

Izrađivači:

Sveučilište u Zagrebu **Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Sveučilište u Zagrebu **Metalurški fakultet**

## Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija



Zagreb, ožujak, 2026



**Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za  
proizvodnju magnezija**



**Opći podaci:**

**Naručitelj:** BH Magnezij & Minerali d.o.o., Kružni tok BB, 80320 KUPRES, Bosnia and Herzegovina

**Predmet:** **Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija**

**Izvođač:** **Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet**, Pierottijeva 6, Zagreb,  
Hrvatska

**Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet**, Aleja narodnih heroja 3, 44000, Sisak,  
Hrvatska

**Voditelj izrade**

**stručne analize: doc.dr.sc. Ivica Pavičić**



Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija



Suradnici:

**Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Izv.prof. dr.sc. Vječislav Bohanek

Prof. dr.sc. Sibila Borojević Šoštarić

Prof.dr.sc. Ivo Galić

Prof. dr.sc. Željko Duić

Prof. dr.sc. Jasna Orešković,

Ida Pavlin, mag.ing.geol.

Saša Kolar

**Metalurški fakultet**

Prof. dr.sc. Ivan Brnardić

Izv.prof.dr.sc. Jakov Baleta

Dekan:

Prof. dr.sc. tech. Vladislav Brkić

Dekan:

Izv. prof. dr.sc.tech. Ivana Ivanić



Sveučilište u Zagrebu  
RUDARSKO-  
GEOLOŠKO-  
NAFTNI FAKULTET

*[Handwritten signature]*



*[Handwritten signature]*

U Zagrebu, 03.04.2026

KLASA: 303-03/25-01/36

URBROJ: 251-70-13-26-4



Zagreb, ožujak, 2026

REPUBLIKA HRVATSKA  
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET U SISKU

Prilmeno: 3.4.2026.	
Naslov/kodijeka označa: 642-01/20-04/14	
Uredbeni broj: 2176-78-2601/-1	
Pril.	Vrij.

## Sadržaj:

1.	Uvod.....	1
1.1.	Osnovno o stručnoj analizi projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija.....	1
1.2.	Zadatak stručne analize.....	2
2.	Općenito o pridobivanju magnezija .....	4
2.1.	Primarne mineralne sirovine za dobivanje magnezija .....	4
2.1.1.	Evaporitna ležišta (K–Mg soli i Mg-kloridi). .....	4
2.1.2.	Karbonatna ležišta (dolomit i magnezit) – ključne rude magnezija.....	4
2.1.3.	Ultramafitne stijene i Mg-silikati (olivin, serpentin, talk) – velik potencijal, veći tehnološki izazovi .....	5
2.1.4.	Prirodne slane otopine (morska voda i slana jezera) – “tekući” primarni izvor.....	5
2.2.	Sekundarni izvori magnezija.....	6
2.2.1.	Čvrsti sekundarni izvori .....	6
2.2.2.	Tekući sekundarni izvori (industrijske i procesne slanice) .....	6
2.3.	Industrijska primjena magnezija .....	7
2.4.	Globalna i europska proizvodnja magnezija.....	8
2.5.	Tehnologije proizvodnje magnezija.....	9
2.5.1.	Elektroliza taline .....	9
2.5.2.	Toplinska redukcija magnezijevog oksida (termički procesi).....	10
2.5.3.	Prednosti i nedostaci (tehničko-ekonomska i okolišna usporedba) .....	12
2.6.	Ekonomski razlozi i tržišni čimbenici .....	15
2.7.	Geopolitički čimbenici i koncentracija tržišta .....	16
2.8.	Mineralne, kemijske i petrografske značajke dolomita kamenoloma Grguljača .....	18
3.	ANALIZA UPRAVNIH POSTUPAKA I TEHNIČKE DOKUMENTACIJE ZA E.P. GRGULJAČA.....	21
4.	TEHNOLOŠKE ZNAČAJKE POGONA ZA PROIZVODNJU MAGNEZIJA .....	26
4.1.	Opis potencijalne tvornice za proizvodnju magnezija Kupres.....	26
4.1.1.	Kalcinacija .....	26
4.1.2.	Odvajanje kalcija od magnezija .....	27
4.1.3.	Aluminotermički proces .....	28
4.1.4.	Rafinacije/pročišćavanja magnezija.....	28
4.2.	Potrebe za vodom .....	29

5. ENERGETSKE KARAKTERISTIKE PLANIRANOG POSTROJENJA ZA PROIZVODNJU MAGNEZIJA KUPRES .....	33
5.1. Tehnološki opis i maseno-energetske osnove.....	33
5.1.1. Shema procesa i ključne faze .....	33
5.1.2. Materijalna bilanca po 1 t i po 1 kg Mg .....	34
5.1.3. Energetska bilanca po 1 t i po 1 kg Mg .....	34
5.2. Izračun potrošnje energije i emisija po 1 kg Mg.....	34
5.2.1. Metodologija .....	34
5.2.1. Energetski izračun (po kg) .....	35
5.2.2. Emisijski izračun – ilustrativni scenariji.....	35
5.3. Koprodukti, kvaliteta i tržišna valorizacija .....	36
5.4. Usporedba s Pidgeon i elektrolitičkim postupkom .....	36
5.5. Infrastrukturne potrebe: voda, električna energija, plin i PV potencijal.....	37
5.5.1. Električna energija: godišnja potrošnja i priključna snaga.....	37
5.5.2. Plin (kalcinacija).....	38
5.5.3. Potencijal krovne fotonaponske proizvodnje .....	38
5.6. Provjera koherencije ulaza/izlaza i glavne „točke pažnje“ .....	38
5.7. Kvaliteta proizvoda i operativna zrelost .....	39
5.8. Sigurnost, okoliš i usklađenost s BAT načelima.....	39
5.9. Sažetak računskih rezultata (per kg i per godina).....	40
6. GEOGRAFSKE ZNAČAJKE KUPRESA .....	41
7. GEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA KUPRESA .....	42
7.1. Geološke značajke područja Kupresa .....	42
Permotrijaske naslage - PT.....	42
Donjotrijaske klastične naslage – T <sub>1</sub> .....	43
Srednje trijaski vapnenci i dolomiti – T <sub>2</sub> .....	43
Dijabazi, doleriti i gabri - vββ.....	43
Efuzivne stijene (η) .....	44
Piroklastične stijene (θ).....	44
Srednje i gornjotrijaski dolomiti i vapnenci T <sub>2,3</sub> .....	44
Vapnenci i dolomiti donje i srednje jure (J <sub>1,2</sub> ).....	45
Gornjojurski vapnenci (J <sub>3</sub> ) .....	46
Kredni vapnenci (K) .....	46
Oligomiocenski konglomerati s kalkarenitima (Ol,M).....	46

Miocen (M) .....	47
Kvartar (Q) .....	47
Glacijalni sedimenti (gl).....	47
7.2. Taložne i dijagenetske značajke Kupreških trijaskih dolomita .....	49
8. HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE KRŠKOG PODZEMLJA .....	53
8.1. Hidrogeološke značajke područja Kupresa .....	61
8.2. Taložna poroznost i utjecaj dijageneze na poroznost i hidrogeološku ulogu karbonatnih stijena 65	
8.3. Zone sanitarne zaštite izvora Bašinac.....	70
8.4. Primjeri zimskog/planinskog turizma i rudarskih/industrijskih aktivnosti.....	74
9. MOGUĆI UTJECAJI NA OKOLIŠ TE OKOLIŠNI MONITORINZI I ISTRAŽIVANJA KOJIMA SE KONTROLIRA UTJECAJ NA OKOLINU .....	79
10. ZAKLJUČAK .....	86
Literatura .....	92

Popis slika:

Slika 1. Grafički prikaz odnosa u svjetskoj proizvodnji i potražnjimagnezija (CM GROUP, 2025). .8	8
Slika 2. Dolomitna kristalna rešetka A) idealna struktura stehiometrijskog dolomita; B) Shematski prikaz realne kristalne rešetke dolomita. Molekule vode se preferencijalno vežu na površinske katione rastućeg kristala. Zato što Ca ioni nisu hidratizirani poput Mg iona, teže ugradnji u sloj Mg iona stvarajući tipičnu strukturu kalcijevskog dolomita. Bezvodni CO <sub>3</sub> ioni moraju imati dovoljnu količinu energije kako bi zamijenili molekule vode vezane na kationski sloj (LIPPMAN, 1973; GALLUCIO, 2009). .....	50
Slika 3. A) Dijagenetski sklop u dolomitima (AHR, 2008). Dolomit potpuno zamjenjuje kalcit u kristalnoj rešetci te nastaje karakteristični dijagenetski sklop potpuno nevezan za inicijalne uvjete i mehanizme taloženja. Vidljiva je dobro razvijena interkristalna poroznost dolomita. B) fotografija rekristaliziranog gornjotrijaskog dolomita pod lupom (povećanje 8x) (PAVIČIĆ, 2018). .....	51
Slika 4. Raspodjela dijagenetskih okoliša i dijagenetskih procesa u Zemljinoj kori (prema MOORE, 1989; AHR, 2008). .....	51
Slika 5. Shematski prikaz raspodjele poroznosti karbonatnih stijena u različitim mjerilima (SCESI & GATTINONI, 2009). .....	54
Slika 6. Gravitacijski uvjetovani tok podzemne vode u teoretskom drenažnom bazenu s složenom topografijom. Prikazana su područja regionalnog, prijelaznog i lokalnog toka podzemne vode (prema TOTH, 1963). .....	55
Slika 7. 2D konceptualizacija toka podzemne vode u gorskim i planinskim područjima (WELCH, 2012 & TOTH, 1963, 2009). .....	56
Slika 8. Karst drainage system (HARTMANN et al., 2014; modificirano prema KUNIANSKY et al, 2022) .....	58
Slika 9. Konceptualni prikazi procesa transporta otopljenih tvari u krškim vodnim resursima na različitim prostornim skalama: (a) 3D blok-dijagram na skali krškog vodonosnika, (b) skala vodonosnika, (c) skala bušotine, (d) skala pojedinačne pukotine, (e) skala pora (opisana na razini reprezentativnog elementarnog volumena, REV, poznatog i kao Darcyjeva skala). U ovom je prikazu atenuacija otopljenih tvari opisana kemijskom transformacijom na koju utječu fizikalni, kemijski i (biogeo)kemijski procesi. Slika opisuje isključivo antropogeno onečišćenje, prikazujući difuzne (arealne) i točkaste izvore, budući da su oba tipa relevantna za probleme onečišćenja u krškim sustavima.. (modificirano prema ÇALLI et al., 2025.) .....	59
Slika 10. Regionalna hidrogeološka karta šireg područja Kupresa prema Nacrtu plana upravljiva vodama na vodnom području Jadranskog mora u Federaciji BiH (2022-2027). .....	62
Slika 11. Tipovi pukotinskog sklopa srednje i gornjotrijaskih dolomita. A) SB sklop - slojne plohe presijecaju sve diskontinuitete. B) NSB sklop - pukotine p <sub>1</sub> presijecaju sve druge diskontinuitete (PAVIČIĆ, 2018) .....	69
Slika 12. Primjeri kohabitacije turizma i rudarske/industrijske aktivnosti (ilustracija). .....	78

