

ОЦЕНА УПОТРЕБЉИВОСТИ СЕРПЕНТИНИСАНОГ ПЕРИДОТИТА КАО ТЕХНИЧКО-ГРАЂЕВИНСКОГ КАМЕНА

Небојша Кнежевић¹, Станислава Кецман², Томислав Дубочанин², Душко Зорић²

¹nebojsa.knezevicrf@unibl.org

¹Рударски факултет Универзитета у Бања Луци, Република Српска, ²Грађевински Институт д.о.о. Бања Лука, Република Српска

Апстракт

У току геолошких истраживања, једна од обавезних и изузетно важних фаза је детаљно лабораторијско испитивање материјала, које обухвата минералошко-петрографску, хемијску и физичко-механичку карактеризацију, што је посебно значајно при оцјени употребљивости камена у различите сврхе. У раду су анализирани узорци серпентинисаног перидотита са различитих дубинских интервала и експлоатационих зона, с циљем оцјене њихове погодности за примјену у цестоградњи и грађевинарству. Истраживање је обухватило испитивање физичко-механичких својстава, отпорности на хабање и дејство мраза, као и минералошко-петрографску и хемијску карактеризацију материјала. Добијени резултати показују да испитивани материјал карактеришу високе вриједности притисне чврстоће, низак садржај упијања воде и мала порозност, што указује на компактну структуру и добру отпорност на спољашње утицаје. Резултати испитивања отпорности на хабање и мраз потврђују стабилност материјала у условима интензивних механичких и климатских оптерећења. Минералошко-петрографском анализом утврђено је доминантно присуство серпентинисаног перидотита са израженим учешћем MgO и SiO₂ компоненти. На основу добијених резултата може се закључити да испитивани материјал посједује повољне техничке карактеристике и значајан потенцијал за примјену у производњи каменних агрегата и изградњи инфраструктурних објеката

Кључне речи: серпентинисани перидотит, физичко-механичка својства, техничко-грађевински камен, камени агрегати.

Тема скупа: Геологија и геолошка истраживања и заштита животне средине-актуелна питања и дилеме

Увод

Развој савремене инфраструктуре уско је повезан са доступношћу квалитетних минералних сировина за производњу грађевинских материјала. Природни камени агрегати представљају основни материјал у изградњи саобраћајница, хидротехничких објеката, жељезничких коридора и бетонских конструкција.

Њихова дуготрајност и функционалност директно зависе од физичко-механичких карактеристика стијенске масе из које су произведени.

Ултрабазичне стијене, а посебно серпентинисани перидотити, представљају значајан потенцијал за производњу техничко-грађевинског камена. Међутим, степен серпентинизације и геолошке карактеристике лежишта могу значајно утицати на њихова техничка својства. Циљ овог рада је оцјена техничке употребљивости серпентинисаног перидотита на основу лабораторијских испитивања физичко-механичких, хемијских и минералошко-петрографских карактеристика стијенске масе.

Материјали и методе испитивања

Истраживањем су обухваћени узорци серпентинисаног перидотита добијени са локалитета на којем је активна експлоатација техничко-грађевинског камена. Узорци су подијељени према:

- дубинском интервалу бушотина BBN-1 и BBN-2 (нпр. 15–18 m, 20–23 m, 35–40 m, итд.)
- експлоатационим зонама/позицијама означеним као KN и DN (KN-1 до KN-15; DN-1 до DN-8)

Комплетна физичко-механичка и хемијска анализа урађена је за узорке KN-1 до KN-4, док је за остале узорке (DN-1 до DN-8 и KN-9 до KN-15) извршена дјелимична анализа, са фокусом на параметре који су најзначајнији за оцјену употребљивости у цестоградњи (притисна чврстоћа, запреминска маса, упијање воде, отпорност на хабање и мраз).

