarajućih gradacija (B, C i D) kako slijedi:

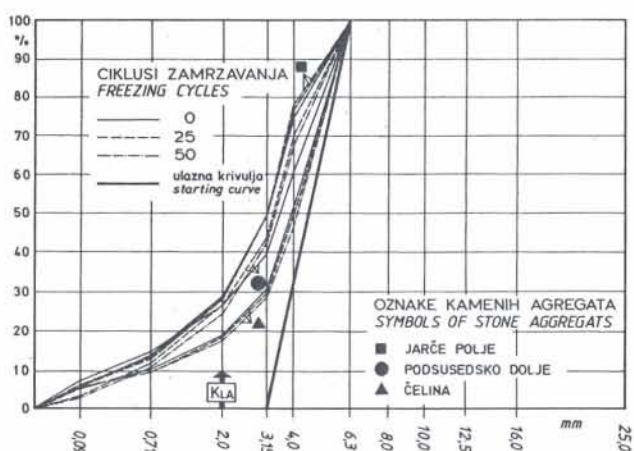
$$N = \int f(x)dx, \quad \text{za } x = 4,399 \times d^{0,45}$$

Indeksi pregranulacije nakon nultog mjerenja prije te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja kao i vrijednosti razlike izražene u postocima u odnosu na nulti uzorak



Sl. 2 Dijagrami pregranulacije kamenih agregata prije (0), te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja (gradacija C)

Fig. 2 Diagrams of stone aggregate re-crushing before (0) and after 25 and 50 cycles of freezing (grade C)



Sl. 3 Dijagrami pregranulacije kamenih agregata prije (0), te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja (gradacija D)

Fig. 3 Diagrams of stone aggregate re-crushing before (0) and after 25 and 50 cycles of freezing (grade D)

prikazane su u tablici 4 vrijednostima promjene intenziteta pregranulacije izraženim u postocima za odnose rezultata pregranulacije ( $I_p$ ) Podsusedskog Dolja prema Čelini (PD/Č) i Jarčeg polja prema Čelini (JP/Č).

Promjena indeksa pregranulacije ( $I_p$ ) posebice kod iste gradacije u odnosu na uzorak koji nije podvrgnut zamrzavanju ukazuje na pad kvalitete gradacije C agregata Čeline te kod agregata gradacije B Podsusedskog Dolja. Posebno je mali porast pregranulacije u odnosu na nulti uzorak kod svih gradacija agregata Jarčeg polja. To predstavlja neočekivani rezultat. Zadnje dvije kolone (PD/Č i JP/Č u %) ukazuju na ukupnu razliku u kvaliteti dolomitnih agregata Podsusedskog Dolja i Jarčeg polja u odnosu na agregat Čeline, koji pokazuje znatno povoljnija svojstva kod podvrgavanja opterećenju na udar i habanje. Indeksi pregranulacije gradacije D (najsitnije) znatno su manji kod sva tri materijala u odnosu na gradacije B i C, što znači, da se prema očekivanju, sitniji agregat u opisanom tretmanu najmanje drobi.

### Diskusija i zaključak

Istraživanje otpornosti dolomitnih kamenih agregata na udar i habanje prije (0), te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja pokazalo je odgovarajuće rezultate koji bi se mogli objasniti s nekoliko različitih gledišta. Dobivene vrijednosti posljedica su strukturno-teksturnih i petrografskih značajki te geneze i različitih postgenetskih procesa, prije svega tektonike, dolomitizacije i rekristalizacije.

Svi rezultati i razlike fizičko-mehaničkih svojstava (tablice 1–4 te slike 1–3) jasno pokazuju da je dolomitni agregat svih triju gradacija Čeline kvalitetniji od Podsusedskog Dolja te znatno bolji od agregata Jarčeg polja. Dobivene razlike prikazane grafički, utvrđene su kvantitativnim određivanjem koeficijenta KLA(100), KLA(500), KD i indeksa pregranulacije  $I_p$  prije te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja.