Popis tablica:

Tablica 1. Usporedba emisija u zrak iz različitih procesa proizvodnje magnezija (EHRENBERGER et al., 2020, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2008, YAOUWU et al., 2016, ZULIANI et al., 2024; XU et al., 2023, LI et al. 2024; WU et al., 2012, BROWN et al., 2011) .....	13
Tablica 2. Usporedba emisija u vodu i krutog otpada koji nastaju iz različitih procesa proizvodnje magnezija (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2008, XU et al., 2023; LI et al., 2023) .....	14
Tablica 3. Mineralni sastav i petrografske značajke dolomita sa lokaliteta Grguljača. ....	19
Tablica 4. Kemijski sastav dolomita sa lokaliteta Grguljača. ....	20
Tablica 5. Sažetak potreba za vodom planirane tvornice magnezija .....	30
Tablica 6. Procijenjene količine vode iz oborina (kišnice).....	31
Tablica 7. Procjena potrebne izdašnosti zdenca/izvora za potrebe postrojenja za proizvodnju magnezija. ....	32

## Prošireni sažetak:

Stručna analiza razmatra planirani projekt proizvodnje magnezija tvrtke MFE aluminotermičkim procesom s predviđenom lokacijom postrojenja na Kupresu (BiH). Posebnu važnost u stručnoj analizi zauzimaju poglavlja okolišne prihvatljivosti tehnologije te osjetljivost krškog podzemlja Kupreške visoravni uključujući njezine geološke i hidrogeološke karakteristike. U fokusu je aluminotermički proces kao tehnološki naprednija alternativa do sada dominantnim tehnološkim procesima kao što su elektroliza i Pidgeon proces, ali uz jasnu poruku da se svaka industrijska aktivnost u ovakvom kršu može opravdati samo uz stroge zaštitne mjere i dokazivanje hidrogeološke sigurnosti.

Ako analiziramo do sada najčešće korištene procese proizvodnje u svijetu, u industriji se magnezij uglavnom dobiva elektrolizom taline  $MgCl_2$  ili termičkim redukcijama iz  $MgO$ . Pidgeon proces (silikotermijski proces) je raširen zbog jednostavnije opreme i nižeg CAPEX-a, ali radi na vrlo visokim temperaturama ( $\sim 1200\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$ ), generira relativno velik  $CO_2$  otisak (kalcinacija + gorivo) te ostavlja znatne količine troske i ostataka reducensa. Elektroliza može biti povoljnija uz niskougličnu struju, no zahtijeva složenu pripremu bezvodnog  $MgCl_2$  i stvara klor ( $Cl_2$ ) kao nusproizvod koji traži strogo kontrolirano hvatanje/iskorištavanje, uz specifične rizike kloridnih tokova. U usporedbi s tim, **aluminotermički proces** se u stručnoj analizi ističe nižom temperaturom redukcije (u projektu  $\sim 1000\text{--}1050\text{ }^\circ\text{C}$  pod vakuumom), većom mogućnošću elektrifikacije i “suhom” redukcijskom fazom (zanemarive emisije u vodu). Procjene životnog ciklusa navedene u dokumentu upućuju da se, uz valorizaciju koprodukata i/ili korištenje sekundarnog aluminija, emisije pripisane magneziju mogu spustiti na oko  $2,5\text{ kg } CO_2\text{-eq/kg Mg}$  (alokacijom) pa i oko  $1\text{ kg } CO_2\text{-eq/kg Mg}$  (sekundarni Al), što je  $\geq 90\%$  niže od tipičnih Pidgeon vrijednosti, uz preduvjet niskouglične opskrbe električnom energijom.

Planirano postrojenje na Kupresu, aluminotermički koncept prikazuje kroz četiri povezane faze s minimalnim otpadom i tri ključna tržišna nusproizvoda. (1) Kalcinacija dolomita ( $1150\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$ ) daje  $CaO$  i  $MgO$ , a  $CO_2$  se sustavno “hvata” i pretvara u suhi led (oko 48 tisuća tona godišnje) umjesto ispuštanja; prašina se uklanja vrećastim filtrima i vraća u proces. (2) Odvajanje  $Ca$  od  $Mg$  provodi se u vodenoj fazi uz korištenje uhvaćenog  $CO_2$ , pri čemu se taloži vrlo čisti precipitirani kalcijev karbonat (PCC, reda 100–120 tisuća tona godišnje) kao vrijedan proizvod, dok se  $Mg$ -dio kroz daljnju obradu vraća u  $MgO$ . Voda se recirkulira u zatvorenoj petlji, a gubici su uglavnom isparavanje/sušenja; predviđa se spremnik oborinske vode i alternativni izvor odvojen od javne vodoopskrbe. (3) Aluminotermička redukcija:  $MgO$  se miješa s aluminijem, peletira i reducira u

vakuumskoj peći; dobiva se krunski Mg (94–96 %), a na dnu nastaje Mg–Al spinel (oko 35 tisuća t/god) kao treći važan nusproizvod za vatrostatne materijale. Stručna analiza naglašava da se dio aluminija može osigurati kao sekundarni (otpadni) iz drugih industrija, čime se dodatno smanjuje ugljični otisak. (4) Rafinacija podiže čistoću na  $\approx 99,9$  %: koristi se fluks (NaCl/KCl) i zaštitna atmosfera ( $N_2$  s malim udjelom  $SO_2$ ).  $SO_2$  se uklanja skruberom visoke učinkovitosti ( $\approx 99,7\%$ ). Jedini preostali kruti ostatak je troska fluksa (oko 1–1,5 tisuća t/god), za koju je predviđena predaja na daljnu uporabu (izdvajanje soli i korištenje preostalog oksidnog dijela) pa se ukupno opterećenje otpadom svodi na minimum. Ovakav sustav, u kojem se otpad maksimalno pretvara u nusproizvode, efikasno koristi otpad i tako minimizira rizik u kontekstu upravljanja otpadom ili njegova utjecaja na okoliš. Na industrijskom razini, ova tehnologija nosi oznaku TRL 8-9, što znači da već ima industrijsku primjenu i dodatno je provjeravana kroz reviziju i pilot test.

Hidrogeološki kontekst Kupresa u stručnoj analizi je opisan kao posebno složen i osjetljiv. Područje je dio Dinarskog krša i nalazi se u razvodnoj zoni između jadranskog i crnomorskog sliva, pri čemu površinska razvodnica često ne odražava stvarne podzemne smjerove otjecanja; smjerovi mogu biti višesmjerni i dinamični ovisno o hidrološkom stanju. Prema dostupnim podacima ne postoje naznake da bi postrojenje imalo širi utjecaj na slivove; eventualni utjecaji, ukoliko bi se pojavili, očekuju se u relativno uskoj lokalnoj zoni oko lokacije. Definirane zone sanitarne zaštite pojedinih izvorišta dodatno podupiru zaključak o prostorno ograničenim područjima ranjivosti. Razinu i prostorni doseg utjecaja na podzemne vode potrebno je utvrditi lokacijski specifičnim hidrogeološkim istraživanjima i praćenjem stanja, što je standardna praksa za sve zahvate ovog tipa. Vodonosnici su razvijeni u mezozojskim dolomitima i vapnencima (pukotinsko-kavernozna poroznost), s visokim hidrauličkim vodljivostima, velikim oscilacijama razina podzemne vode i izrazito neravnomjernim izdašnostima izvora (visok  $Q_{max}/Q_{min}$ ). Zbog tankog pokrova tla, ponora/vrtača i rasjednih zona, prirodna filtracija je ograničena, a tok podzemne vode u kršu može biti vrlo brz. Posebno se obrađuje izvorište Bašinac u neposrednoj blizini planirane lokacije: trasiranja ukazuju na dotoke reda stotina metara na dan, što znači da se izvor napaja lokalnim tokom podzemne vode te ima značajne oscilacije u izdašnosti.

Mjere zaštite okoliša u stručnoj analizi postavljene su kao kombinacija prostornog upravljanja, tehničkih rješenja i stalnog monitoringa. Ključna preventivna mjera je usklađenje projekta sa prostorno-planskom dokumentacijom te zonama sanitarne zaštite. Prije gradnje (na bilo kojoj lokaciji) preporučuju se ciljana hidrogeološka istraživanja (geofizika za rasjedne zone, trasiranja ponor–izvor, hidrokemijska/izotopna ispitivanja i 3D geološki i hidrogeološki model podzemlja)



## Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija



kako bi se pouzdano utvrdile hidrauličke veze i scenariji širenja mogućeg onečišćenja. U radu postrojenja predlaže se kontinuirani monitoring izvora i podzemnih voda (logeri + periodične analize), monitoring prašine i buke, te sustavi pročišćavanja/recirkulacije voda uz odvajanje tehnoloških i sanitarnih tokova. U kombinaciji s BAT mjerama u samom procesu (filtri, hvatanje CO<sub>2</sub>, skruberi, oporaba nusproizvoda), stručna analiza aluminotermičke proizvodnje magnezija na Kupresu prikazuje se kao koncept je tehnološki naprednija alternativa dosada dominantnim tehnološkim procesima koju je moguće voditi s minimalnim otpadom i bez mjerljivog negativnog utjecaja ali uz strogo provedene zaštitne režime i dokazivu kontrolu utjecaja na krško podzemlje. Prema projektnoj dokumentaciji, proces je planiran u četiri faze, što omogućava uspostavljanje zaštitnih mjera i kontrolu u svakoj od faza proizvodnje.

## Extended abstract:

The expert analysis examines a planned magnesium production project by the company MFE using an aluminothermic process, with the proposed plant location in the Kupres Municipality (Bosnia and Herzegovina). Chapters also address the environmental impacts of the technology and the sensitivity of the karst underground of the Kupres Plateau, including its geological and hydrogeological characteristics, which are of particular importance. The focus of the expert analysis is on the aluminothermic process as a technologically more advanced alternative to the currently dominant processes, such as electrolysis and the Pidgeon process, while clearly emphasizing that any industrial activity in such karst terrain can be justified by strict protective measures, environmental monitoring, and demonstration of hydrogeological safety.