За потребе овог рада, из примарних лабораторијских резултата израчунати су:

- просјечне вриједности притисне чврстоће и осталих параметара по групама узорака (комплетне vs. дјелимичне анализе)
- распони вриједности (минимум, максимум) по дубинским интервалима
- основни трендови промјене својстава са дубином (нпр. варијација притисне чврстоће по дубини BBN-1 и BBN-2)

Резултати су приказани у виду табела и описаних графичких корелација (дијаграми зависности чврстоће од дубине, упијања воде од порозности и сл.).

Сва лабораторијска испитивања спроведена су у акредитованој лабораторији у складу са важећим националним и међународним стандардима.

Резултати испитивања и коментари

Физичко-механичка својства - комплетне анализе (KN-1 до KN-4)

У Табели 1 приказани су основни параметри комплетних анализа за узорке

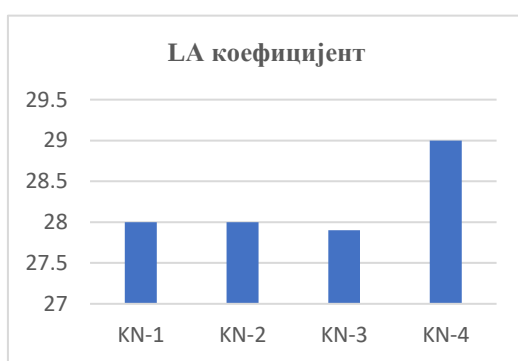
KN-1 до KN-4.

Табела 1. Основни физичко-механички и хемијски параметри - комплетна анализа (KN-1 до KN-4)

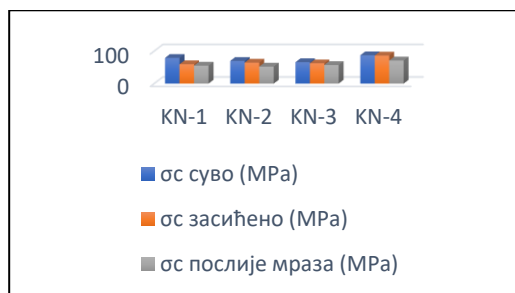
Ознака узорка	Дубина / зона	σс суво (MPa)	σс засићено (MPa)	σс после мрза (MPa)	LA (%)	Беме (cm³/50 cm²)	Упијање воде (%)	ρзар (kg/m³)	Порозност (%)	SiO₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Губитак жадењем (%)	Петрографија
KN-1	BBN-1, 25-30 m	79,0	59,5	55,2	28,0	12,8	0,20	2850	0,81	40,0	32,2	5,5	8,10	серпентиниса ни перидотит
KN-2	BBN-2, 20-25 m	69,72	64,45	52,2	28,0	12,7	0,44	2870	0,75	41,0	33,1	8,6	10,2	серпентиниса ни перидотит
KN-3	ЕРК	65,81	62,41	57,10	27,9	12,9	0,51	2750	0,65	45,0	31,9	7,2	7,9	серпентиниса ни перидотит
KN-4	ЕРК	87,2	86,3	71,0	29,0	15,3	0,33	2840	0,79	43,0	32,7	9,1	8,8	серпентиниса ни перидотит



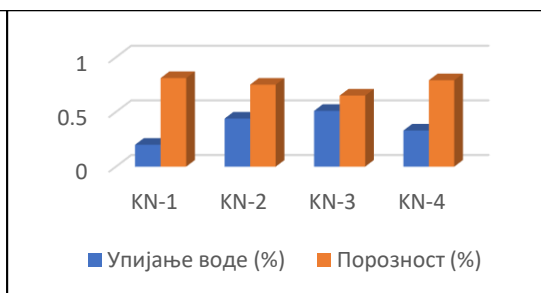
Слика 1. Притисна чврстоћа у сувом стању



Слика 2. LA коефицијент



Слика 3. Пад чврстоће након засићења и замрзавања



Слика 4. Упијање воде и порозност

- Све вриједности притисне чврстоће у сувом стању (65,81 - 87,2 МПа) указују на врло чврст материјал, погодан за високо оптерећене слојеве коловоза и бетонске елементе.

Округли сто: Геологија и рударство као прилике за привредни развој и еколошки изазови, Приједор, 2026.