Znatne razlike utvrđene su već predhodnim ispitivanjima danim u tablicama 1 i 2. Na to upućuju vrlo jasne razlike u tlačnim čvrstoćama i dijelom u upijanju vode (tablica 1), postojanosti na mrazu, otpornosti na udar i habanje te udjelu trošnih i kalavih zrna kod agregata (tablica 2). Ostale vrijednosti nisu sukladne s rezultatima ispitivanja otpornosti na udar i habanje (Los Angeles) prije te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja prikazanim u tablicama 3 i 4 i na slikama 1–3. Od sukladnih vrijednosti odstupaju otpornosti na habanje i poroznost ispitanih

Tablica 4 – Indeksi pregranulacije  $I_p$

Table 4 – Re-crushing indexes  $I_p$

Gradacija Grade	Broj ciklusa zamrzavanja Number of freezing cycles	Čelina (Č)		Podsused. dolje (PD)		Jarče polje (JP)		PD/Č (%)	JP/Č (%)
		$I_p$	%	$I_p$	%	$I_p$	%		
B	0	2,646	0	3,017	0	3,922	0	14,0	48,2
	25	2,731	3,2	3,155	4,6	3,951	0,7	15,5	44,7
	50	2,746	3,8	3,254	7,9	3,924	0,1	18,5	42,9
C	0	2,785	0	3,436	0	3,961	0	23,4	42,2
	25	2,993	7,4	3,342	-2,7	3,857	-2,6	11,7	28,9
	50	2,960	6,3	3,352	-2,4	3,917	-1,1	13,2	32,3
D	0	1,944	0	2,312	0	2,531	0	18,9	30,2
	25	1,873	-3,6	2,346	1,6	2,526	-0,2	25,4	34,9
	50	1,863	-4,2	2,258	-2,3	2,526	-0,2	21,2	35,6

uzoraka kamena (tablica 1) te udio zrna nepovoljnog oblika, upijanje vode i postojanost na mrazu i atmosferilijama (metodom  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) za agregate (tablica 2). Ove su razlike dijelom direktna posljedica različite početne veličine ispitivanih uzoraka u odnosu na odgovarajuću metodu, stupanj homogenosti i anizotropnosti, a također i odnosa između krupnijih i sitnijih kristala, udjela mehaničkih i drugih diskontinuiteta i defekata u kamenu. Tako se na primjer ne mogu uspoređivati rezultati dobiveni metodom koja zadire u područje kristala i oni koji su dobiveni metodom koja zadire u područje kristalnih agregata sastavljenih od brojnih krupnijih ili sitnijih kristalnih individua (ispitivanje na udar, tlak i sl.). Posebno treba naglasiti značaj strukturno-teksturnih čimbenika koji mogu korisno poslužiti za tumačenje pojedinih rezultata. To se najviše odnosi na veličinu, oblik i vezu između zrna te postojanje orijentiranih struktura i rekristalizacijskih procesa (Malvik, 1988).

Prema američkom standardu (ASTM C 131-81, 1987) svi istraživani kameni agregati (tablica 3) smatraju se sklonim drobljenju jer im je odnos KLA nakon 100 i 500 okretaja bubnja, odnosno KD, veći od 20%.

Svaki od istraživanih materijala potrebno je ocijeniti zasebno, ali i u odnosu na druga dva s gledišta vrlo velikog broja čimbenika.

Petrografskim analizama utvrđeno je da se probni uzorci kamena i agregat kamenoloma Čelina sastoje pretežno od krupnozrnastih odnosno homogenih makrokristalastih kasnodijagenetskih i manjim dijelom jako rekristaliziranih ranodijagenetskih pretežno homogenih mikro do makrokristalastih dolomita. S jedne strane zbog pretežno homogenog rasporeda različito orijentiranih alotriomorfni i dijelom hipidiomorfni i poligonalno prorašteni kristalića dolomita, ti dolomiti imaju visoke tlačne čvrstoće (na kockama  $5 \times 5 \times 5$  cm), dok s druge strane pokazuju grubo hrapave površine prijeloma i nepravilni lom koji je jedan od glavnih uzroka povećanog udjela zrna nepovoljnog oblika u agregatu.

Koeficijenti KLA(100), KLA(500) i KD nakon 0 te 25 i 50 ciklusa zamrzavanja (tablica 3) pokazuju veliku ujednačenost. Od toga neznatno odstupa sitnija gradacija D (3,15 do 6,3 mm) agregata Podsusedskog Dolja koja ima veću drobljivost nakon prvih 100 okretaja bubnja. Međutim, ta gradacija kod sva tri agregata ima manju sklonost drobljivosti i oko 35% manje indekse pregranulacije (Ip) (tablica 4).

Takvi se rezultati mogu objasniti znatnim smanjenjem primarnih pukotina čiji se broj smanjuje sitnjenjem, a manjim dijelom raste udio sekundarnih pukotina čiji broj i veličina ovise o intenzitetu naprezanja, kada zastupljenost pojedinih predrobljenih klasa zavisi isključivo o upotrebljenom uređaju i fizičko-mehaničkim svojstvima kamena (Salopek et al., 1990).