If we analyse most common technological processes of production in the world, magnesium is mainly produced by either electrolysis of molten  $MgCl_2$  or thermal reduction from  $MgO$ . The Pidgeon process (silicothermic reduction) is widespread due to simpler equipment and lower CAPEX, but it operates at very high temperatures ( $\sim 1200\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$ ), generates a relatively large  $CO_2$  footprint (calcination + fuel), and leaves significant quantities of slag and residual reductant. Electrolysis can be more favourable when powered by low-carbon electricity, but it requires complex preparation of anhydrous  $MgCl_2$  and produces chlorine ( $Cl_2$ ) as a byproduct, which demands strictly controlled capture/utilisation and carries specific risks associated with chloride streams. In comparison, the aluminothermic process is highlighted in the study for its lower reduction temperature (in the project  $\sim 1000\text{--}1050\text{ }^\circ\text{C}$  under vacuum), greater potential for electrification, and a “dry” reduction phase (negligible emissions to water). Life-cycle assessments cited in the document indicate that, with valorization of co-products and/or the use of secondary aluminium, emissions attributed to magnesium can be reduced to about  $2.5\text{ kg } CO_2\text{-eq/kg Mg}$  (via allocation) and even around  $1\text{ kg } CO_2\text{-eq/kg Mg}$  (with secondary Al), which is  $\geq 90\%$  lower than typical Pidgeon values, provided that the electricity supply is low-carbon.

The planned plant at Kupres presents the **aluminothermic concept** through four interconnected phases with minimal waste and three key marketable by-products. (1) Dolomite calcination ( $1150\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$ ) yields  $CaO$  and  $MgO$ , and the  $CO_2$  is systematically “captured” and converted into dry ice (around 48 thousand tons per year) instead of being released; dust is removed by bag filters and returned to the process. (2) Separation of Ca from Mg is carried out in an aqueous phase using the captured  $CO_2$ , whereby very pure precipitated calcium carbonate (PCC, on the order of 100–120 thousand tons per year) is formed as a valuable product, while the Mg fraction

is returned to MgO through further processing. Water is recirculated in a closed loop, with losses mainly due to evaporation/drying; a rainwater storage tank and an alternative source separate from the public water supply are envisaged. (3) Aluminothermic reduction: MgO is mixed with aluminum, pelletized, and reduced in a vacuum furnace; crude Mg (94–96%) is obtained, and Mg–Al spinel (about 35 thousand t/year) forms at the bottom as a third important by-product for refractory materials. The study emphasises that part of the aluminium can be sourced as secondary (scrap) material from other industries, further reducing the carbon footprint. (4) Refining increases purity to approximately 99.9%: a flux (NaCl/KCl) and a protective atmosphere (N<sub>2</sub> with a small share of SO<sub>2</sub>) are used. SO<sub>2</sub> is removed by a high-efficiency scrubber (≈99.7%). This kind of system, which maximally transforms waste into products, efficiently uses waste and thus poses minimum risk to waste management or the environment. At the industrial level, this technology is at TRL 8-9, meaning it already has an industrial application and has been further verified through audits and pilot testing.

The hydrogeological context of the Kupres area is described in the study as particularly complex and sensitive. The area is part of the Dinaric karst and lies within a watershed divide zone between the Adriatic and the Black Sea basins; the surface watershed divide often does not reflect the actual directions of underground drainage, as flow directions can be multidirectional and dynamic depending on the hydrological state. According to the available data, there are no indications that the plant would have a broader impact on the catchments; any impacts, if they were to occur, are expected within a relatively narrow local zone around the site. The defined sanitary protection zones for individual springs further support the conclusion that vulnerable areas are spatially limited. The level and spatial extent of impacts on groundwater must be determined through site-specific hydrogeological investigations and monitoring, which is standard practice for all interventions of this type. Aquifers are developed in Mesozoic dolomites and limestones (fracture–cavernous porosity), with high hydraulic conductivities, large fluctuations in groundwater levels, and highly uneven spring yields (high Q<sub>max</sub>/Q<sub>min</sub>). Due to the thin soil cover, swallow holes/sinkholes, and fault zones, natural filtration is limited, and groundwater flow in karst can be very rapid. Particular attention is given to the Bašinac spring in the immediate vicinity of the planned site: tracer tests indicate inflows of hundreds of meters per day, indicating that the spring is fed by local groundwater flow and exhibits significant discharge fluctuations.



## Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija



The environmental protection measures in the study comprise spatial planning, technical solutions, and continuous monitoring. The key preventive measure is aligning the project with the host country's spatial planning documentation, laws and directives, and sanitary protection zones for eventual water supply springs in the vicinity of the location (this applies to any location). Before construction (at any location), targeted hydrogeological investigations are recommended (geophysics for fault zones, sinkhole-to-spring tracing, hydrochemical/isotopic testing, and a 3D geological and hydrogeological subsurface model) to reliably determine hydraulic connections and scenarios for the spread of potential contamination. During plant operation, continuous monitoring of springs and groundwater (data loggers + periodic analyses), monitoring of dust and noise, and water treatment/recirculation systems with separation of process and sanitary streams are proposed. Combined with BAT measures within the process itself (filters, CO<sub>2</sub> capture, scrubbers, recovery of by-products), the study presents aluminothermic magnesium production at Kupres as a concept that is technologically advanced alternative to more dominant processes, and can be operated with minimal waste and without measurable negative impacts on the environment, provided that strict protection regimes are implemented and demonstrable control of impacts on the karst underground is ensured. According to the provided project documentation, the process is planned in four phases, enabling the establishment of protective measures and controls in each production phase.

## 1. Uvod

### 1.1. Osnovno o stručnoj analizi projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija

Magnezij je jedan od ključnih metala suvremene industrije, prepoznat kao strateška sirovina zbog svoje široke primjene u automobilskoj, zrakoplovnoj, metalurškoj i elektroničkoj industriji. Europska komisija ga kontinuirano svrstava na popis kritičnih sirovina, ponajprije zbog izrazite ovisnosti o uvozu i koncentracije globalne proizvodnje u nekolicini zemalja. Trenutno više od 85 % svjetske proizvodnje magnezija dolazi iz Kine, što stvara značajne geopolitičke i tržišne rizike, potvrđene krizom opskrbe 2021. godine kada je Europa zbog ograničenja proizvodnje u Kini ostala bez zaliha magnezija, uz višestruki rast cijena i prijetnju za ključne industrijske sektore.

Unatoč značajnim prirodnim resursima, proizvodnja magnezija u Europi gotovo ne postoji, ponajprije zbog visokih troškova i ekoloških izazova tradicionalnih tehnologija. Stoga se sve veća pozornost usmjerava na razvoj održivih procesa koji smanjuju emisije stakleničkih plinova, optimiziraju potrošnju energije i omogućuju valorizaciju nusproizvoda. U tom kontekstu, planirani projekt postrojenja za proizvodnju magnezija na području Kupresa predstavlja važan iskorak prema diversifikaciji opskrbe i jačanju industrijske otpornosti Europske unije.

Cilj ove stručne analize je pružiti znanstveno utemeljenu i nepristranu procjenu potencijalnih utjecaja planiranog zahvata na okoliš, s posebnim naglaskom na osjetljivi krški sustav Kupreške visoravni. Analiziraju se geološke, hidrogeološke, tehnološke i energetske značajke projekta, kao i moguće rizike za podzemne vode, kvalitetu zraka i gospodarenje otpadom. Stručna analiza obuhvaća detaljan pregled prirodnih uvjeta, eksploatacijskih karakteristika postojećeg kamenoloma dolomita, tehničke dokumentacije planiranog postrojenja te predviđenih mjera zaštite okoliša i sustava monitoringa.

Ovakav multidisciplinarni pristup omogućuje cjelovitu procjenu zahvata i pruža stručnu podlogu za donošenje informiranih odluka nadležnih tijela, investitora i lokalne zajednice. Poseban naglasak stavljen je na održivost zahvata u kontekstu zaštite krških vodonosnika, racionalnog korištenja prirodnih resursa i primjene najboljih dostupnih tehnika (BAT) u industrijskoj praksi.

## 1.2. Zadatak stručne analize

Sveučilište u Zagrebu, putem Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta i Metalurškog fakulteta, dobilo je zadatak izraditi nepristranu i znanstveno utemeljenu stručnu analizu o potencijalnom utjecaju na okoliš planiranog projekta postrojenja za proizvodnju magnezija na području Kupresa (Bosna i Hercegovina) analizirajući tehnološke, metalurške i okolišne značajke predmetnog projekta. Stručna analiza je zamišljena kao neovisna stručna podloga koja treba omogućiti objektivnu procjenu mogućih okolišnih rizika i utjecaja planiranog zahvata, osobito u kontekstu osjetljivog krškog okoliša Kupreške visoravni.

Primarni cilj stručne analize bio je objediniti, sustavno analizirati i interpretirati sve raspoložive podatke vezane uz prirodne i tehničke značajke istraživanog područja, s posebnim naglaskom na krško podzemlje. Posebna pažnja posvećena je razumijevanju geološke građe, hidrogeoloških odnosa i dinamike podzemnih tokova u stijenama Kupreškog krša, budući da upravo ti čimbenici imaju presudnu ulogu u procjeni ranjivosti okoliša i mogućeg širenja onečišćenja.

U sklopu stručne analize detaljno su razmotreni svi dostupni podaci vezani uz postojeći kamenolom dolomita i eksploatacijsko polje Grguljača, uključujući geološke, hidrogeološke, rudarsko-tehničke i prostorne aspekte eksploatacije. Analiziran je odnos kamenoloma prema okolnom krškom sustavu, potencijalni utjecaj eksploatacijskih aktivnosti na režim podzemnih voda te njihova povezanost s planiranim postrojenjem za proizvodnju magnezija. Time se nastojalo sagledati kumulativne učinke postojećih i planiranih zahvata u prostoru.

Paralelno s analizom prirodnih uvjeta, provedena je i sveobuhvatna analiza projektne i tehničke dokumentacije postrojenja za proizvodnju magnezija. Posebno su razmotreni tehnološki procesi proizvodnje, ulazne sirovine, pomoćni materijali, energetske zahtjevi te potencijalni izvori emisija u zrak, vodu i tlo. Analiza je bila usmjerena na identifikaciju mogućih okolišnih opterećenja, osobito u pogledu utjecaja na vodne resurse, kvalitetu zraka te gospodarenje otpadnim vodama i nusproizvodima procesa.

Stručni tim koji je izradio stručnu analizu interdisciplinarnog je karaktera, sastavljen od znanstvenika i stručnjaka s dvaju fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, čime je osigurano pokrivanje svih relevantnih disciplina potrebnih za cjelovitu procjenu zahvata. Tim je obuhvaćao stručnjake iz područja geologije, hidrogeologije i geofizike, koji su se bavili istraživanjem geometrije podzemlja i tokova podzemnih voda, kao i stručnjake za karakterizaciju stijena krškog podzemlja i eksploatacijskih uvjeta kamenoloma. Nadalje, uključeni su stručnjaci iz područja rudarstva,

zakonske regulative i tehničke dokumentacije, koji su analizirali usklađenost zahvata s važećim propisima i prostorno-planskim okvirom. Značajan doprinos stručnoj analizi dali su i stručnjaci iz područja metalurgije i tehnologije prerade, koji su analizirali tehnološke aspekte proizvodnje magnezija, kao i stručnjaci za energetiku, koji su razmatrali energetske potrebe postrojenja i s njima povezane okolišne učinke.

