

Cemexovi kamenolomi ponad Kaštelanskog zaljeva

Cemex quarries above the Kaštela Bay

Dražen Navratil, Željko Dedić, Josip Terzić

Zemljopisno-gospodarske značajke područja

Eksploatacijsko polje mineralnih sirovina za proizvodnju cementa „Sv. Juraj – Sv. Kajo“, nalazi se na području Općine Kaštel Sućurac i grada Solina. Prostire se na južnim padinama planine Kozjak, na nadmorskoj visini od 70 do 340 m. Izduženo je smjerom SSZ-JJI (cca 6 km), širine cca 0,9 km. Eksploatacijsko polje ima oblik nepravilnog mnogokuta i zauzima površinu od 334,85 ha. Ležište sirovine za proizvodnju cementa na eksploatacijskom polju „Sv. Juraj-Sv. Kajo“ je u eksploataciji dugi niz godina od početka 20. st. Eksploatacija mineralne sirovine na ovom ležištu obavlja se površinskim kopom, na više etaža visine do 20 m.

U ležištu postoji izmjena tri glavna tipa sirovina koje predstavljaju komponente sirovina (visoka, normalna i niska) za proizvodnju cementa. Ležište se odlikuje jednostavnom građom, konstantnom debljinom i ujednačenim sastavom. Planirana prosječna eksploatacija sirovine za proizvodnju cementa na eksploatacijskom polju „Sv. Juraj-Sv. Kajo“ iznosi 2 500 000 mil. tona godišnje. Veliki kapacitet intenzivne rudarske djelatnosti omogućuju dva, međusobno udaljena industrijska pogona za primarnu preradu iskopane sirovine, locirana unutar granica eksploatacijskog polja.

Geološke značajke ležišta

Ležište izgrađuju naslage srednjoeocenskog fliša. Litološki članovi fliša su najvećim dijelom dobro uslojeni. Osnovni položaj slojeva je monoklinalan, generalno nagnut prema sjeveroistoku.

Samo ležište izgrađuje **srednja flišna zona** koju Marjanac (1987) naziva „olistostroma“ i **gornja flišna zona** koju je podijelio u tri člana: donji, srednji (pješčenjački) i gornji (konglomeratičan). Srednja flišna zona predstavlja izuzetno debelu zonu u kojem se uočavaju tri karakteristična litološki različita člana: donji debritni član, srednji kalkarenitni član i gornji laporni član.

Geološki stup ležišta kroz sedimente eocenskog fliša, od najstarijih litoloških članova prema mlađim se sastoji od: debritne serije (V_4 i VM-sirovinske komponente), lapora s numulitima (V_1), numulitične breče, kalkarenita (V_3) i glinoviti vapnenca (kalksilita) (V_1), vapnenačkog lapora (No_1 No_2 –sirovinska komponenta), te izmjene pješčenjaka i lapora (N_1 i N_2 – sirovinske komponente).

Srednja flišnu zonu čini debritna serija (V_4 i VM-sirovinske komponente). Ovaj debritni sediment debeo je oko 76-80 m i sadrži klaste plitkovodnih vapnenaca i prijelaznih naslaga te bazenskih sedimenata u muljnoj osnovi. Plitkovodni vapnenci izgrađuju dekameterske blokove i klaste različitih veličina. Blokovi su predstavljeni eocenskim foraminiferskim vapnencima (uglavnom biomikrit), vapnencima s rožnjacima, te blokovi eocenskih sitnozrnatih biomikrita s glaukonitom.

Zatim slijede lapori sa numulitima (V_1), numulitične breče, kalkareniti (V_3) i glinoviti vapnenci (V_1). Srednji član ove zone predstavlja normalno građirani kalkarenit. Ovaj član je debeo 27-60 m i u donjem dijelu je građen od velikog broja pakiranih numulita (tzv. „numulitna breča“). Numulitna breča je debljine sloja oko 10 m, a veličine sitnog do krupnog pijeska. Udio cijelih foraminifera postupno opada prema gore, a raste udio skeletnog kršja, tako da stijena postaje čvrsti plavosivi kalkarenit (u narodu poznat kao „plavac“) debeo oko 12 m.

Lapori s numulitima (V_1) sastoje se od lapora žute do plavkaste boje s numulitima. Koncentracija numulita je različita i nalazimo stijenu s rijetko kojim fosilom do gnijezda spljoštenih numulita, gotovo bez laporovitog veziva. Zona lapora s pretaloženim numulitima može se pratiti duž cijeloga ležišta. Kalkareniti (V_3) se sastoje od karbonatnog detritusa organogenog podrijetla, rijetko sa zrcima kvarca i glaukonita, ulomcima foraminifera i koralja. Debljina ovog litočlana varira od 40-100 m i može se pratiti kroz cijelo ležište.

Lapori s numulitima kontinuirano prelaze u numulitne vapnence koji se nastavljaju u kalksilit, te glinoviti vapnenac (kalksilit) na kojem slijedi vapnenački lapor (tupina). Kalkareniti i kalksiliti su sitnozrnaste strukture i sivo-zelenkaste boje. Nalaze se na južnoj strani sadašnjeg kopa i položeni su na lapore s pretaloženim numulitima. Glinoviti vapnenci (V_1) nalaze se između

kalkarenita, kalksilita i tupine (vapnenačkog lapora). Pružaju se neprekinuto duž ležišta. Prema podini i krovini prijelazi su postupni. Sadrže 77,5-80% CaCO_3 i pripadaju visokoj sirovini.