- Пад чврстоће при засићењу водом и након замрзавања је релативно умерен, што сведочи о доброј микроструктурној повезаности зрна и ниској микропукотинској порозности.
- Вриједности LA индекса (~28-29%) и Беме губитка (~12,7 - 15,3 cm³/50 cm²) указују на добру до задовољавајућу отпорност на хабање и дробљење, што је у складу са захтјевима за носеће слојеве коловозних конструкција.
- Упијање воде (0,20 - 0,51%) и порозност (<1%) су врло ниски, што потврђује компактан карактер материјала и добру трајност у условима изложености води и цикличном смрзавању-одмрзавању.
- Хемијски састав (висок MgO и значајан садржај SiO₂) потврђује ултрамафитни карактер серпентинисаног перидотита, са релативно ниским садржајем CaO и умјереним садржајем Al₂O₃ и Fe₂O₃.

Физичко-механичка својства - дјелимичне анализе (DN-1 до DN-8, KN-9 до KN-15)

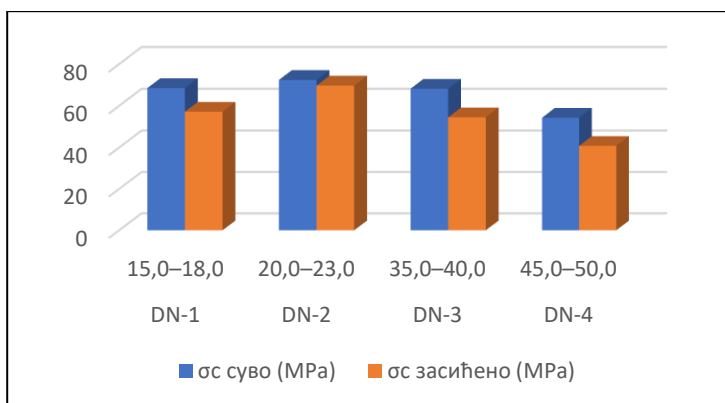
Због обима података, у доњим табелама су приказане слиједеће групе узорак:

- DN-1 до DN-4 (BBN-1, различити дубински интервали)
- DN-5 до DN-8 (BBN-2, различити дубински интервали)
- KN-9 до KN-15 (EPK зона)

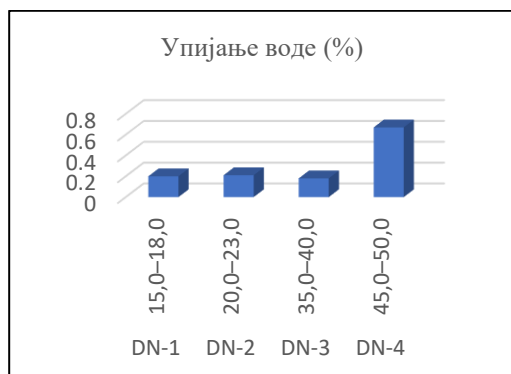
- Узорци DN-1 до DN-4 (BBN-1)

Табела 2. Физичко-механичка својства - DN-1 до DN-4 (BBN-1)

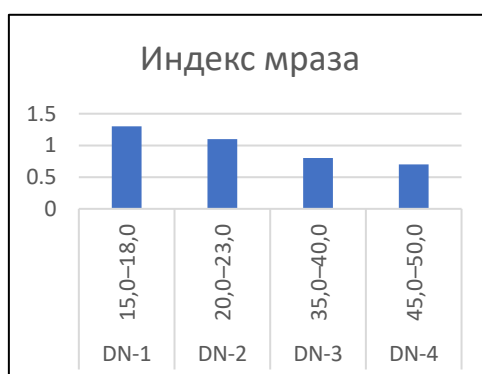
Ознака	Дубина (m)	σс суво (MPa)	σс засићено (MPa)	Упијање воде (%)	ρ _{зрп} (kg/m ³)	Индекс мраза	Беме (cm ³ /50 cm ²)
DN-1	15,0–18,0	68,5	57,2	0,20	2805	1,3	12,8
DN-2	20,0–23,0	72,4	69,7	0,21	2790	1,1	13,0
DN-3	35,0–40,0	68,2	54,5	0,18	2800	0,8	13,0
DN-4	45,0–50,0	54,3	40,8	0,67	2730	0,7	13,4