Ovakav multidisciplinarni pristup omogućio je sagledavanje projekta iz više perspektiva te izradu uravnoteženog i nepristranog stručnog mišljenja. Važno je naglasiti da je predmetna Stručna analiza tematski i stručno jasno ograničena te da njezin zadatak nije obuhvaćao analizu bioloških aspekata okoliša, poput flore i faune. Fokus stručne analize bio je isključivo usmjeren na geološke, hidrogeološke, rudarsko-tehničke, energetske i metalurške aspekte projekta, odnosno na procjenu ponašanja krškog podzemlja, utjecaja potencijalnog zahvata na podzemne vode i stijenski masiv, tehničkih obilježja eksploatacije i proizvodnog procesa te s njima povezanih fizičko-kemijskih opterećenja okoliša. Ovakvo usmjerenje omogućilo je detaljnu i dubinsku obradu onih sastavnica okoliša koje su izravno povezane s planiranim zahvatom i stručnim kompetencijama uključenih institucija, dok biološki aspekti ostaju u nadležnosti zasebnih, specijaliziranih studija i postupaka procjene.

Zadatak stručne analize bio je pružiti znanstveno utemeljenu, integriranu i objektivnu procjenu potencijalnih utjecaja projekta postrojenja za proizvodnju magnezija na okoliš područja Kupresa. Stručna analiza je zamišljena kao stručna podloga koja može poslužiti nadležnim tijelima, investitoru i lokalnoj zajednici u donošenju informiranih odluka, uz poseban naglasak na zaštitu osjetljivog krškog okoliša i vodnih resursa.

## 2. Općenito o pridobivanju magnezija

### 2.1. Primarne mineralne sirovine za dobivanje magnezija

Magnezij je vrlo raširen u Zemljinoj kori i pojavljuje se u velikom broju minerala, no u industrijskoj (metalurškoj) proizvodnji u praksi se koristi tek manji broj mineralnih sirovina koje su dovoljno koncentrirane, dostupne i ekonomski isplative. Primarni izvori Mg najčešće su vezani uz evaporitne, karbonatne i ultramafitne stijene, a uz čvrste sirovine važan resurs predstavljaju i prirodne slanice (morska voda i slana jezera).

#### 2.1.1. Evaporitna ležišta (K–Mg soli i Mg-kloridi).

Evaporiti nastaju intenzivnim isparavanjem morske vode pri čemu se sukcesivno talože karbonati, sulfati, halit, a zatim i K–Mg soli poput karnalita, epsomita i kainita (GUILBERT & PARK, 1986). Najveći evaporitni bazeni bogati K–Mg solima opisani su u Saskatchewanu, Zechsteinu i Amazonskom bazenu (KOGEL et al., 2006; CAPUTO 2011). Industrijski su posebno važni karnalit ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) i bišofit ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Magnezij se iz takvih sustava često dobiva otapanjem (solution mining), odnosno injektiranjem vode u podzemne evaporitne slojeve, čime nastaju Mg-bogate otopine (brine) pogodne za daljnju preradu (npr. dobivanje  $\text{MgCl}_2$  i elektrolizu).

#### 2.1.2. Karbonatna ležišta (dolomit i magnezit) – ključne rude magnezija

Karbonatni izvori magnezija obuhvaćaju široko rasprostranjene dolomite i geografski ograničenije, ali Mg-bogatije magnezite. Dolomitizacija je temeljni proces u kojem Mg-bogate slane otopine zamjenjuju Ca u strukturi karbonata (WARREN, 2000), pa dolomit postaje jedan od najrasprostranjenijih i najvažnijih izvora magnezija. Upravo zbog velike rasprostranjenosti, dolomit je u praksi često strateški važan (npr. kao dominantna sirovina u dijelu proizvodnje u Kini).

Magnezit ima veći sadržaj Mg po toni u odnosu na dolomit, ali su velika ležišta magnezita koncentrirana u manjem broju zemalja (npr. Kina, Rusija, Brazil, Turska). U sedimentno-dijagenetskom kontekstu čest je magnezit tipa Veitsch, koji se javlja kao monomineralne leće unutar dolomita i vapnenca te je povezan s cirkulacijom Mg-bogatih fluida (POHL, 1990).

U karbonatnim ležištima najvažnije sirovine za proizvodnju Mg-metala ostaju dolomit i magnezit, koji čine osnovu termičke/karbotermalne proizvodnje (SIMANDL et al., 2007). Nasuprot tome, minerali huntit i hidromagnezit, iako Mg-bogati, danas se većinom koriste kao usporivači gorenja, jer endotermnim raspadom snižavaju temperaturu plamena i oslobađaju plinove (npr. CO<sub>2</sub>) koji razrjeđuju zonu izgaranja (HOLLINGBERY & HULL, 2012).

Posebno je zanimljiv brucit (Mg(OH)<sub>2</sub>): zbog relativno niske temperature dehidracije (~550 °C; Johnson & Walker, 1993) i potencijalno visoke čistoće smatra se jednom od pogodnijih sirovina za metalurško dobivanje magnezija, iako se u praksi danas također pretežito koristi kao anorganski usporivač gorenja (SIMANDL et al., 2007).

### 2.1.3. Ultramafitne stijene i Mg-silikati (olivin, serpentin, talk) – velik potencijal, veći tehnološki izazovi

Ležišta vezana uz ultramafitne komplekse uključuju magnezit tipa Kraubath, koji se javlja kao u sustavima žila i stockwork strukturama u serpentiniziranim ultramafitima, često u Alpinsko-Himalajskim ofiolitima (POHL, 1990). Osim magnezita, ultramafitni kompleksi sadrže obilne Mg-silikate poput olivina, serpentina i talka (tipično u dunitima, peridotitima i serpentininitima), rasprostranjene u ofiolitnim pojasevima i mafijsko-ultramafičnim intruzijama diljem svijeta.

Međutim, Mg u silikatima je često kemijski stabilno vezan, pa je izdvajanje magnezija tehnološki složenije i u pravilu skuplje nego iz karbonata ili Mg-kloridnih otopina. To ilustrira i primjer kanadskog pogona Magnola (2002.), gdje je ekstrakcija Mg iz serpentininitnih jalovina pokazala ekonomske limite. Unatoč tome, interes raste jer se razvijaju nove tehnologije: patentirani procesi ekstrakcije Mg iz olivina (HANSEN & ZANDER, 2011) te industrijska demonstracija dobivanja Mg iz serpentininitnih stijena Al-Si termoredukcijom (LU & NEELAMEGGHAM, 2021) predstavljaju važne iskorake za buduću valorizaciju ovih sirovina.

### 2.1.4. Prirodne slane otopine (morska voda i slana jezera) – “tekući” primarni izvor

Uz čvrste rude, magnezij se može dobivati i iz slanih voda. Magnezij je među najzastupljenijim otopljenim komponentama u morskoj vodi (nakon Na i Cl), a značajne koncentracije mogu postojati i u slanim jezerima i zatvorenim evaporitnim sustavima. Povijesno je dio proizvodnje bio

vezan uz izdvajanje Mg iz morske vode, dok i danas postoje primjeri industrije koja koristi prirodne slane sustave (npr. slana jezera poput Great Salt Lakea ili evaporitne sustave poput Mrtvog mora) za dobivanje Mg-kloridnih otopina pogodnih za elektrolizu. U praksi, ekonomika takvih procesa ovisi o tome koliko je početna otopina Mg-bogata i koliki su troškovi koncentriranja/pročišćavanja.

## 2.2. Sekundarni izvori magnezija

Zbog potrebe za dekarbonizacijom, smanjenjem otpada i diverzifikacijom opskrbe, sve se veća pažnja usmjerava na sekundarne izvore magnezija, materijale koji nastaju kao nusproizvodi ili otpadni tokovi drugih industrija, ali sadrže značajne količine Mg ili omogućuju dobivanje Mg iz već postojećih otopina.

### 2.2.1. Čvrsti sekundarni izvori

Leteći pepeo: globalna godišnja proizvodnja iznosi oko 600 Mt, a određeni tipovi mogu sadržavati do 9,8 wt% Mg. Godine 2023. započela je prva industrijska proizvodnja Mg-metala iz ove sirovine kombinacijom hidrometalurških i termoredukcijskih postupaka (LATROBE MAGNESIUM, 2024).

Jalovina azbesta: često je bogata serpentinitom i Mg-silikatima (otprilike 15–18 wt% Mg). Takav se materijal koristi eksperimentalno i u pilot-razvoju u Kanadi i Europi, pri čemu se ispituju ekološki prihvatljiviji pristupi, npr. luženje sumpornom kiselinom uz dodatke koji poboljšavaju kinetiku/prolaznost procesa (LIU et al., 2022).

### 2.2.2. Tekući sekundarni izvori (industrijske i procesne slanice)

Koncentrirane otpadne slane otopine iz desalinizacije: sadrže oko 0,28 wt% Mg i uz veliki broj aktivnih postrojenja te vrlo velike dnevne kapacitete predstavljaju potencijalno važan, “stalni” tok Mg-bogatih otopina (JONES et al., 2019).

Slane jezerske otopine povezane s proizvodnjom litija: iako su same po sebi prirodni sustavi, u kontekstu dobave kritičnih metala često se promatraju kao sekundarni tok u odnosu na litij (jer je primarni cilj eksploatacije litija). Budući da takve otopine često imaju visok Mg/Li omjer (Mg može dosezati i nekoliko masenih postotaka), izdvajanje Mg precipitacijom (npr. kao karbonati, aluminati ili fosfati) može biti tehnološki i ekonomski povoljnije, osobito ako se integrira u postojeće tokove obrade.

## 2.3. Industrijska primjena magnezija

Širok raspon industrijskih primjena magnezija, od automobilske industrije (48 %), ambalaže (23 %), građevinarstva (13 %) i procesa desulfurizacije čelika (12 %) do zrakoplovstva, brodarstva, željezničkog prometa (4 %), medicinske opreme, sportskih proizvoda i elektro-kemijskih te organsko-kemijskih primjena, naglašava njegovu stratešku važnost (GROHOL & VEEH, 2023). Europska komisija uvrstila je magnezij na popis kritičnih sirovina već 2011., a ondje se zadržao do danas zbog nedostatka domaće proizvodnje i rastuće potražnje (EC 2011, 2014, 2017, 2020).