Utvrđeno je da se agregat Podsusedskog Dolja sastoji od ranodijagenetskih laminoidnih pretežno kriptokristalastih dolomita s proslojcima i fenestrama ispunjenim mikro do makrokristalastim dolomitom. Ti se dolomiti ističu vrlo visokom otpornošću na habanje po Böhme-u (tablica 1), većom od krupno-

kristalastih dolomita Čeline od kojega su znatno skloniji pregranulaciji. To zbog toga, što sitni kristalići imaju znatno viši stupanj uredenosti kristalne rešetke (Goldschmidt i Graf, 1958).

Te su vrijednosti, posebno kod habanja, u skladu s rezultatima istraživanja intenziteta sitnjenja i vrijednostima Bondovog radnog indeksa (BWI) odnosa energije potrebne za sitnjenje (Salopek et al., 1990). Tom je prilikom utvrđeno da je za sitnjenje kasnodijagenetskih dolomita u mlinu s kuglama (u području veličine zrna od 0,177 do 2,83 mm) potrebna dvostuko manja energija (10 i 11,6 kWh/t) u odnosu na ranodijagenetske (20,3 i 22 kWh/t). Ovi su rezultati dakle sukladni, jer je kod obiju metoda kamen tretiran u području zrna odnosno kristala.

Agregat Podsusedskog Dolja skloniji je drobljenju i pregranulaciji kod ispitivanja na udar i habanje nakon 0 te 25 i 50 ciklusa zamrzavanja (tablice 2-4 te sl. 1-3). Gradacija D (3,15 do 6,3 mm) ima (tablica 3) povećanu drobljivost na što ukazuje KLA(100), no zbirno gledajući (tablica 4) on se znatno manje pregranulira (30 do 32%) u odnosu na gradacije B i C. Krupnije frakcije sklonije su drobljenju zbog postojanja većeg broja primarnih (prirodnih) pukotina vezanih za intenzivno kataklaziranje pojedinih dijelova kamenoloma Podsusedskog Dolje i sekundarnih nastalih tijekom procesa drobljenja, dakle udarno habajućih opterećenja i zamrzavanja.

Kameni agregati Jarčeg polja sastoje se od izmjene intenzivno kataklaziranih rano i kasnodijagenetskih dolomita za koje su karakteristični brojni mehanički defekti, nehomogenost građe, rekristalizacijski procesi i milonitizacija. Pri tome je homogenost krupnije kristalastih dolomita jače narušena od sitnijih ranodijagenetskih. Sva su im fizičko-mehanička svojstva naglašeno slabija od predhodna dva dolomita (tablica 1) kao i izraženije predrobljavanje (tablice 2 i 3).

Iznanaduje postojanost na mrazu, koja ne zaostaje za agregatom Podsusedskog Dolja (tablica 2). Koeficijenti pregranulacije (Ip) povećani su. Međutim kod gradacije D pregranulacija je znatno manja (35%) u odnosu na gradacije B i C (tablica 4). Gradacija B izuzetno je sklona drobljenju nakon KL(100) prije te nakon 25 i 50 ciklusa zamrzavanja (tablica 3).

Na temelju grafičkih prikaza (sl. 1-3) i podataka iz tablice 4 može se zaključiti da postoji posebno veliki pad kvalitete agregata unutar pojedinih vrsta prije te nakon 25 ciklusa (sl. 2) za kamenu agregat Čeline i Podsusedskog Dolja (gradacija C), te na sl. 1 za Podsusedsko Dolje (gradacija B). Vrijednosti su mnogo veće na jače razmaknutim dijelovima krivulja te u odnosu na razlike dobivene iz njihovih pripadajućih površina one iznose 10 do 15% (npr. frakcije 4,0; 6,3; 8,0 i 10,0 mm sl. 1 za Podsusedsko Dolje, te na sl. 2 za frakcije 6,3; 8,0 i 10,0 mm za Čelinu i 6,3 za Podsusedsko Dolje).

Nakon 50 ciklusa zamrzavanja ove su razlike znatno manje izražene što se može tumačiti da je već nakon 25 ciklusa zamrzavanja nastupila određena stabilizacija fizičko-mehaničkih svojstva smanjenjem obilja nehomogenosti i defekata u česticama agregata.

Izuzetak je donekle dolomit Podsusedskog Dolja gradacija B (sl. 1).