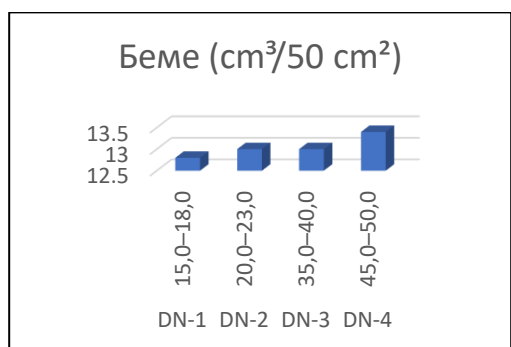
Слика 5. Притисна чврстоћа у сувом и засићеном стању



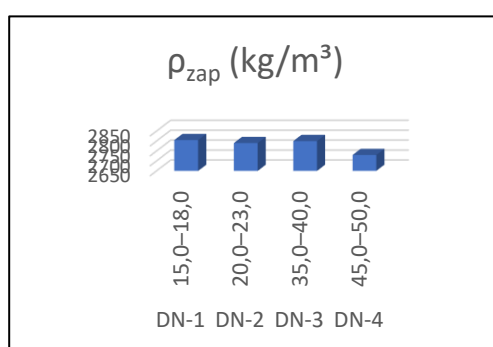
Слика 6. Упијање воде



Слика 7. Индекс мраза



Слика 8. Беме



Слика 9. ρ_{зар}

- Узорци до ~ 40 m дубине (DN-1 до DN-3) имају сличне и релативно високе вриједности притисне чврстоће и ниско упијање воде.
- DN-4 (45–50 m) показује осјетан пад притисне чврстоће и пораст упијања воде, уз нешто мању запреминску масу. Ово може указивати на локалну зону интензивније серпентинизације, расиједне зоне или повећану испуцалост.

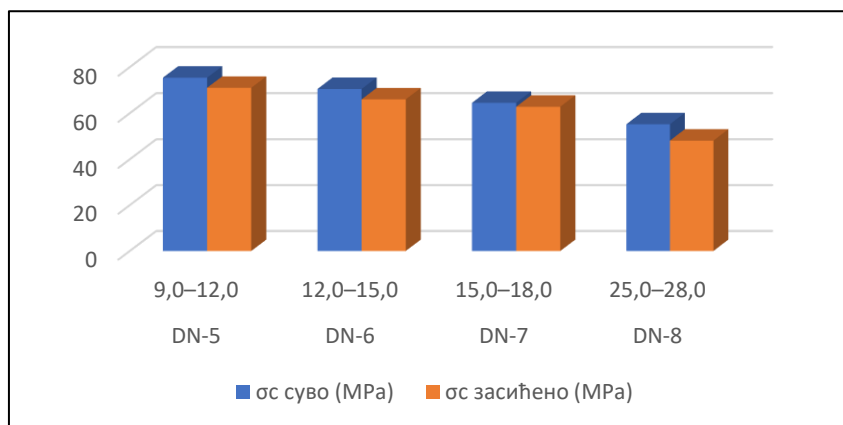
Индекс мраза за све узорке је низак, што потврђује задовољавајућу постојаност на циклично смрзавање-одмрзавање.

- Узорци DN-5 до DN-8 (BBN-2)

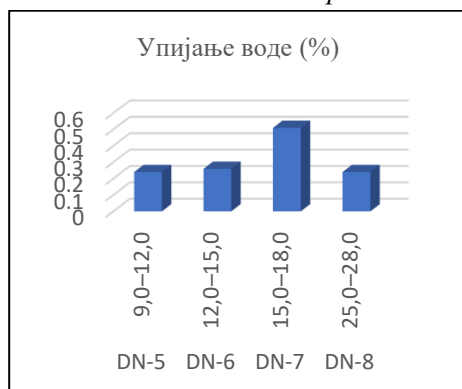
Табела 3. Физичко-механичка својства - DN-5 до DN-8 (BBN-2)