Magnezij je najlakši konstrukcijski metal i treći najčešće korišteni metal nakon željeza i aluminija (MORDIKE & EBERT, 2002; International Magnesium Association). Najčešće se upotrebljava u obliku MgO, posebno u proizvodnji vatrostalnih materijala, dok se čisti metal obično prodaje s čistoćom od 99,8% Mg ili višom (BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, 2004). Njegova glavna primjena je u metalurgiji, gdje se legira s Al, Zn i Mn za dobivanje laganih, čvrstih legura pogodnih za zrakoplovnu i automobilsku industriju, uz tipične dodatke Mg od 0,1–5 wt% (TAN & RAMAKRISHNA, 2021).

U posljednjem desetljeću uporaba magnezija snažno raste u automobilskoj industriji zbog strožih propisa o potrošnji goriva i potrebe za lakšim komponentama. Magnezij omogućuje lijevanje većih dijelova s manje spojeva, čime se smanjuju troškovi i olakšava montaža (IMA). Slični trendovi prisutni su u zrakoplovstvu i svemirskoj industriji, gdje magnezij smanjuje masu bez kompromisa u čvrstoći, povećava energetska učinkovitost te pruža otpornost na visoke temperature i elektromagnetsko zračenje.

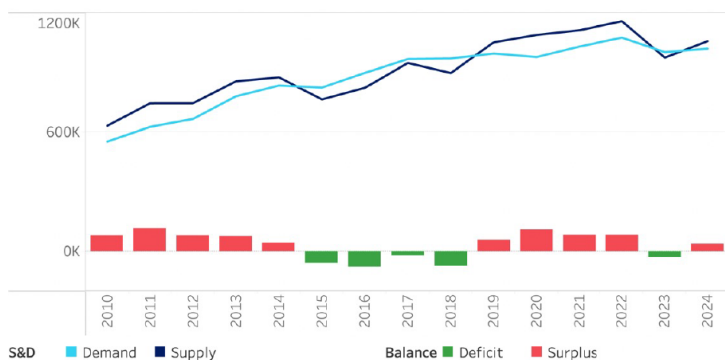
U metalurškim procesima magnezij se koristi za desumporizaciju čelika i u proizvodnji nodularnog lijeva, kao i redukcijsko sredstvo pri dobivanju berilija, cirkonija, uranija i titana. Široko se primjenjuje i u anodama za zaštitu od galvanijske korozije, primjerice u cjevovodima i kućanskim aparatima. U elektronici je cijenjen zbog male težine i dobrog odvođenja topline te se koristi u kućištima mobitela, prijenosnih računala i kamera.

U medicini se  $Mg(OH)_2$  koristi kao antacid i laksativ,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  za tretiranje manjih kožnih iritacija, a magnezijeve legure sve se češće primjenjuju kao biokompatibilni implantati. U sportu se rabi za izradu lagane opreme poput teniskih reketa, golf palica i biciklističkih okvira. Dodatne primjene uključuju pirotehniku, specijalne baterije, tiskarsku industriju (magnesium plates), boje i tinte ( $MgCO_3$ ) te  $MgF_2$  premaze za optičke leće radi smanjenja refleksije.

## 2.4. Globalna i europska proizvodnja magnezija

Primarni magnezij (metal) proizvodi se iz karbonatnih sirovina (najčešće dolomita) ili iz kloridnih otopina (morska voda i slanice), a predstavlja ključnu sirovinu za proizvodnju legura, desulfurizaciju čelika i brojne kemijske primjene. Prema CM GROUP (2025), globalna proizvodnja primarnog magnezija u 2024. godini iznosila je oko 1 057 kt (+11,0 % u odnosu na 2023.), dok je globalna potrošnja procijenjena na 1 022 kt (+1,8 %), pa je tržište završilo s blagim viškom ponude od približno 35 kt (slika 1).

WORLD PRIMARY Mg SUPPLY DEMAND BALANCE 2010 to 2024  
(2010 - 2024, t)



- **Global primary Mg production up 11.0% y-o-y to 1,057kt,**
  - **China up 12.4% to 949kt, ROW stable at 109kt.**
- **Global Mg consumption up 1.8% y-o-y to 1,022kt,**
  - **China at 466kt (+3.1%), ROW at 556kt (+0.7%)**
- **Ave primary Mg prices (FOB China) US\$2,616/t (-23.6%) y-o-y.**
- **China Mg inventories stable (54kt Q1 24 to 57kt Q1 25)**
- **China Mg (all products) exports 460kt (+12.7%) y-o-y**
- **Ave global primary Mg cash costs at US\$2,182/t (-11.8%)**
  - **China at US\$2,034/t (-23.7%)**
  - **ROW producers at US\$3,558/t (-6.8%)**

Slika 1. Grafički prikaz odnosa u svjetskoj proizvodnji i potražnjimagnezija (CM GROUP, 2025).

Globalna ponuda pritom je izrazito geografski koncentrirana. Kina je u 2024. godini proizvela oko 949 kt primarnog magnezija (≈90 % svjetske proizvodnje; Slika 1), dok je ostatak svijeta proizveo oko 109 kt. Najveći dio kineske proizvodnje odvija se u pokrajinama Shaanxi i Shanxi, uz dominantnu primjenu silikotermijske redukcije dolomita (Pidgeonov proces), što kineskim proizvođačima daje troškovnu prednost, ali istodobno povećava osjetljivost globalnog tržišta na regulatorne, energetske i logističke poremećaje u jednoj regiji (CM GROUP, 2025). Međutim, industrijska proizvodnja magnezija u EU-u praktički ne postoji, pa je u 2023. godini uvezeno oko 670 tisuća tona magnezijeva metala, uglavnom iz Kine.

Europska unija danas nema značajnu industrijsku proizvodnju primarnog magnezija te se opskrba u velikoj mjeri temelji na uvozu. Zbog dominacije Kine u globalnoj ponudi europsko tržište je posebno izloženo poremećajima u kineskoj proizvodnji, izvoznim ograničenjima i promjenama cijena. Prema analizi trgovinskih tokova, Europa je 2024. bila najveći uvoznik primarnog magnezija iz Kine s oko 104 kt (+22,1 % u odnosu na 2023.) (CM GROUP, 2025). U cilju smanjenja ovisnosti o uvozu u Europi se razvija niz projekata obnove domaće proizvodnje primarnog magnezija, pri čemu se tehnološke opcije detaljnije razmatraju u sljedećem poglavlju.

## 2.5. Tehnologije proizvodnje magnezija

Industrijska proizvodnja metalnog magnezija danas se globalno svodi na dvije glavne skupine tehnologija: elektrolitičke procese (elektroliza taline  $MgCl_2$ ) i **termičke** (pirometalurške) redukcijske procese (toplinska redukcija  $MgO$ ). Odabir tehnologije ovisi o dostupnoj sirovini (dolomit/magnezit, slanice, nusproizvodi), trošku i dostupnosti energenata (električna energija, ugljen/plin), traženom kapacitetu, kao i o ekološkim i ekonomskim uvjetima (SIMANDL et al., 2007).

U termičkim procesima magnezij se dobiva redukcijom  $MgO$  različitim reducensima, pa se u praksi razlikuju karbotermijski, **aluminotermijski** i silikotermijski postupci. Najrašireniji silikotermijski postupak je Pidgeonov proces, dok se u novije vrijeme sve više pozornosti usmjerava na aluminotermijski proces (u industrijskoj primjeni zasad ograničenu, prema navodu, na tvornicu u NR Kini).

U Europi se trenutačno ne proizvodi metalni magnezij na industrijskoj razini, ali se razvija više projekata:

- **Verde Magnesium (Rumunjska):** koncept temeljen na **aluminotermijskom procesu**; prema projektnim najavama provedena su industrijska pilot-ispitivanja te se planira izgradnja tvornice kapaciteta 500 t/god. do početka 2027., 30 000 t/god. do 2030., 90 000 t/god. do 2036.) (<https://energyindustryreview.com/metals-mining/verde-magnesium-eus-sole-strategic-project-for-sustainable-magnesium-metal-production/>).
- **Mures Magnesium (Rumunjska):** razvijen proces izdvajanja magnezija iz ostataka prerade **kromne rude** (<https://muresmag.eu/>).
- **Njörður (Island):** razvoj održivijeg postupka proizvodnje magnezija **elektrolizom uz geotermalnu energiju**, s ciljem oko 50 000 t/god. (<https://afry.com/en/newsroom/news/afry-supports-njordurs-magnesium-project-in-iceland>).

### 2.5.1. Elektroliza taline

Elektrolitički postupci polaze od bezvodnog magnezijevog klorida ( $MgCl_2$ ) u rastaljenom stanju. Način dobivanja  $MgCl_2$  ovisi o polaznoj sirovini: može se dobiti iz slanica (morska voda, jezerske slanice), ili kemijskim pretvorbama iz karbonatnih sirovina (dolomit/magnezit). Klasičan primjer

je “Dow” koncept u kojem se iz morske vode prvo istaloži  $Mg(OH)_2$ , zatim pretvori u  $MgCl_2$ , isušuje do bezvodnog stanja i elektrolizira.

U praksi se elektroliza provodi u ćelijama s talinom pri približno  $\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$  (DAIGLE & DECARLO, 2022). Budući da čisti  $MgCl_2$  ima ograničenu vodljivost i nepovoljna talinska svojstva, u talinu se dodaju kloridi Na, K i Ca radi poboljšanja vodljivosti i sniženja tališta. Kao elektrode se koriste željezne katode i grafitne anode, a odvajanje anodnog i katodnog prostora (npr. dijafragma) važno je kako bi se spriječilo miješanje produkata elektrolize.

- Na katodi se izlučuje magnezij (tekući metal), koji zbog niže gustoće pliva na talini i izvlači se (npr. vakuumskim loncem).
- Na anodi se oslobađa klor ( $Cl_2$ ), koji se može iskoristiti u proizvodnji/obnavljanju  $MgCl_2$ , ali zahtijeva strogo kontrolirano rukovanje.

Važno je kontrolirati sastav elektrolita: Na, K i Ca se ne izlučuju jer su elektro pozitivniji (imaju negativnije redukcijske potencijale) od Mg, dok prisutnost “pozitivnijih” elemenata (npr. Al i teški metali) može uzrokovati nepoželjna izlučivanja i onečišćenje metala (FRIEDRICH et al., 2006).

### **Operativne i ekonomske značajke**

Elektroliza je u pravilu kontinuirani proces, s manjim zahtjevom za radnom snagom po toni proizvoda, ali s velikim tehnološkim izazovom dobivanja čistog, bezvodnog  $MgCl_2$  (higroskopsnost i problemi s vodom). U literaturi se navode tipične specifične potrošnje električne energije reda  $\sim 18\text{--}28\text{ MWh/t Mg}$ , dok termički procesi često imaju višu ukupnu specifičnu energetska potrošnju (SIMANDL et al., 2007). Međutim, elektroliza traži visoka početna ulaganja i stabilan izvor električne energije; procjenjuje se da su kapitalni troškovi značajno viši nego kod Pidgeonovih peći te je ekonomičnija u većim kapacitetima (SIMANDL et al., 2007).