Gornji član ove zone predstavljen je vapnenačkim laporom (No_2 – sirovinska komponenta) koji je debeo oko 30-60 m i zbog idealnog udjela CaCO_3 (74-77,5%) predstavlja glavnu sirovinsku komponentu za cementnu industriju u Splitskoj regiji. Vapnački lapor ili „tupina“ postupno prelazi iz podine (glinoviti vapnenac) a u krovini se nalazi jasno izražena oštra granica s tankoslojevitom izmjenom pješčenjaka i lapora gornje flišne zone (N_1 i N_2 – sirovinske komponente). Pruža se kontinuirano kroz cijelo ležište, a debljina joj iznosi do 80 m, sivo-plavičaste boje.

Gornju flišnu zonu predstavljaju konglomerati kao najznačajniji litofacijalni član jer izgrađuju debela sedimentna tijela. Pjeskoviti lapori u gornjoj polovici izgrađuju znatan dio stupca sedimenata, dok se turbiditi samo u donjem dijelu ove zone. Unutar gornje flišne zone može se izdvojiti nekoliko facijesa: tankoslojeni kalkareniti koji tvore lamine i lapori u debljinama od nekoliko centimetara do nekoliko decimetara. Kalkareniti su sitnozrnati do krupnozrnati, a neki slojevi sadrže i detritus ruditne veličine. Debljine kalkarenita su u rasponu od 0.2-15 cm. Slijede naslage pjeskovitog lapora koji imaju slično pojavljivanje kao prethodno opisana grupa facijesa, te pjeskoviti kalkareniti ili pješčenjaci, tankoslojeni sedimenti debljine od 5-60 cm. To su slabo do srednje sortirani areniti s promjenjivim udjelom nekarbonata, ali rijetko više od 30%, a nekarbonatni detritus obuhvaća brojna zrna rožnjaka i mineralna zrna (različiti varijeteti kvarca i feldspata), zatim zrna pirita, piritizirane foraminifere, zrna glaukonita i tanke proslojke ugljevitih tvari. Izmjena tankoslojevitih pješčenjaka, lapora i vapnenaca nalazi se sjeverno od zone tupine u sadašnjem kopu te se može pratiti duž cijelog tupinoloma (MARJANAC, 1987; LUKŠIĆ et al., 2008.).

Sediment muljne potpore kakav se nalazi u donjem članu srednje zone karakterističan je za gravitacijski tok sedimenata kod kojeg su se klasti kretali zajedno s osnovom, a bili su podržavani čvrstinom osnove, gustoćom osnove i uzgonom. Takav tok naziva se „debris flow“, odnosno debritni tok. Smatra se da debritni tok nastaje pretvorbom iz podvodnog klizanja koje je na svom putu niz padinu uklopilo dovoljnu količinu vode uz razaranje glinovitog sedimenta, čime je stvorena kohezivna muljna osnova.

Određivanje kakvoće mineralne sirovine

Kemijski kriteriji baziraju se na zastupljenosti određene razine cementnih modula u pojedinom litološkom članu ili slijedu naslaga litoloških članova. Na temelju glavnih oksida; CaO , Al_2O_3 , SiO_2 i Fe_2O_3 izračunati su cementni moduli: **SZ** – koeficijent zasićenja, **SM** – silikatni modul i **AM** – aluminatni moduli. Prema Matijaci i Vujecu (1990) najvažniji modul je stupanj zasićenja (**SZ**), koji pokazuje odnos efektivnog, tj. stvarnog sadržaja CaO koji u normalnom procesu pečenja i hlađenja klinkera može biti vezan na okside SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 .

Stupanj zasićenja (SZ) daje pravu sliku o kvaliteti cementa kao i o tehnološko-termičkim svojstvima sirovine. Normalne vrijednosti SZ normalnog portland cementa su od 90-95. Sirovine koje imaju SZ 90-98 smatraju se sirovinama koje se jako dobro peku. S porastom SZ iznad 102 mora se računati i sa slobodnim CaO u klinkeru, koji stvara vremensku nestabilnost cementa. Vrijednosti SZ ispod 90 olakšavaju pečenje, ali i pospešuju stvaranje nalijepka i sirovinskog prstena u peći.

Silikatni modul (SM) varira između 1,9-3,3. Cement traži odnos 2,2 do 2,6. Kod većeg silikatnog modula slabi pečenje klinkera sa smanjenjem likvidne faze i smanjenjem tendencije stvaranja prstena u peći.

Aluminatni modul (AM) varira između 1,5-2,5. On određuje sastav likvidne faze u klinkeru. Mali aluminatni modul karakterizira niska toplina hidratacije, sporo očvršćivanje i sporo vezivanje cementa. Visoki aluminatni modul zajedno s niskim silikatnim modulom ubrzava vezivanje, te je zbog toga potrebno dodavati više gipsa.

Na temelju zastupljenosti određene razine cementnih modula u pojedinom litološkom članu ili slijedu naslaga litoloških članova, a koje su dobivene iz rezultata kompletnih kemijskih analiza u intervalu svaka 2 m i korištenog tehnološkog postupka pripreme sirovine, došlo se do podjele ležišta mineralne sirovine na **tri osnovne komponente** po kemijskom sastavu i rasponima vrijednosti cementnih modula (LUKŠIĆ et al. 2008). (Tabl. 1).