Najhomogeniji u strukturno-teksturnom pogledu a istovremeno najotporniji na udar od ispitivanih kamenih agregata je dolomit iz kamenoloma Čelina. U tom je dolomitu prema Krtolici (1975), od 42 ispitivana uzorka dolomita i vapnenaca, izmjerena najveća brzina elastičnih longitudinalnih akustičnih valova (6,99 do 7,13 km/sek). Tako velike izmjerene brzine ukazuju na jako izražen homogenitet ovog dolomita, na vrlo dobru međukristalnu povezanost i manji broj defekata u kamenu.

Porastom intenziteta rekristalizacijskih procesa u dolomitima raste veličina pojedinih kristala, što znatno utječe na homogenitet stijene bilo u pozitivnom ili negativnom pogledu. Takvi procesi često smanjuju porozitet i međusobnu povezanost pora uslijed čega može doći do povećanja otpornosti na mraz a također i do smanjenja drobljivosti kamena, posebice ako pritom nastaju jedri kristali bez izraženih tlačnih sraslačkih lamela i kalavosti.

Utjecaj zamrzavanja manji je nego li se to očekivalo posebice nakon 50 ciklusa. Može se pretpostaviti da je nakon 25 ciklusa nastupila određena stabilizacija fizičko-mehaničkih svojstava nakon smanjenja obilja nehomogenosti i defekata u kamenu.

Istraživanjem KLA za različite kamene materijale, Kresnik et al. (1986) pokušali su dopuniti kriterije za primjenu agregata u cestogradnji. Tom je prilikom utvrđeno da takva i slična istraživanja mogu omogućiti izdvajanje zdravih gradacija kamenog agregata iz kojeg se onda mogu proizvesti »zdrave« frakcije plemenite kamene sitneži.

I u tim istraživanjima stečena iskustva mogla bi se korisno upotrijebiti kod utvrđivanja i procjene kvalitete pojedinih vrsta kamenih agregata.

Primljeno: 14. II. 1992.

Prihvaćeno: 9. VI. 1992.

## LITERATURA

Objavljeno:

- Goldschmidt, J. R. and Graf, D. L. (1958): Structural and compositional variations in some natural dolomites. *J. Geol.*, 66: 678–693, Chicago.
- Malvik, T. (1988): Relations between mineralogical texture and comminution characteristics for rocks and ores. 16 th Int. Min. Proc. Congres, 257–270, Stockholm.
- Ramljak, Z., Pejnović, V., Crnković, B., Cipek, V. i Barlek, M. (1982): Mogućnost primjene karbonatne kamene sitneži u veznom sloju kolničkih konstrukcija za sve razrede prometnog opterećenja. XI kongres Saveza društva za puteve Jug., 1, 543–556, Opatija.
- Salopek, B. and Tomašić, I. (1990): Textural-Structural Characteristics of Dolomites and their Influence on the Comminution Behaviour of the Rock. 7th European symposium comminution, 1, 283–293, Ljubljana.
- Tišljarić, J. (1976): Ranodijagenetska i kasnodijagenetska dolomitizacija i dedolomitizacija u krednim karbonatnim sedimentima zapadne i južne Istre (Hrvatska). *Geol. vjesnik*, 29, 286–321, Zagreb.
- Tišljarić, J. (1987): Petrologija sedimentnih stijena. Sveučilište u Zagrebu, 242 str., Zagreb.
- Tomašić, I., Salopek, B. i Krasić, D. (1990): Utjecaj dijagenetskih i tektonskih procesa u dolomitima na njihovo sitnjenje. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 2, 47–51, Zagreb.
- ASTM C 131–81 (1987): Standard Test Method for Resistance Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- HRN B.B8.045 (1957): Ispitivanje prirodnog i drobljenog agregata strojem Los Angeles.
- HRN B.B8.001 (1957): Ispitivanje postojanosti kamena na mrazu.
- Neobjavljeno:
- Kresnik, J., Zupančić, B.Z., Poje, V., Ženko, T. i Crnković, B. (1986): Preverjanje in dopolnitev nekaterih kriterijev uporabnosti kamenih agregatov v cestogradnji. Arhiv: Zavod za reziskavo materiala in konstrukcij Ljubljana, 82 str., Ljubljana.
- Krtolica, B. (1975): Nedestruktivno ispitivanje kamena ultrazvukom. Arhiv Instituta građevinarstva Hrvatske, 67 str., Zagreb.

## Resistance of Dolomite Aggregates to Freezing and Abrasive Impact Strain

I. Tomašić, T. Ženko and S. Aljinović

Dolomite aggregates from quarries Čelina, Podsusedsko Dolje and Jarče Polje were subjected to tests of abrasive impact strain and freezing. The investigations were performed due to number of difficulties in examination and evaluation of stone aggregate quality, namely although they satisfy standard and prescribed tests and criteria in building objects they are often damaged and disintegrated. The investigation were performed according to standard HRN and ASTM methods and only partly supplemented with unstandardized methods.