Napomena o trendovima: u nekim kontekstima udio elektrolize opada zbog visokih kapitalnih troškova, zahtjevne pripreme bezvodnog  $MgCl_2$  i cijene električne energije, dok u drugim okruženjima (osobito uz niskougljičnu struju) elektroliza dobiva na važnosti zbog potencijalno povoljnijeg okolišnog profila u odnosu na ugljenom pogonjene termičke procese (FU et al., 2012).

### **2.5.2. Toplinska redukcija magnezijevog oksida (termički procesi)**

Magnezij se može dobiti i toplinskom redukcijom  $MgO$ , pri čemu se kao reducenski mogu koristiti Si (ili  $FeSi$ ), Al, ugljik (karbotermija) te druge varijante (npr.  $CaC_2$ ). Termički postupci često polaze od dolomita, koji se najprije kalcinira (razgradnja karbonata) čime nastaje smjesa  $MgO + CaO$ .

Zatim slijedi redukcija u uvjetima visokih temperatura, često uz vakuum, pri čemu se Mg izdvaja kao para i kondenzira u hladnijem dijelu sustava.

### **Pidgeon proces (silikotermijska redukcija)**

Pidgeonov proces je najrašireniji termički postupak i u industrijskoj praksi dominantan zbog relativno niskih početnih ulaganja u opremu, unatoč većem radnom angažmanu i nepovoljnijim emisijama (SIMANDL et al., 2007).

Proces se tipično sastoji od sljedećih koraka:

1. Kalcinacija dolomita: pečenjem dolomita dobiva se smjesa MgO i CaO.
2. Priprava briketa: kalcinirani dolomit miješa se s ferosilicijem (FeSi) kao reducensom te uz dodatak fluorita (katalitički/reakcijski dodatak), nakon čega se oblikuju briketi.
3. Redukcija u retortama: briketi se zagrijavaju u zatvorenim retornim/vakuumskim pećima na oko 1200–1250 °C uz sniženi tlak.
4. Kondenzacija i rafinacija: Mg se izdvaja u parnom stanju, kondenzira u hladnijem dijelu retorte u obliku sirovih nakupina ("kruna"), a zatim se metal dodatno pročišćava (npr. destilacijom) i lijeva u ingote (FRIEDRICH et al., 2006; FU et al., 2012).

Prednosti: niži kapitalni trošak, jednostavnija oprema i fleksibilnost za manje kapacitete. Nedostaci: šaržni (batch) karakter, veći radni angažman, velika količina troske, dio neizreagiranog ferosilicija (ograničena uporaba), te visok CO<sub>2</sub> otisak (zbog kalcinacije karbonata i izvora topline), što se detaljnije razmatra u poglavlju o ekološkim utjecajima (FRIEDRICH et al., 2006; FU et al., 2012).

### Aluminotermijski proces

U aluminotermijskom procesu polazna sirovina je najčešće dolomit, koji se prvo kalcinira, a zatim se dobiveni oksidi reduciraju aluminijem u vakuum peći pri temperaturama do oko ~1100 °C. Budući da je aluminij snažniji reducens od silicija (napomena iz izvora WULANDARI et al., 2010), može se postići redukcija pri nižoj temperaturi.

Za poboljšanje učinkovitosti proces se može razviti u smjeru korištenja čisteg MgO, pa se uvodi dodatni korak odvajanja CaO od MgO prije redukcije. To povećava procesnu složenost, ali može poboljšati iskorištenje i kvalitetu produkta.

Prednosti: niža procesna temperatura, potencijalno niže izravne emisije CO<sub>2</sub> (ovisno o energetske bilanci i o tome koristi li se primarni ili otpadni Al).

Nedostaci: visoka cijena aluminija, koja se može djelomično ublažiti korištenjem aluminijevog otpada kao dijela reducensa (FRIDERICH et al., 2006).

### Ostali i nove termički procesi (razvoj)

Osim dominantnog Pidgeon procesa i aluminotermijskog procesa, istražuju se i alternativne mogućnosti, osobito **karbotermijska redukcija** (izravna redukcija MgO ugljikom), koja zahtijeva **ekstremno visoke temperature (>1800 °C)**. Takav pristup može teoretski pojednostaviti kemizam reducensa i koristiti jeftiniji ugljik, ali do danas nije široko komercijaliziran i ostaje razvojna opcija (SIMANDL et al., 2007). U povijesti su postojale i druge termičke varijante (npr. Magnetherm), no u suvremenoj industriji nisu dominantne.

### 2.5.3. Prednosti i nedostaci (tehničko-ekonomska i okolišna usporedba)

Usporedba procesa najčešće se radi kroz: **(i) energiju i kapacitet, (ii) emisije u zrak, (iii) emisije u vodu, te (iv) kruti otpad i nusproizvode**. Važno je naglasiti da rezultati ovise o granicama sustava (npr. računa li se proizvodnja ferosilicija ili aluminija, te kakav je elektroenergetski miks).

#### Energija, kapacitet i ulaganja

- **Pidgeon:** niži CAPEX i jednostavnija oprema, ali šaržni rad i veća potreba za radnom snagom; visoke emisije zbog kalcinacije i izvora topline.
- **Elektroliza:** kontinuirani proces, manja radna intenzivnost; tipično ~18–28 MWh/t Mg električne energije, ali visoki kapitalni troškovi i zahtjevna priprema bezvodnog MgCl<sub>2</sub>; isplativija u većim kapacitetima (SIMANDL et al., 2007).

- **Aluminotermijski proces:** niže temperature procesa, povoljniji okolišni profil u samoj redukciji, ali ekonomika snažno ovisi o cijeni i dostupnosti aluminija (primarni vs. otpadni).

### Emisije u zrak

Emisije u zrak variraju prema tehnologiji (Tablica 1). Kod svih procesa emisije čestica prvenstveno su vezane uz rukovanje sirovinama i mogu se značajno smanjiti primjenom najboljih raspoloživih tehnika (BAT).

Tablica 1. Usporedba emisija u zrak iz različitih procesa proizvodnje magnezija (EHRENBERGER et al., 2020, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2008, YAOUWU et al., 2016, ZULIANI et al., 2024; XU et al., 2023, LI et al. 2024; WU et al., 2012, BROWN et al., 2011)

Pokazatelj	Pidgeon	Elektroliza	Aluminotermijski
kg CO <sub>2</sub> /kg Mg	21,8–28	8,5–14	~do 60% manje od Pidgeon postupka
Drugi plinovi	CO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CH <sub>4</sub> , HF, SiF <sub>4</sub>	Cl <sub>2</sub> , HCl, NO <sub>x</sub>	minimalno (ovisno o energentu)
PCDD/PCDF (ng TEQ/Nm <sup>3</sup> )	0,8	0,08	–
Čestice	prašina od rukovanja sirovinama	prašina od rukovanja sirovinama	prašina od rukovanja sirovinama
Metalne pare	Mg pare	Mg pare	Mg pare

\*Napomena: vrijednosti za CO<sub>2</sub> kod aluminotermije snažno ovise o pretpostavkama, osobito o tome uključuje li se otisak proizvodnje aluminija i kakav je izvor energije.

Ključna razlika je da Pidgeon tipično ima najviši CO<sub>2</sub> otisak zbog kombinacije **kalcinacije dolomita** i **izgaranja goriva** za toplinu, dok elektroliza stvara **Cl<sub>2</sub>** kao nusproizvod koji zahtijeva kontrolu i/ili iskorištavanje a može biti vrlo izazovan sa okolišnog aspekta.

### Emisije u vodu i kruti otpad

Rezultati usporedbe emisija u vodu i krutog otpada sažeti su u Tablici 2.

Tablica 2. Usporedba emisija u vodu i krutog otpada koji nastaju iz različitih procesa proizvodnje magnezija (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2008, XU et al., 2023; LI et al., 2023)

Stavka	Pidgeon	Elektroliza	Aluminotermijski
Onečišivači vode	kisele vode od ispiranja plina (scrubber)	kloridi, moguće Cl <sub>2</sub> /HCl u otpadnim tokovima	zanemarivo / zatvorena petlja (ovisno o izvedbi)
Kruti otpad	troska (Ca-silikati) + ostatci reducensa (FeSi)	soli i muljevi iz obrade/neutralizacije	troska (kalcijev aluminat) – mogućnost uporabe

- **Pidgeon:** proces je dominantno u čvrstoj fazi pa su emisije u vodu obično manje, ali pročišćavanje dimnih plinova može generirati **kisele otpadne vode** koje traže neutralizaciju. Najveći problem je **količina troske** i ostataka reducensa; jedan od pristupa je uporaba troske u cementnim materijalima (Xu et al., 2023).
- **Elektroliza:** rizik za vodu uglavnom je vezan uz **kloridne tokove** i potencijalno zakiseljavanje (ovisno o sustavu obrade i hvatanja/apsorpcije plinova). Kruti otpad je često manji po toni proizvoda, ali nastaju specifični tokovi soli i muljeva.
- **Aluminotermija:** kao “suhi” proces može imati zanemarive emisije u vodu; troska (kalcijev aluminat) može biti **vrijedan nusproizvod** i potencijalno se oporabljuje, čime se gotovo minimizira ukupno opterećenje otpadom.

### PCDD/PCDF (dioksini i furani)

Kod Pidgeon procesa emisije PCDD/PCDF mogu biti kritične zbog potencijalnog utjecaja na okoliš. U prikazanim podacima (Tablica 1) Pidgeon pokazuje više vrijednosti od elektrolize, ali u praksi razine ovise o gorivu, nečistoćama, režimu rada te učinkovitosti pročišćavanja dimnih plinova. Ključno je da se primjenom BAT mjera (filtri, skruberi, optimizacija izgaranja i kontrola kloriranih spojeva) emisije mogu značajno ublažiti.

Aluminotermijski postupak često se navodi kao čišća alternativa kada je riječ o PCDD/PCDF. Ni PCDD ni PCDF nisu prisutni u dolomitu, te prilikom korištenja čistog aluminija u procesu taljenja, aluminija nastanak dioksina je gotovo nemoguć. Dioksini (PCDD/PCDF) ne nastaju iz samog metala; za njihovo stvaranje potrebni su određeni kemijski preduvjeti. Dioksini su klorirani organski spojevi. Da bi nastali, moraju istovremeno biti prisutne tri komponente:

1. Izvori klora: (npr. ostaci PVC-a, ulja s kloriranim aditivima, boje koje sadrže klor).
2. Ugljik: (npr. plastika, ostaci boje, guma, organska onečišćenja).
3. Toplinski proces: osobito u temperaturnom rasponu 200°C do 450°C (poznato kao de novo sinteza).