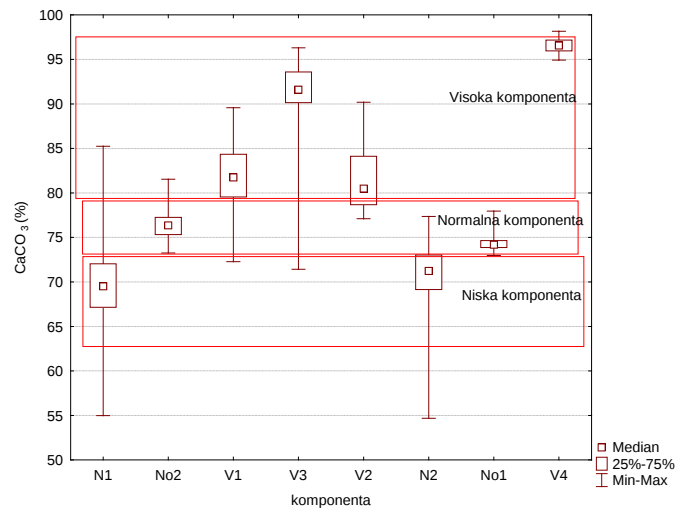
To su tzv. „niska“, „normalna“ i „visoka“ komponenta mineralnih sirovina, od kojih „niska“ ima dva varijeteta u ležištu (N_1 i N_2), „normalna“ također dva varijeteta (No_1 i No_2), a „visoka“ četiri različita varijeteta (V_1 , V_2 , V_3 i V_4) te (VM) kao „visoka mješavina“. U slici 1. vidljivo je da se niske komponente N_1 i N_2 ne razlikuju po distribuciji CaCO_3 . Slično je i s No_1 i No_2 ,

dok visoke komponenta gotovo ne razlikuju V_1 i V_2 a V_3 i V_4 , pokazuju povišeni sadržaj CaCO_3 u odnosu na prve dvije visoke komponente. Komponenta V_4 je najmanje zastupljena u ležištu (Sl. 1).

Koeficijent korelacije među glavnim komponentama je vrlo visok (Tabl. 2). Premda su fliške naslage generalno heterogeni sediment, promjene u kemijskom sastavu ležišta su po pravcu pružanja i smjeru nagiba vrlo male, dok su promjene u vertikalnom slijedu zbog promjene u litološkom sastavu veće. No analizirajući varijabilnost kemijskog sastava ležišta u 2 m bušotinskim intervalima, gdje se intervali mogu promatrati kao slučajno odabrane intervali u različitim litološkim članovima (ušća bušotina su na različitim nadmorskim visinama i nalaze se unutar različitih litoloških članova) predstavljaju slučajne dužine odabrane na mreži bušenja a daju varijabilnost unutar cijelog istraživog tijela mineralne sirovine.

Kemijski varijeteti	Litološki sastav	SZ	SM	KEMIJSKI SASTAV	Rac. CaCO_3
N1	Pješčenjaci, lapori i konglomerati na sjevernim dijelovima kopa, (sjeverne etaže Sv. Jure i Sv. Kajo)	<90	>2,7	min	60.71
				max	77.33
				average	70.04
N2	Tamno sivi i žuti lapori, glinoviti lapori, u proslojcima	<90	<2,7	min	57.14
				max	74.88
				average	70.62
No2	Vapneni lapor (tupina), lapor s numulitima	90-110	>2,6	min	73.64
				max	79.85
				average	76.08
No1	Vapneni lapor u gornjim dijelovima (u podini izmjena pš, konglom, lapora)	90-110	<2,6	min	73.29
				max	77.96
				average	74.46
V1	Laporoviti vapnenac, lapor s numulitima-veći udio numulita	>110	>2,7	min	77.02
				max	88.13
				average	81.69
V2	Laporoviti vapnenac	110-250	<2,7	min	77.29
				max	87.88
				average	81.44
V3	Vapnenac (kalkareniti, kalkruditi -u krovini lapora s numulitima; "numulitna breča")	>250		min	87.63
				max	95.30
				average	91.95
V4	Vapnenac (bijeli biokalkruditi)	>1000		min	95.25
				max	97.57
				average	96.33

Tablica 1. Prikaz raspona vrijednosti cementnih modula osam kemijskih sirovinskih komponenti cijelog ležišta „Sv. Juraj- Sv. Kajo“



Slika 1. Prikaz raspona sirovinskih komponenti i njihove podjele na tri osnovne komponente po kemijskom sastavu.

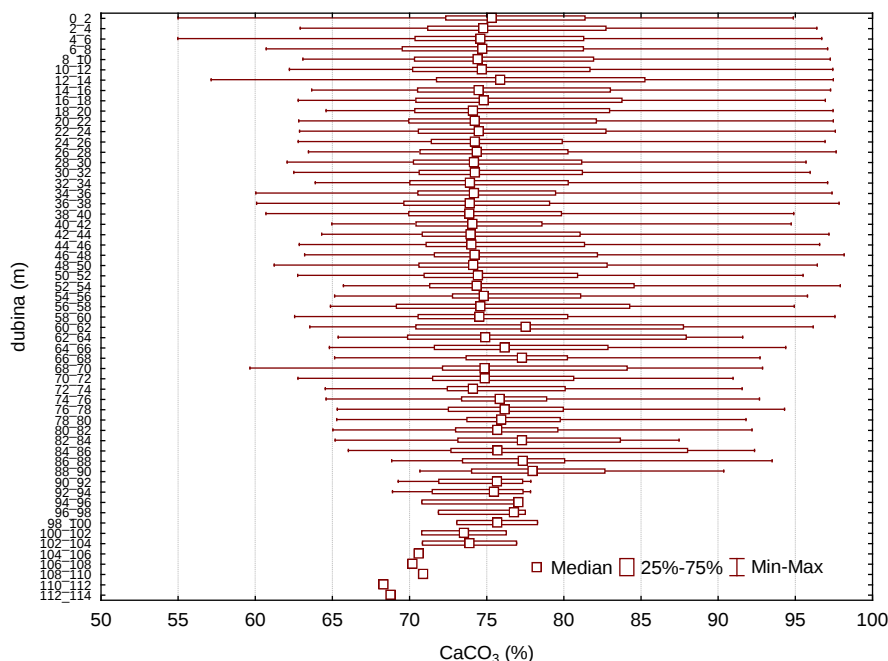
Proračun srednjeg kemijskog sadržaja korisne mineralne sirovine i koeficijenta varijacije (analiza kvalitete ležišta)

Kako bi se stekao uvid u distribuciju kemijskih komponenti unutar litoloških članova u ležištu te u njihovu prostornu varijabilnost unutar okonturenog ležišta mineralne sirovine načinjena je analiza varijance čije je svrha bila i utvrđivanje prostorne homogenosti tj. iste varijabilnosti glavnih kemijskih komponenti sirovine.