Ознака	Дубина (m)	σс суво (MPa)	σс засићено (MPa)	Упијање воде (%)	ρ _{зар} (kg/m³)	Индекс мраза	Беме (cm³/50 cm²)
DN-5	9,0–12,0	75,4	71,0	0,24	2802	1,4	12,7
DN-6	12,0–15,0	70,5	66,0	0,26	2780	1,6	13,4
DN-7	15,0–18,0	64,5	62,8	0,51	2750	1,20	15,1
DN-8	25,0–28,0	55,2	48,1	0,24	2740	1,15	16,2

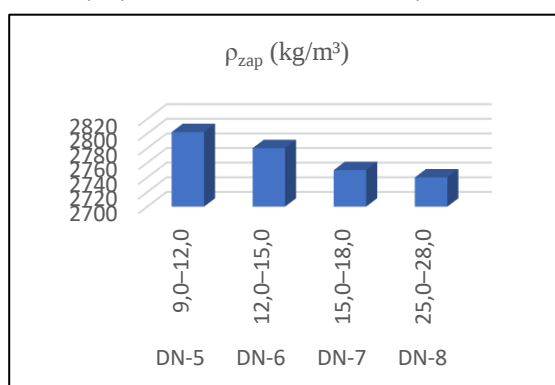
Округли сто: Геологија и рударство као прилике за привредни развој и еколошки изазови, Приједор, 2026.



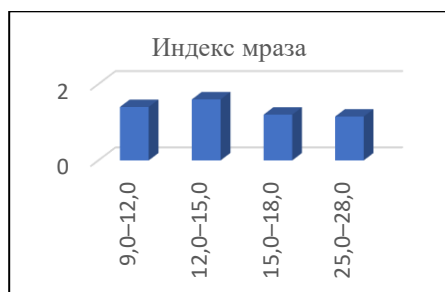
Слика 10. Притисна чврстоћа у сувом и засићеном стању



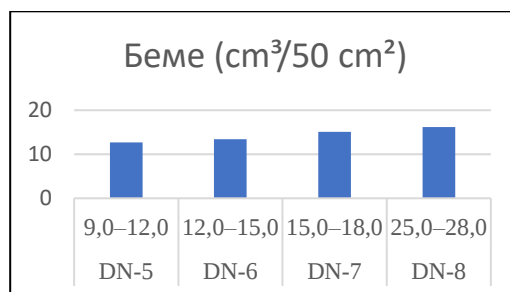
Слика 11. Упијање воде



Слика 12. Резултати ρ_{zap}



Слика 13. Индекс мрза



Слика 14. Резултати Беме

- Вриједности притисне чврстоће су углавном веће од 60 МПа за плиће нивое (DN-5, DN-6, DN-7), док DN-8 (25 - 28 m) показује нешто ниже, али и даље задовољавајуће вриједности (~ 55 МПа).
- Беме показатељи расту у узорцима DN-7 и DN-8 (15,1 - 16,2 cm³/50 cm²), што указује на благо смањену отпорност на абразију у односу на плитке нивое.

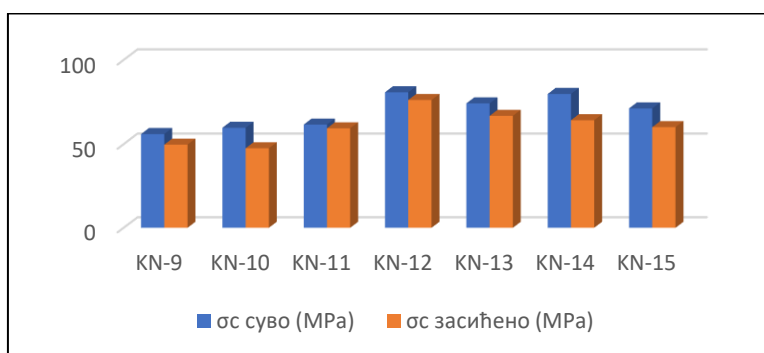
Округли сто: Геологија и рударство као прилике за привредни развој и еколошки изазови, Приједор, 2026.