Budući da se u MFE aluminotemičkom procesu koristi čisti aluminij, glavne “sastojke” (klor i ugljik) za nastanak dioksina u pravilu nema. Sve dok je osigurano da otpad ne sadrži ostatke plastike (posebno PVC), nema pričvršćenih ulja ili boja koje sadrže klor, i da se ne koriste sredstva za čišćenje/soli koje sadrže klor u trenutku kada je prisutan ugljik, tada je stvaranje dioksina tijekom taljenja legura kemijski gotovo nemoguće. Moderna industrijska postrojenja također koriste sustave pročišćavanja dimnih plinova (npr. filtre s aktivnim ugljenom) kako bi sigurno uhvatila čak i najmanje tragove koji bi mogli nastati zbog minimalnih preostalih onečišćenja.

U suvremenim proizvodnim pogonima, međutim, filtri i druge mjere osiguravaju da ne predstavljaju zdravstvenu opasnost.

Zaključno, industrija se danas oslanja na **Pidgeon** (dominantan zbog nižeg CAPEX-a i dostupnosti dolomita, ali klimatski i okolišno zahtjevan), **elektrolizu** (tehnološki zahtjevna priprema  $MgCl_2$ , visoki kapitalni trošak, ali kontinuiran proces i potencijalno povoljniji otisak uz čistu struju) te sve zanimljiviji i ekološki puno prihvatljiviji **aluminotermički proces** (niže temperature i uz dodatne procese lovljenja, potencijalno niži izravni  $CO_2$ , uz ograničenje cijene/otiska aluminijske). U sljedećim poglavljima (npr. o ekološkim ograničenjima) ove razlike postaju ključne za razumijevanje zašto se proizvodnja geografski koncentrira i zašto se razvijaju novi projekti i tehnologije.

## 2.6. Ekonomski razlozi i tržišni čimbenici

Ekonomska isplativost je možda i presudan faktor koji objašnjava zašto se novi kapaciteti magnezija ne otvaraju lako. Globalno tržište magnezija u posljednjim desetljećima obilježeno je niskim cijenama i jakom konkurencijom Kine, što odvraća ulagače drugdje. Kina je uspjela dominirati tržištem zahvaljujući skupu povoljnih čimbenika: jeftinoj radnoj snazi, niskoj cijeni energije (uglavnom ugljena), povoljnim tečajnim odnosima, te državnim poticajima i slabijim ekološkim propisima. Takvi uvjeti omogućili su kineskim izvoznicima da ponude magnezij po cijenama s kojima zapadni proizvođači nisu mogli držati korak (SIMANDL et al., 2007). U

slobodnom tržištu, trenutna cijena magnezija određuje isplativu metodu proizvodnje; tako su kineski Pidgeon-pogoni s nižim kapitalnim troškovima, unatoč većim operativnim troškovima, zasuli svijet jeftinim magnezijem i potisnuli konkurenciju (SIMANDL et al., 2007).

Posljedica toga je bila zatvaranje mnogih pogona izvan Kine početkom 21. stoljeća. Primjerice, kompanija *Noranda* pokrenula je 2001. moderni pogon Magnola u Kanadi koristeći inovativnu tehnologiju ekstrakcije magnezija iz rudničkih jalovina (serpentinita). No, zbog pada cijena uzrokovanog kineskim uvozom, troškovi proizvodnje Magnole bili su previsoki u usporedbi s tržišnom cijenom te je pogon obustavio rad već 2003. godine (SIMANDL et al., 2007). Slično tome, posljednja europska tvornica (Francuska) koja je koristila elektrolizu karnalita zatvorena je 2003. jer nije mogla konkurirati jeftinom kineskom materijalu. Zapadni proizvođači u SAD-u i Europi suočili su se s izborom: ili znatno smanjiti troškove (što je bilo teško zbog više cijene rada, strožih propisa i skuplje energije) ili izaći s tržišta. Mnogi su odabrali ovo drugo, ostavljajući Kinu da preuzme lidersku poziciju.

Važno je naglasiti da su velike oscilacije u cijeni magnezija također faktor. Cijena magnezija može biti nestabilna, periodi relativno niskih cijena (kada kineska ponuda nadmašuje potražnju) mogu brzo prijeći u nagli skok cijena ako dođe do poremećaja (primjerice, nestašice struje u Kini ili političkih odluka). Ova nepredvidivost odvraća investitore od financiranja novih projekata koji bi trebali godine da se izgrade: nitko ne želi uložiti stotine milijuna dolara u tvornicu koja bi postala rentabilna tek za 5-10 godina, ako postoji rizik da će jeftini uvoz opet srušiti cijenu prije nego se ulaganje isplati.

## 2.7. Geopolitički čimbenici i koncentracija tržišta

Magnezij je danas i geopolitičko pitanje, jer je ključan za industriju (automobilska, zrakoplovna, aluminijska industrija) a njegova se opskrba oslanja na jednu jedinu zemlju. Ova “*single source*” situacija predstavlja strateški rizik. Kina proizvodi oko 85–90 % svjetskog magnezija (<https://reade.com/blog/magnesium-a-critical-material-with-a-single-source-problem/#:~:text=More%20than%2085%20percent%20of,severe%20volatility%20in%20global%20markets%E2%81%B4>), što znači da bilo kakav poremećaj unutar Kine, bilo ekonomski, politički ili prirodni, može uzrokovati lančane probleme diljem svijeta. To nije samo teoretska prijetnja: 2021. godine Europa se suočila s akutnom krizom opskrbe magnezijem kada su kineske vlasti zbog nestašice električne energije i zimskih restrikcija emisija  *naredile gašenje dijela topionica*. U roku od nekoliko tjedana europske zalihe magnezija su se iscrpile, cijene su skočile i do 5-7 puta (sa ~\$2000 na preko \$10,000 po toni), a mnoge industrije (automobilska, metalurška)

upozoravale su na katastrofalne posljedice ako se opskrba ne obnovi. Budući da Europa nije imala alternativu (95 % ovisnost o Kini), morala je hitno diplomatski intervenirati prema Kini kako bi se isporuke nastavile. Slična situacija ponovila se i 2023. godine, svaka redukcija proizvodnje u kineskoj provinciji Shaanxi odmah je izazvala paniku među kupcima u svijetu, koji su počeli panično kupovati i tražiti zalihe

<https://reade.com/blog/magnesium-a-critical-material-with-a-single-source-problem/#:~:text=risks%20that%20go%20far%20beyond,critical%20sectors%20will%20remain%20precarious>

Ovakva geografska koncentracija pretvara magnezij u strateški materijal. Vlade sada svrstavaju magnezij među kritične sirovine za nacionalnu sigurnost i gospodarstvo. Postoji strah da bi Kina u nekom scenariju mogla iskoristiti svoj monopol kao geopolitički adut, primjerice, ograničiti izvoz (slično kao što se dogodilo s rijetkim zemnim elementima 2010.). Već je bilo naznaka takvih poteza: Kina je 2006. ukinula porezne olakšice na izvoz magnezija i uvela izvozne carine od 5–15 %, kako bi zadržala više metala za svoju industriju i reducirala izvoz energetski intenzivnih proizvoda (SIMANDL et al., 2007). Takve mjere čine stranim kupcima magnezij skupljim i manje dostupnim, što može biti motivirano kineskim unutarnjim planovima (npr. razvoj domaće industrije aluminija i automobilskih legura) ili geopolitičkim nesuglasicama.

Još jedan aspekt je tečaj i trgovinske relacije. Kineska dominacija dijelom je bila potpomognuta i povoljnom valutnom politikom i ulaskom Kine u WTO, što je olakšalo globalnu trgovinu kineskim metalima (SIMANDL et al., 2007). No, ako bi došlo do trgovinskog rata ili sankcija, opskrba magnezijem mogla bi se poremetiti. SAD drži jednog proizvođača uglavnom radi strateške autonomije, kako bi barem minimalno mogao pokriti svoje potrebe u slučaju prekida uvoza. Europa se, s druge strane, trenutno nalazi u vrlo ranjivom položaju jer nema domaćih izvora i u potpunosti je izložena geopolitičkim rizicima uvoza.

Tek nedavno, nakon spomenute krize 2021., Europa i druge zemlje počele su ozbiljnije razmatrati oživljavanje vlastite proizvodnje unatoč višim troškovima, upravo radi sigurnosti opskrbe. Magnezij je postao školski primjer kako se globalne industrije mogu temeljiti na materijalu koji je obilan u Zemljinoj kori, ali oskudan u opskrbi zbog koncentracije kapaciteta za njegovo rafiniranje. Time je magnezij postao i pitanje geopolitičke strategije: diversifikacija izvora i smanjenje ovisnosti o jednom dobavljaču sada su prioriteta mnogih vlada.

## 2.8. Mineralne, kemijske i petrografske značajke dolomita kamenoloma Grguljača

Ležište dolomita Grguljača kod Kupresa izgrađeno je pretežito od srednje i gornjotrijaskog „Glavnog dolomita“ (ostali nazivi su Dolomia Principale, Hauptdolomit, Main Dolomite itd...), koji regionalno pripada karbonatnim sedimentima Jadranske mikroploče. Glavni dolomiti regionalno su prepoznata geološka jedinica sa vrlo širokom rasprostranjenjem te vrlo sličnim taložnim i dijagenetskim značajkama i velikom debljinom na vrlo širokom prostoru (Apenini, Alpe, Karpati, Dinaridi). Mineralni sastav stijene izrazito je jednostavan i homogen, s dolomitom ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) kao gotovo isključivo dominantnim mineralom, dok su ostale mineralne faze prisutne samo u tragovima (Tablica 3).

Petrografski gledano, dolomit je većinom masivne građe, fine do srednje kristaliničnosti, pri čemu su kristali međusobno dobro povezani i čine kompaktnu karbonatnu matricu. Tekstura stijene upućuje na visok stupanj dolomitizacije izvornog karbonatnog sedimenta, pri čemu su primarne sedimentne strukture uglavnom izbrisane ili slabo očuvane. Takva mikrostruktura rezultira vrlo ujednačenim fizikalno-mehaničkim i kemijskim svojstvima kroz veći dio ležišta.

Lokalno su prisutne brečaste i kataklastične zone, koje su povezane s tektonskim poremećajima i rasjedima unutar ležišta. U tim zonama dolomit je fragmentiran, a pojedini ulomci su uglavnom uglati do sub-uglati te cementirani istovrsnim dolomitnim materijalom. Unatoč izraženoj tektonskoj deformiranosti, mineralni sastav brečiranih dijelova ne pokazuje značajna odstupanja u odnosu na masivne dolomite, što upućuje na to da tektonski procesi nisu bitno utjecali na kemijsku i mineralnu čistoću stijene.