Rezultati jednosmjerne analize varijance ukazuju da ne postoje statistički značajne varijabilnosti srednjih vrijednosti unutar i između grupa podataka. Statistička značajnost ovih komponenti (analiziranih intervala i kemijskih komponenti) ukupne varijance utvrđuje se na osnovu kritičnih vrijednosti F testa na nivou pouzdanosti 95% i odgovarajućih stupnjeva slobode (KOCH & LINK, 1980; DAVIS, 1986).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
SiO ₂	1,00							
Al ₂ O ₃	0,82	1,00						
Fe ₂ O ₃	0,80	0,98	1,00					
CaO	-0,96	-0,91	-0,90	1,00				
MgO	0,36	0,52	0,55	-0,48	1,00			
SO ₃	0,45	0,18	0,20	-0,40	0,41	1,00		
Na ₂ O	0,62	0,68	0,70	-0,69	0,61	0,31	1,00	
K ₂ O	0,60	0,81	0,81	-0,70	0,46	0,06	0,58	1,00

Tablica 2. Koeficijenti korelacije kemijskih komponenti u ležištu



Slika 2. Distribucija CaCO_3 po dubinskim intervalima na prostoru cijelog ležišta, ujednačenost vrijednosti ukazuje na homogenost ležišta.

Distribucija CaCO_3 po dubinskim intervalima na prostoru cijelog ležišta, ujednačenost raspona vrijednosti ukazuje da se rudno tijelo ima distribuciju kemijskog sastava korisnih komponenti koji omogućuju homogenu eksploataciju ležišta prilagođenu tehnološkom procesu bez gubitaka u smislu štetnih komponenti (Sl. 2).

Inženjerskogeološke značajke istraživanog područja

Od inženjerskogeoloških istražnih radova provedeno je inženjerskogeološko kartiranje sa snimanjem diskontinuiteta osnovnog strukturnog sklopa kao i određivanje ostalih značajki stijenske mase te utvrđivanjem značajnijih pukotinskih i rasjednih zona, prospekcijom kosina, odnosno napuštenog tunela na području kamenoloma. Kod definiranja inženjerskogeoloških jedinica uz gore navedene istražne radove korišteni su i podatci ustupljeni od investitora, obrađeni u Elaboratu o geomehaničkim uvjetima eksploatacije na području eksploatacijskog polja „Sv. Juraj - Sv. Kajo“ (NAVRATIL & HRŽENJAK, 2009). Na temelju svih prikupljenih podataka utvrđene su karakteristične vrijednosti fizičko mehaničkih svojstava za intaktnu stijenu, značajke stijenske mase izražene preko geološkog indeksa čvrstoće (GSI) u definiranim inženjerskogeološkim jedinicama koje se uglavnom podudaraju s litološkim jedinicama.

U tablici 3 prikazane su srednje vrijednosti osnovnih fizičko-mehaničkih značajki intaktnih uzoraka istraživanih litoloških jedinica unutar flišnog kompleksa. Utvrđena je značajna heterogenost jednoosnih tlačnih čvrstoća; **R1 – vrlo slabe** (1-5 MPa) do **R5 vrlo čvrste** (100-250 MPa) stijene.

Često u heterogenim naslagama filša zbog nemogućnosti dobivanja odgovarajuće veličinu uzorka za laboratorijsko ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće istu utvrđujemo indeksnim testovima. U kamenolomu je korišten *PLT (Point Load Test)* čije su vrijednosti korelirane s jednoosnom tlačnom čvrstoćom preko formule $q_u = 24 \cdot I_{s(50)}$ (najčešće korištene u praksi), odnosno za lapore prema Mišćeviću i suradnicima (1999) $q_u = 7,48 \cdot I_{s(50)}$ (sadržaj karbonata 35-75%) ili $q_u = 8,79 \cdot I_{s(50)}$ (sadržaj karbonata 75-95%).

Inženjerskogeološka / litološka jedinica	Gustoća (eng. „bulk density“) g/cm ³	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	PLT čvrstoća I_{s50} (MPa)	Vlažnost (%)
Izmjena lapora i pješčenjaka s proslojcima brečokonglomerata	2,67 (brečokonglomerati) 2,61 (izmjena lapora i pješčenjaka) 2,60 (lapori)	103,9(brečokonglomerati) 46,2 (izmjena lapora i pješčenjaka) 7,8 (lapori)		
Debritna serija	2,63 (biokalkarenit - biokalkrudit)	72,8 (biokalkarenit – biokalkrudit)		

	2,50 (fosiliferni lapor)	2,4 (fosiliferni lapor)		
Lapori s numulitima	2,65	25,9	2,55	
Kalkareniti	2,68	210,5		
Kalksiltiti			4,1	
Lapori s većim udjelom kalcitne komponente („tupina“)	2,62	73,9		0,93

Tablica 3 Srednje vrijednosti osnovnih fizičko – mehaničkih značajki intaktnih uzoraka stijena dobivenih istražnim bušenjem (GB -1 do GB-11 - podatci iz bušotina preuzeti od investitora).