- Упијање воде се креће у опсегу 0,24 - 0,51 %, што је и даље врло повољно за природни камен.

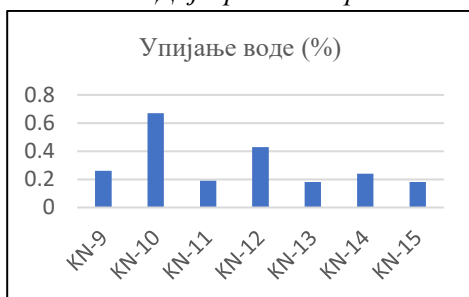
- Узорци KN-9 до KN-15 (ЕРК зона - дјелимичне анализе)

Табела 4. Физичко-механичка својства - KN-9 до KN-15 (ЕРК)

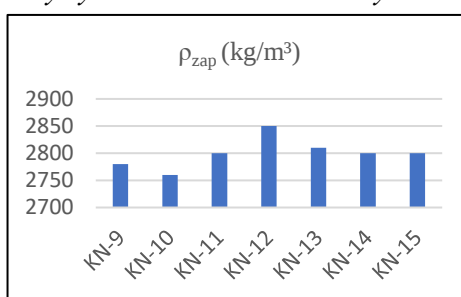
Ознака	σ_c суво (МПа)	σ_c zasiћено (МПа)	Упијање воде (%)	ρ_{zap} (kg/m ³)	Индекс мрза	Беме (cm ³ /50 cm ²)
KN-9	56,0	49,7	0,26	2780	1,22	15,8
KN-10	59,7	47,5	0,67	2760	1,31	16,1
KN-11	61,6	59,4	0,19	2800	1,24	14,2
KN-12	80,8	76,2	0,43	2850	1,14	13,9
KN-13	74,2	66,8	0,18	2810	1,8	13,8
KN-14	79,8	64,2	0,24	2800	1,01	15,8
KN-15	71,2	60,1	0,18	2800	0,98	16,1



Дијаграм 15. Притисна чврстоћа у сувом и zasiћеном стању



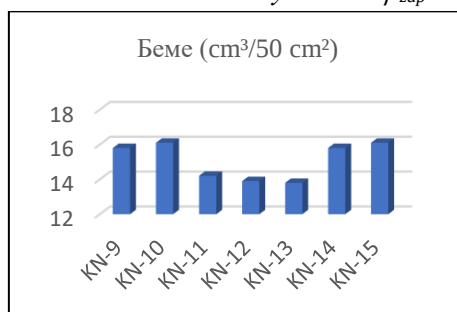
Слика 16. Упијање воде



Слика 17. Резултати ρ_{zap}



Слика 18 - Индекс мрза



Слика 19. Резултати Беме

- Већина узорака KN-9 до KN-15 показује σ суво > 60 МПа, са неколико изузетака (KN-9, KN-10) који се налазе близу доње границе, али и даље у опсегу прихватљивом за употребу у носећим слојевима мањег оптерећења.
- Упијање воде је стабилно ниско (0,18 - 0,67 %), уз благо повећање код KN-10, што би могло бити повезано са локалним структурним особеностима.
- Беме индикатори (13,8 - 16,1 $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$) говоре о доброј до умјерено доброј отпорности на абразију, што је прихватљиво за већину типова коловозних слојева и тампон слојева.

Поређење са захтјевима стандарда и праксе

У типичној пракси цестоградње:

- за носиве слојеве коловоза (подлоге и носеће слојеве) захтијевају се вриједности притисне чврстоће камена > 60 МПа, ниско упијање воде ($< 1\text{-}2\%$) и LA индекс обично $< 30 - 35 \%$;
- за асфалтне смјеше и хабајуће слојеве пожељни су агрегати са LA $< 30 \%$ и Беме $< 15 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$.