The investigation of durability to abrasive-impact strain was performed by standard Los Angeles method on aggregate samples of B, C and D grades (according to HRN B.B8.045 standards). This method was supplemented with unstandardized aggregate investigations (after 500 turnings the sample was sieved on sieves of 0.09; 0.71; 2.0; 3.15; 4.0; 6.3; 8.0; 10.0; 12.5; 16.0 and 25.0 mm in diameter). Determinations of freezing durability of stone aggregates was performed according to HRN B.B8.001. standard. The analyzed samples were early-diagenetical and late-diagenetical dolomites.

The Los Angeles coefficient of the sample grades was determined after 100 and 500 turnings of the drum and sieving on a 2 mm sieve (transit through the sieve is given in mass. percent).

The crushing coefficient (KD) was obtained from the ratio of Los Angeles coefficients after 100 and 500 turnings by the equation:

$$KD = (KLA(100)/KLA(500)) \times 100(\%)$$

The Re-crushing index (Ip) was calculated according to the expression:

$$I_p = N/P$$

where N and P are the surfaces beneath the sieving curve after (N), and before (P) re-crushing. Comparison of integrated surfaces beneath sieving curves before and after testing was performed by computer.

The investigations were supplemented with test results of compressive strength, resistance by abrasion, water absorption, stability of freezing, density and porosity of stone samples (Table 1). Also the test results performed on stone aggregates (Table 2) such as percentage of irregularly shaped grains, water absorption, stability of freezing (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> method) and resistance by abrasion and impact in the Los Angeles machine, were considered in combination with the above performed stone investigations.

The results of investigated Los Angeles coefficients (KLA), crushing coefficients (KD) and re-crushing indexes (Ip) are presented in Tables 3 and 4.

Re-crushing diagrams of stone aggregates grades B, C and D, before and after 25 and 50 freezing cycles are displayed on figures 1, 2 and 3.

The presented investigations clearly demonstrate that the homogeneous macrocrystalline late-diagenetical and in minor part

recrystallized early-diagenetical heterogeneous microcrystalline dolomites of Čelina are most resistant to impact-abrasive strain before and after 25 and 50 freezing cycles. They are followed by weaker (11.7 to 25.4% higher re-crushing indexes) early-diagenetical to cataclazed and tectonized dolomites with distinct stromatolite structure (90% of crystal sections are smaller than 0.006 mm). Weaker still (28.9 to 48.2% higher re-crushing indexes than those of Čelina dolomites) are intensively cataclazed early- and late-diagenetical dolomites of stromatolite, dolopelmicrite and dolointrasparite structure from the quarry Jarče polje. These dolomites are heterogeneous and contain a large number of mechanical deformations of various origin. They are characterized by numerous nests of coarse crystalline dolomite resulting from recrystallization processes after multiple tectonization.

Considerable differences were already determined in previous investigations which are presented in Tables 1 and 2. This is emphasized by clear differences in compressive strength and partly in water absorption (Table 1), also in differences of freezing stability, resistance by abrasion and impact, and in the percentage of weathered and cleaved grains of aggregates (Table 2).

Other values do not agree with the obtained results from tests of resistance by abrasion impact (Los Angeles) before and after 25 and 50 freezing cycles displayed in Tables 3 and 4, and figures 1-3. From the congruent values aberrate the abrasion resistance and porosity in stone samples (Table 1), and the percentage of irregularly shaped grains, water absorption and resistance to freezing (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> method) of aggregate samples (Table 2). These differences are a direct consequence of various starting sizes of samples in relation with the corresponding method of investigation, degree of uniformity and anisotropy, the relationship between coarser and finer crystals, percentage of mechanical and other discontinuities and defects in stone. For instance comparison of results obtained from a method that deals with crystals (abrasion) and a method that deals with crystal aggregates, an alignment of numerous coarser or finer crystals (impact investigations). Particular emphasis should be placed on the structural and textural characteristics which can greatly influence the interpretation of the obtained results. This is mainly relevant to the size, shape and relationship between grains, and also the existence of orientated structures and recrystallization processes.

The influence of freezing is much smaller than was expected particularly after 50 cycles. It can be presumed that after 25 freezing cycles a stabilization of physico-mechanical properties occurs after reduction of nonhomogeneity and defects in both crystals and rocks.

Experience acquired from these investigations could find its practical application in determination and evaluation of various stone type aggregate quality.