Inženjerskogeološka / litološka jedinica	Geološki indeks čvrstoće (eng. „Geological Strength Index“) - GSI	Indeks kvalitete jezgre (eng. „Rock Quality Designation“) - RQD
Izmjena lapora i pješčenjaka s proslojcima brečokonglomerata	37 – 58 (Sjeverna i južna strana kamenoloma Sv. Juraj – Sv. Kajo)	36 – 84 %
Debritna serija	-	60 – 83%
Lapori s numulitima	10 – 25 (Središnji dio kamenoloma Sv. Juraj – Sv. Kajo)	25 – 62 %
Kalkareniti	44 – 66 (Sjeverna i južna strana kamenoloma Sv. Juraj – Sv. Kajo)	32 – 87% (najčešće 79-87%)
Kalksiltiti	43 – 61 (Središnji dio kamenoloma Sv. Juraj – Sv. Kajo)	37 – 85%
Lapori s većim udjelom kalcitične komponente („tupina“)	42 – 55 (Sjeverna i južna strana kamenoloma Sv. Juraj – Sv. Kajo)	55 – 91%

Tablica 4 Geološki indeksi čvrstoće i Indeks kvalitete jezgre (RQD) za inženjerskogeološke / litološke jedinice na području kamenoloma „Sv. Juraj – Sv. Kajo“.

Na temelju značajki diskontinuiteta stijenskih masa različitih litoloških članova izvršeno je bodovanje po modificiranoj GSI klasifikaciji (SONMEZ & ULUSAY, 1999) za stijenu podloge. Geološki indeks čvrstoće (eng. „Geological Strength Index“) – GSI je utvrđen snimanjem diskontinuiteta osnovnog strukturnog sklopa kao i njihovih značajki, te definiranja reprezentativnog bloka nakon čega je izvršeno bodovanje obzirom na veličinu bloka i stanje stijenci diskontinuiteta (hrapavost, zijev, ispuna i trošnost) prema modificiranoj GSI klasifikaciji (SONMEZ & ULUSAY, 1999), dok u plastično deformiranim materijalima (lapor s numulitima, debritna serija), gdje nije moguće utvrditi osnovni strukturni sklop izvršeno je bodovanje procjenom prema modificiranoj GSI klasifikaciji za heterogene stijenske mase kao što su naslage flišna (MARINOS & HOEK, 2000; NAVRATIL & HRŽENJAK, 2009).

Većina litoloških odnosno inženjerskogeoloških jedinica, navedenih u tablici 4 spada u **povoljne stijenske mase (GSI =41-60)**. Izmjena lapora i pješčenjaka s proslojcima brečokonglomerata djelomično spada u **slabe stijenske mase (GSI = 21-41)** što možemo djelomično povezati s rasjedima u tom litološkom članu koji doprinose stanju trošnosti, odnosno degradaciji stijenske mase i njenih fizičko - mehaničkih svojstava intaktnog uzorka. Lapori s numulitima uslijed svojih plastičnih deformacija prouzročenih tektonikom spadaju u **vrlo slabe do slabe stijenske mase (GSI <20 i GSI = 21 - 40)**.

U debritnoj seriji, zbog njene izrazite heterogenosti teško je provesti kategorizaciju pomoću GSI klasifikacije za heterogene flišne naslage (MARINOS & HOEK, E., 2000), ali možemo pretpostaviti da se radi o **vrlo slaboj do slaboj** tektonski deformiranoj i heterogenoj stijenskoj masi. Uz geološki indeks čvrstoće (GSI) za procjenu kvalitete stijenske mase u praksi se koristi i indeks kvalitete jezgre RQD (eng. Rock Quality Designation) koji je ustvari linearni pokazatelj razlomljenosti stijenske mase. Dobiva se iz bušotina i predstavlja omjer zbroja svih dužina svijeći jezgre dužih od 10 cm (4 inča) i intervala bušenja, izražen u postotcima.

Utvrđene vrijednosti RQD – a (Tabl. 4) pokazuju velika varijabilnost ovog indeksa u svim litološkim jedinicama koja je vjerojatno uvjetovana tektonikom i strukturnim karakteristikama stijenske mase (uslojena, tanko uslojena, laminirana, borana). Također, poznato je da vrijednosti

RQD-a ovise o međusobnom odnosu orijentacije bušotine prema orijentacijama utvrđenih diskontinuiteta.

Najmanje vrijednosti RQD-a javljaju u laporima s numulitima koji i prema geološkom indeksu čvrstoće (GSI) spadaju u *vrlo slabe do slabe* stijenske mase.

Obzirom na trošnost, dubina trošne zone u području kamenoloma „Sv. Juraj –Sv. Kajo“ ovisi o litološkom sastavu, kemizmu (količini CaCO_3), starosti izvedenih etaža i tektonici.

Terenskom procjenom i analizom geotehničkih istražnih bušotina (GB-1 do GB11) možemo pretpostaviti debljine trošne zone. Također, potrebno je uzeti u obzir i proteklo vrijeme od izvođenja određene etaže u kojoj promatramo pojedinu litološku jedinicu.

Debljina trošne zone u „tupini“ je do 4 metra i odlikuje se formiranjem sipara u podnožju etaža izgrađenog od manjih odlomaka školjkastog loma.