Сагледано у том контексту:

- већина испитиваних узорака испуњава или надмашује наведене критеријуме за чврстоћу и упијање воде;
- LA вриједности (27,9 - 29,0 %) су унутар пожељног опсега,

Беме вриједности су углавном $\leq 15 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$, осим код појединих узорака (нпр. KN-10, KN-15) гдје се крећу око $16 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$, што је и даље прихватљиво за већину намена

Хемијска и минералошко-петрографска карактеризација

Хемијски састав узорака KN-1 до KN-4 карактерише:

- $\text{SiO}_2 \approx 40 - 45 \%$
- $\text{MgO} \approx 31,9 - 33,1 \%$
- $\text{CaO} \approx 5,5 - 9,1 \%$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 1,7 - 3,3 \%$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 4,1 - 6,9 \%$
- губитак жарењем $\approx 7,9 - 10,2 \%$

Овај састав је типичан за серпентинисане ултрамафите, са доминантним присуством серпентина и реликтних олвина/пироксена.

Минералошко-петрографски опис свих узорака потврђује серпентинисани перидотит као доминантну стијену.

Са аспекта техничке употребљивости:

- висок MgO и умерен SiO₂ немају негативан утицај на механичка својства, али се морају узети у обзир при евентуалној употреби у контактима са цементним матрицама (потенцијалне хемијске реакције у дугом року - нпр. алкали-карбонатне, иако су овдје индиректне).
- губитак жарењем указује на присуство хидратних минерала (серпентин, могуће хлорит), што може утицати на понашање при високим температурама, али нема значајнијег утицаја на уобичајене грађевинске услове експлоатације.

Умјесто закључака

На основу приказаних резултата може се формулисати неколико кључних запажања:

1. Висока притисна чврстоћа и ниско упијање воде

Већина испитиваних узорака серпентинисаног перидотита показује притисну чврстоћу у сувом стању изнад 60 МПа, са врло ниским упијањем воде (<0,7%) и малом порозношћу (<1%). Ово указује на компактан и механички стабилан материјал.

2. Добра отпорност на хабање и мраз

LA и Беме показатељи свједоче о задовољавајућој до доброј отпорности на абразију, док ниски индекси мрза потврђују стабилност материјала при цикличном смрзавању-одмрзавању, што је кључно за употребу у коловозним конструкцијама.

3. Утицај дубине и позиције узорковања

Уочава се да поједини дубински интервали (нпр. DN-4, DN-8) показују нешто ниже вриједности притисне чврстоће и повећано упијање воде. Ово указује на потребу детаљнијег геолошко-структурног карактерисања лежишта, како би се у пракси избјегле потенцијално неповољне зоне при планирању фронта експлоатације.

4. Потенцијал за широк спектар примјена

Сагледано у цјелини, испитивани серпентинисани перидотит показује врло повољне техничке карактеристике за употребу као техничко-грађевински камен, посебно за:

- носеће и подлоге слојеве коловозних конструкција,
- тампон слојеве, насипе и језгра потпорних конструкција,
- производњу разних фракција каменог агрегата за бетон и асфалт (уз провјеру специфичних захтјева појединих стандарда).

Референце/Литература

BAS EN 1926:2009. Методе испитивања природног камена - Одређивање једнооксијалне чврстоће на притисак

BAS EN 1936:2009. Методе испитивања природног камена - Одређивање привидне и стварне густоће, опће (укупне) и отворене порозности

BAS EN 1097-2:2011. Испитивања механичких и физикалних својстава агрегата - Дио 2: Методе одређивања отпорности на дробљење

BAS EN 1097-6:2023. Одређивања механичких и физичких карактеристика агрегата - Дио 6: Одређивање стварне запреминске масе и упијње воде

BAS EN 932-3:2023. Испитивања опћих карактеристика агрегата - Дио 3: Поступак и терминологија за поједностављени петрографски опис

JUS B.B8.001. Постојаност на дејство мраза

JUS B.B8.015. Отпорност на брушење по Беме-у

JUS B.B8.043. Отпорност на хабање мицро Девал

JUS B.B8.042. Хемијски састав