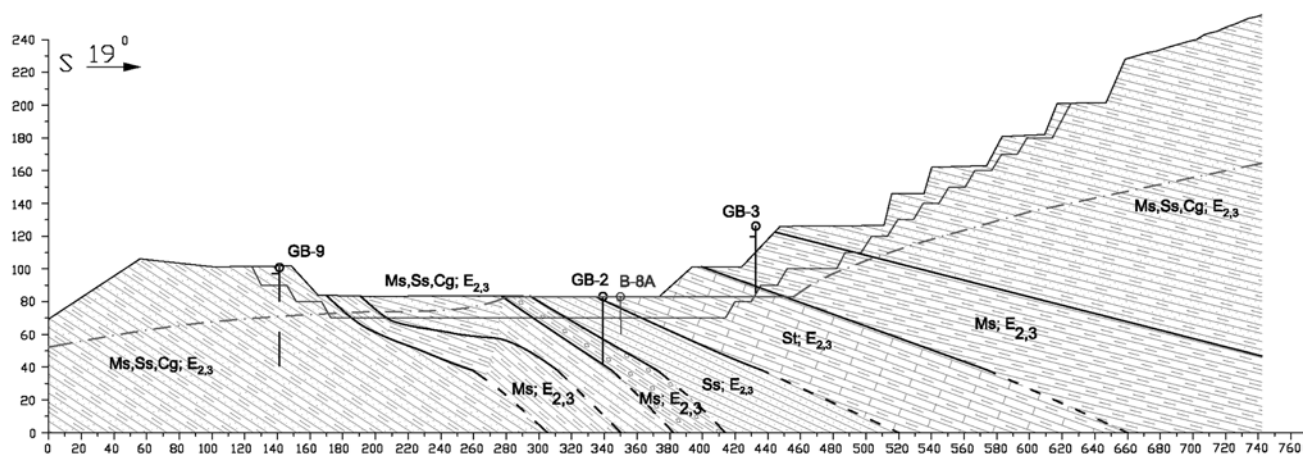
U izmjeni pješčenjaka i lapora debljina trošne zone je neznatna u novijim etažama, odnosno do 4,7 metara debljine u starijim etažama, pa sve do ~ 18 metara u području rasjeda. Trošnost se očituje na terenu u promjeni boje pješčenjaka iz sive u sivo smeđu.

Dubine zona trošenja u kalkarenitima i kalsiltitima su neznatne, a u laporima s numulitima ovise o tektonskoj deformiranosti i količini CaCO_3 („Sv. Kajo“ ~ 6 metara).

U debritnoj seriji zbog izrazite heterogenosti i kaotičnosti teško je utvrditi dubinu trošne zone. Uočena je redukcija fizičko-mehaničkih svojstva intaktnih uzoraka (jednoosne tlačne čvrstoće) litoloških članova zastupljenih u debritu u odnosu na iste litotipove u ostalom dijelu flišnog kompleksa što se može povezati s većim stupnjem trošenja u takvim naslagama.

Hidrogeološka istraživanja u kamenolomu

U sklopu sveobuhvatnih geoloških istraživačkih radova napravljena su i opsežna hidrogeološka istraživanja u kamenolomima (TERZIĆ & LUKAČ REBERSKI, 2009). Klastične naslage eocenskog fliša najvećim dijelom nisu podložne okršavanju (osim pojedinih litočlanova, lokalno), no mogu se smatrati dijelom krškog dinaridskog pojasa. Dinaridski krš je poznat po dubokoj tektonici, preferiranim podzemnim tokovima i visokoj regionalnoj vodopropusnosti, a u regionalnom mjerilu izučavanja fliške naslage smatraju se barijerama za tečenje krških podzemnih voda. Ovisno o debljini fliškog kompleksa, njegovu položaju u strukturi, morfologiji i samoj nadmorskoj visini fliš predstavlja ili potpunu barijeru krškim vodama, ili tzv. „viseću“ barijeru, ispod koje podzemne vode i dalje struje. Zbog toga se uz kontakt fliških i karbonatnih naslaga često pojavljuju izvori. Fliške naslage razmatranog terena u regionalnom mjerilu predstavljaju potpunu barijeru za tečenje krških podzemnih voda. Tako se u širem području istraživanja nalaze i neki od najznačajnijih kontaktnih izvora dinaridskog krša, kao npr. izvor rijeke Jadro koji se već više od 2000 godina koristi za vodoopskrbu Splita i okolice. Ipak, u lokalnom mjerilu pojedini litočlanovi fliša mogu biti vodonosni. Kako se strukture u ovome dijelu terena protežu tzv. dinaridskim smjerom pružanja (SZ-JI), a slojevi su generalno nagnuti prema SI, unutar propusnih članova dolazi do nakupljanja podzemne vode (Sl. 3).



Slika 3. Geološki profil poprečno na kamenolom Sv. Juraj i flišku strukturu. GB-3 – geotehnička bušotina; B-8A – HG bušotina. Geological profile perpendicular to the St. Juraj quarry and perpendicular to flysch structure. GB-3 – geotechnical borehole; B-8A – hydrogeological borehole.

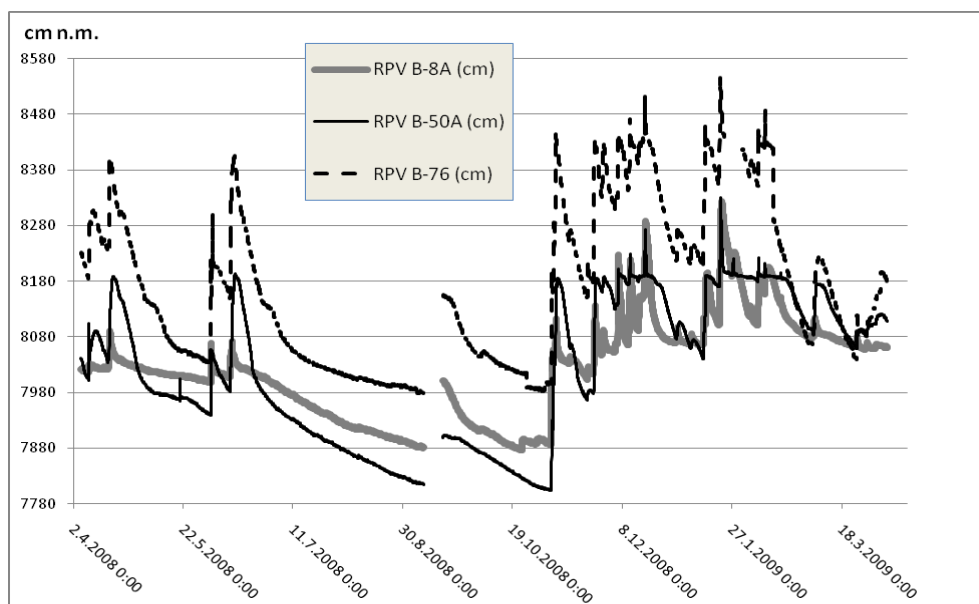
Tečenje podzemnih voda u slijedu klastičnih naslaga kakav je fliš najvećim se dijelom događa paralelno slojevima, dok je strujanje poprečno na slojeve znatno nižeg intenziteta i pojavljuje se samo u zonama izrazite tektonske razlomljenosti (pukotinske i/ili rasjedne zone). Litološke članove istraživane fliške formacije moguće je prema vodopropusnosti podijeliti u tri glavne skupine:

- Propusna stijenska masa – relativno propusni članovi unutar fliškog kompleksa. U ovu skupinu uvršteni su kalkareniti i tamno sivi lapor s numulitima;
- Djelomično propusna stijenska masa – tu se ubrajaju vrlo heterogena debritna serija i glinoviti vapnenac (kalksilit);
- Slabo propusna stijenska masa – stijene od vrlo slabe propusnosti do gotovo nepropusne stijenske mase. Tu se ubrajaju kalcitični lapori (tupina) i izmjene lapora i pješčenjaka.

Kako su propusni litočlanovi (kalkareniti i tamno sivi lapor s numulitima) prostorno povezani i kontinuirano se pružaju uzduž oba dva kamenoloma, moguće je zaključiti kako se radi o jedinstvenom fliškom vodonosniku. Glinoviti vapnenac i debritna serija (djelomično propusni članovi) također su prostorno povezani s vodonosnim slojevima, ali su ipak znatno niže hidrauličke vodljivosti. Opažanja razina podzemnih voda su obavljana kontinuirano automatskim mjeracima u trima hidrogeološkim bušotinama. Sve tri bušotine smještene su u „vodonosnom“ horizontu: B-8A prolazi kroz glinoviti vapnenac (kalksilit), kalkarenit i tamno sivi lapor s numulitima. B-50A i B-76 kroz glinoviti vapnenac (kalksilit) i kalkarenit.

Prilikom pokusnog crpljenja bušotine B-8A zabilježen je određeni utjecaj na više stotina metara bočno (zapadno) udaljenu bušotinu B-3, dok obližnje bušotine na južnoj strani platoa Sv. Juraj – hidraulički odvojene od glavnog vodonosnika vrlo slabo propusnim laporovitim naslagama (tupina i izmjena lapora i pješčenjaka) – praktično nisu reagirale na crpljenje. U njima su razine podzemne vode niže djelomično zato što je taj dio stijenske mase pod utjecajem drenažnog tunela, a djelomično zbog same morfologije padine. Razine podzemne vode u „vodonosnom“ paketu slojeva približno se kreću od 78 do 84 m n.m., ovisno o hidrološkim prilikama (Sl. 4). Na južnoj strani platoa Sv. Juraj, u slabo propusnoj stijenskoj masi zabilježene su znatno niže razine podzemne vode, približno od 65 do 72 m n.m., što je u ovome dijelu terena posljedica utjecaja drenažnog tunela. Ovakav podatak upućuje na lokalno moguću prisutnost podzemne vode i u slabije propusnim litološkim članovima. Ona se procjeđuje iz bolje propusnih slojeva. Na samome platou Sv. Juraj najvećim dijelom godine postoji „ujezerena“ površinska voda. Praktično, riječ je o svojevrsnom „izdanku“ podzemne vode, jer se prema podacima opažanja u B-8A razina vode nalazi približno na istoj koti. U sušnim mjesecima razina vode se spusti i lokva presuši, no i tada je vidljivo kako je podzemna voda vrlo blizu površini terena jer je tlo vlažno i obraslo.

Opisana hidrogeološka situacija može se bočno proširiti cijelom dužinom eksploatacijskog polja, po vodonosnim litološkim članovima. Određena odstupanja su ovisna o lokalnim prilikama vezanim uz razlomljenost stijenske mase, debljinu vodonosnih paketa i utjecaj odvodnjavanja vezan uz morfološka udubljenja ili poprečno/dijagonalne rasjede. Sjeverno od vodonosnog paketa nije bilo zabilježenih pojava podzemne vode tijekom istraživačkih bušenja za bilo koju namjenu. Neposredna sjeverna granica vodonosnika je sloj tupine koji je vodonepropustan, a dalje sjeverno od njega se nastavljaju slabo propusne izmjene lapora i pješčenjaka. Analogijom sa situacijom na području platoa Sv. Juraj, i u slabo propusnim stijenama moguća je prisutnost podzemne vode, a kako je stijenska masa niske hidrauličke vodljivosti, vodno lice je nagnuto tako da prati morfologiju padine. Ukoliko ta podzemna voda i postoji, riječ je o relativno malim količinama. Međutim, ni u kojem slučaju ne smije se zanemariti procjeđivanje kroz ove vrlo slabo propusne slojeve prema „vodonosnim“ slojevima i u izračunima stabilnosti prisutnost ove podzemne vode mora se uzeti u obzir.



Slika 4. Kolebanje razine podzemne vode u trima hidrogeološkim bušotinama tijekom jedne godine. Fluctuation of groundwater levels in the three hydrogeological boreholes during one year.

Pokusno crpljenje načinjeno u rujnu 2008. u vrijeme pravih hidroloških minimuma i nakon dugotrajne suše ukazalo je na postojanje zaliha podzemne vode, te su sniženja prilikom crpljenja s nešto više od 2 L/s bila relativno niska. Pri crpljenju s maksimalnim količinama (nešto iznad 2 L/s) na dvije istraživane bušotine (B-8A i B-76) po bušotini je iscrpljeno više od 1000 m³ podzemne vode u samo tri dana crpljenja. Na temelju obrade crpljenja u koracima (tzv. step-drawdown test) prikazano je kako su na bušotini B-8A moguće čak crpne količine više od 10 L/s. Na bušotini B-76 crpne količine ipak treba ograničiti ispod 5 L/s jer su prisutne znatne turbulencije u podzemlju i strujanje je slično onome u krškim vapnenačkim terenima. Pokusna crpljenja konstantnom količinom su obrađena orijentacijskim izračunom hidrauličkih parametara Thiemovom metodom, koja je zbog svoje jednostavnosti pogodna za heterogene, pa čak i krške uvjete strujanja; ali joj rezultate treba shvatiti samo kao približne, orijentacijske vrijednosti – unutar „reda veličine“. Tako je izračunata hidraulička vodljivost (K). Vidljivo je da je stijenska masa oko bušotine B-8A najpropusnija (prvo crpljenje $K=2 \cdot 10^{-4}$ m/s, drugo $K=5,5 \cdot 10^{-5}$ m/s). Ovdje su rezultati upitni jer prvi put gotovo da nije postignuto sniženje, a drugi put je sniženje vrlo polako napredovalo tijekom višednevnog crpljenja, no nije došlo do potpunog ustaljenja razine. To upućuje na mogućnost određenog „rudarenja“ podzemne vode, tj. odvodnjavanja zaliha. Druga crpljena bušotina jest B-50A. Ovdje je hidraulička vodljivost najniža i u oba crpljenja bila je unutar reda veličine 10^{-7} m/s. Relativno najkvalitetniji rezultati postignuti su na bušotini B-76, gdje je u oba dva navrata za sve tri crpne količine izračunata hidraulička vodljivost unutar reda veličine 10^{-5} m/s. Ipak, s povišenjem crpne količine i odvodnjavanjem površinskih slojeva vodonosnika, hidraulička vodljivost se snižavala, što znači da su slojevi bliži površini terena nešto propusniji. Ta činjenica upućuje na ograničene zalihe podzemnih voda. Tijekom drugog crpljenja (pri crpljenju bušotine B-76) došlo je do obilnih padalina, koje su podigle razinu podzemne vode znatno iznad početne. Usprkos neprekidnom višednevnom crpljenju s više od 2 L/s. Vodonosnik se, dakle, vrlo brzo i obnavlja. Utjecaj konstantnog crpljenja s više od 2 L/s bio je u potpunosti poništen dotocima izazvanim obilnim kišama, koje se vrlo brzo prirodnim jarugama i kanalima slijevaju do platoa i infiltriraju u vodonosne horizonte.

Površinski slijev eksploatacijskog polja iznosi nešto više od 4,5 km². Zbog toga što je riječ o vrlo strmom terenu i slabo propusnim fliškim naslagama, oborinske vode se vrlo brzo površinski dreniraju i u vrlo visokom postotku naglo dotječu u područje eksploatacijskog polja, a kako se na samim platoima nalaze relativno propusne naslage, brzo se i infiltriraju u podzemlje. Voda se iz polja drenira dijelom prirodnim putem, a dijelom tunelom plato Sv. Juraj – naselje Smoljevci, odakle se bujičnim tokom usmjerava do mora u području Kaštel Sućurca. Kako nisu zabilježeni značajniji fliški izvori niz padinu južno od kamenoloma, a niti istočno po pružanju propusnih fliških litočlanova, većina podzemnih voda vjerojatno se drenira u taj i ostale bujične tokove.

Reference

- DAVIS, J.C. (1986): Statistics and Data Analysis in Geology. Second Edition. John Wiley & Sons, Toronto. 646 p.
- KOCH, G.S. JR. & LINK, R.F. (1980): Statistical Analysis of Geological Data. Vol. 1, Dover Publications, Inc., New York, NY, 296 p.
- LUKŠIĆ, B., PENCINGER, V., OŽANIĆ, M., CRNOGAJ, S., DEDIĆ, Ž. & JURIĆ, A., (2008): Elaborat o rezervama mineralnih sirovina za proizvodnju cementa na eksploatacijskom polju „Sv. Juraj-Sv. Kajo“ – Obnova. Fond HGI 73/08-1.
- MARINOS, P. & HOEK, E. (2000): Estimating the mechanical properties of heterogeneous rock masses such as flysh. Bulletin of the Engineering Geology & the Environment (IAEG), 60, 85-92.
- MARINOS, P. & HOEK, E. (2000): GSI—a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne, Invited Papers vol. 1, Technomic Publishing Co. Inc., Pennsylvania, pp. 1422–1440.
- MARJANAC, T. (1987): Sedimentacija Kernerove „srednje fliške zone“(paleogen okolice Splita) Geol. vjesnik Vol. 40, str. 177-194. Zagreb.
- MATIJACA, M. & VUJEC, S. (1990): Statistička interpretacija sirovina za cementnu industriju u Splitu. Rud. geol. naftni zbor. br.2, 75-81, Zagreb.
- MIŠČEVIĆ P. i dr., (1999): Korelacija između PLT-a i jednoosne čvrstoće za lapore, Zbornik radova simpozija "MEHANIKA STIJENA I TUNELI" u Zagrebu. Rudarsko-geološki zbornik br. 3, studeni 1999. Str. 69 do 72.
- NAVRATIL, D. & HRŽENJAK, P. (2009): Elaborat o geomehaničkim uvjetima eksploatacije na području eksploatacijskog polja „Sv. Juraj – Sv. Kajo“. Hrvatski geološki institut, Zagreb.
- SONMEZ, H. & ULUSAY, R. (1999): Modification to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 36, pp. 743-760.
- TERZIĆ, J. & LUKAČ REBERSKI, J. (2009): Hidrogeološka istraživanja na području eksploatacijskog polja „Sv. Juraj – Sv. Kajo“. Fond HGI 24/09.