Nečistoće u mineralnom sastavu su vrlo slabo razvijene. Silikatne i glinovite faze javljaju se sporadično i u zanemarivim količinama, bez kontinuiranih slojeva ili leća. Također, nisu utvrđene značajnije količine željeznih oksida ili sulfida, što se odražava u vrlo svijetloj, gotovo snježno bijeloj boji stijene. Ova boja, zajedno s visokom vrijednošću bijeline, izravna je posljedica mineralne čistoće i izostanka pigmentirajućih minerala.

Petrografske značajke ukazuju i na nisku razinu alteracije i trošenja. Dolomit pokazuje dobru otpornost na površinsko i kemijsko raspadanje, dok su procesi otapanja i sekundarne poroznosti ograničeni na pukotine i rasjedne zone. Takav karakter stijene povoljan je ne samo za eksploataciju, već i za primjene u kojima je potrebna dugoročna stabilnost materijala.

Sve navedene mineralne i petrografske značajke potvrđuju da dolomit s područja Kupresa predstavlja visokokvalitetnu karbonatnu stijenu, s homogenim mineralnim sastavom, povoljnim teksturnim obilježjima i minimalnim udjelom nepoželjnih mineralnih faza. Ovakva svojstva čine ga izuzetno pogodnim za širok spektar industrijskih i tehničkih primjena, kao i za znanstvene i inženjerske analize u području geologije i geotehnike.

*Tablica 3. Mineralni sastav i petrografske značajke dolomita sa lokaliteta Grguljača.*

<b>Svojstvo</b>	<b>Opis</b>
Dominantni mineral	Dolomit – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Litostratigrafija	Gornjotrijaski glavni dolomit (Upper Triassic Main Dolomite)
Boja	Snježno bijela do vrlo svijetla
Tekstura	Masivna do lokalno brečasta (tektonski poremećaji)
Nečistoće	Vrlo niske (Si, Al, Fe u tragovima)
Bijelina (L*)	~95,4 – 96,4

Kemijski sastav dolomita s ležišta Grguljača kod Kupresa odlikuje se vrlo visokim stupnjem čistoće i homogenosti, što potvrđuju rezultati višegodišnjih istraživanja i laboratorijskih analiza provedenih u okviru DMT-ovih PERC izvješća te neovisnih ispitivanja akreditiranog laboratorija Anzaplan (Tablica 4).

Dominantne kemijske komponente dolomita su kalcijev oksid (CaO) i magnezijev oksid (MgO), s prosječnim udjelima od približno 31 % CaO i 21–22 % MgO. Takav omjer vrlo je blizak teorijskom sastavu idealnog dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) te ukazuje na visoki stupanj dolomitizacije i stabilan mineralni sastav kroz cijelo istraženo ležište. Varijacije u sadržaju ovih oksida su male i prostorno ograničene, što dodatno potvrđuje ujednačenu kvalitetu sirovine .

Sadržaj silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) iznimno je nizak te se u većini analiziranih uzoraka nalazi ispod granice detekcije ili ne prelazi 0,03 %. Jednako tako, aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i željezov oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) prisutni su samo u tragovima, pri čemu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  rijetko prelazi 0,02–0,03 %. Niska koncentracija ovih oksida upućuje na minimalnu prisutnost glinovitih i detritičnih primjesa, što je posebno važno za industrijske primjene osjetljive na boju, čistoću i kemijsku reaktivnost materijala .

Ostali oksidi, uključujući  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SO}_3$  i  $\text{P}_2\text{O}_5$ , pojavljuju se u vrlo malim količinama, najčešće ispod granice detekcije analitičkih metoda. Takav kemijski profil potvrđuje da dolomit s Kupresa ne sadrži značajne količine štetnih ili tehnološki nepovoljnih elemenata, što dodatno povećava njegovu tržišnu vrijednost i primjenjivost.

Gubitak žarenjem (LOI) pri 1025 °C iznosi približno 47–48 %, što odgovara dekarbonizaciji karbonatne matrice i u skladu je s očekivanim vrijednostima za visokokvalitetni dolomit. Ova vrijednost potvrđuje da je stijena gotovo u potpunosti građena od karbonatnih minerala, uz zanemariv udio silikatne ili druge nekarbonatne faze.

Ukupno gledano, kemijski sastav dolomita s područja Kupresa karakterizira kombinacija visokog sadržaja CaO i MgO, vrlo niskih koncentracija nečistoća te stabilnih i ponovljivih analitičkih rezultata. Takve značajke svrstavaju ovaj dolomit među visokokvalitetne karbonatne sirovine, pogodne za zahtjevne industrijske primjene poput proizvodnje stakla, keramike, punila, kemijske industrije te specijalnih tehničkih proizvoda.

Tablica 4. Kemijski sastav dolomita sa lokaliteta Grguljača.

Kemijski sastav dolomita – Kupres (Grguljača)	
Kemijski sastav dolomita	maseni udjeli oksida, %
Komponenta	Raspon / prosjek
CaO	30,9 – 31,0
MgO	21,2 – 21,9
$\text{SiO}_2$	< 0,01 – 0,03
$\text{Al}_2\text{O}_3$	< 0,01 – 0,03
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,01 – 0,03
MnO	< 0,01 – 0,01
$\text{TiO}_2$	< 0,01
$\text{Na}_2\text{O}$	< 0,01
$\text{K}_2\text{O}$	< 0,01
$\text{SO}_3$	< 0,01
$\text{P}_2\text{O}_5$	< 0,01
Gubitak žarenjem (LOI, 1025 °C)	~47,7

### 3. ANALIZA UPRAVNIH POSTUPAKA I TEHNIČKE DOKUMENTACIJE ZA E.P. GRGULJAČA

- Rješenjem Ministarstva gospodarstva Hercegbosanske županije, broj 05-310-4/02 od 27. 05. 2002. godine, odobreno je poduzeću „Dolomit“ d.o.o. Kupres **istraživanje mineralne sirovine dolomita na istražnom prostoru „Grguljača“** (dalje: Rješenje o istraživanju-2002).

Vršna točka	X	Y
A	4 874.894,8	6 442.850,8
B	4 874.691,2	6 442.848,4
C	4 874.728,0	6 442.502,0
D	4 875.045,6	6 442.449,6

- Temeljem odobrenog i provedenog istraživanja urađen je **Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji i proračunu rudnih zaliha dolomita (kao tehničko-građevnog kamena) u ležištu „Grguljača“ općina Kupres** (dalje: Elaborat o zalihama, 2002), kojeg je potvrdila Stručna komisija Ministarstva gospodarstva Hercegbosanske županije (Rješenje broj: 05-10-14/02 od 02.12.2002.)
- Rješenjem Ministarstva gospodarstva Hercegbosanske županije, broj 05-310-14/02 od 20. 02. 2003. godine, **potvrđene su geološke rezerve i kvaliteta mineralne sirovine dolomita u ležištu dolomita**, općina Kupres (dalje: Rješenje o potvrdi rezervi-2003).

Prema Rješenju o potvrdi rezervi-2003 potvrđene su **bilančne rezerve od 1 433 268,8 m<sup>3</sup> dolomita**.

- Rješenjem Ministarstva gospodarstva Hercegbosanske županije, broj 5-310-4/02 od 26.08. 2003. godine, **odobrena je eksploatacija unutar utvrđenih granica eksploatacijskog polja „Grguljača“** (dalje: Rješenje o eksploatacijskom polju-2003).

Oznaka točke	Y	X
1	6 442 611.1	4 874 918.0
2	6 442 811.1	4 874 898.0
3	6 442 808.8	4 874 727.0
4	6 442 608.8	4 874 727,5

- Temeljem Rješenja o potvrdi rezervi-2003, Rješenja o eksploatacijskom polju-2003 te Projektnog zadatka poduzeća „Dolomit“ d.o.o. Kupres izrađen je **Glavni rudarski projekt eksploatacije tehničko-građevnog kamena na ležištu „Grguljača“ Kupres** (dalje: GRP-2003), od strane poduzeća „Geosonda bh“ d.o.o. Tuzla.

**GRP-2003 je revidiran** od strane trgovačkog društva Rudnici ugljena Tušnica d.o.o., broj 852/03 od 03.09.2003.

- Ministarstvo gospodarstva Hercegbosanske županije i trgovačko društvo „DOLOMIT“ d.o.o. Kupres sklopili su **Ugovor o koncesiji**, broj 01-02-270/06 od 10.05.2007. godine (dalje: Ugovor o koncesiji). Predmetom sklopljene koncesije je pravo i obveza Koncesionara na eksploataciju dolomita na ležištu „Grguljača“ na području općine Kupres, u minimalnoj količini od 30 000 m<sup>3</sup> godišnje. Koncesija je dodijeljena na rok od 30 (trideset) godina, računajući od dana sklapanja ugovora.
- Prema točki I. **Ugovora o koncesiji** eksploatacijski prostor (isto značenje kao i „eksploatacijsko polje“) je bio nepravilnog oblika omeđen duljinama koje spajaju vršne točke 1, 2, 3, 4 sa slijedećim koordinatama:

<b>KOORDINATE VRŠNIH TOČAKA</b>		
<b>TOČKA</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
1	6.442.611.1	4.874.918.0
2	6.442.811.1	4.874.898.0
3	6.442.808.8	4.874.727.0
4	6.442.608.8	4.874.725.5

**Napomena:** Zamijenjene su oznake koordinata (X i Y) smjera istok (apscisa) i sjever (ordinata). Osim toga koordinata točke 4, po ordinati (treći stupac) razlikuje se od tablice iz Rješenja o eksploatacijskom polju-2003.

- Temeljem Rješenja Ministarstva gospodarstva Hercegbosanske županije, broj 05-05-3-18-271/07 od 29.10.2007. godine, **odobreno je izvođenje radova po GRP-2003.**

**Izvođenje radova** provodi se na zemljištu označenom kao k.č. broj 1477, z.k. uložak broj 464, a površina eksploatacijskog polja za koju investitor ima Ugovor o koncesiji **iznosi 9,5 ha.**

- Ministarstvo gospodarstva Hercegbosanske županije i trgovačko društvo „DOLOMIT“ d.o.o. Kupres sklopili su **Aneks br. 1 Ugovora o koncesiji**, broj 05-05-18-313/08 od 13.07.2010. godine (dalje: Aneks br. 1). Aneksom br. 1 ugovorne strane suglasno su utvrdile da su dana 10. 05. 2007. godine sklopile Ugovor o koncesiji broj 05-01-18-300/07

za eksploataciju mineralne sirovine – dolomita na lokaciji „Grguljača“, općina Kupres. Aneksom br. 1 mijenja se točka 1. Ugovora o koncesiji tako da se precizira kako Koncesionar stječe pravo i obvezu eksploatacije dolomita na lokaciji „Grguljača“ u općini Kupres, u minimalnoj količini od 30 000 m<sup>3</sup> godišnje, na eksploatacijskom prostoru nepravilnog oblika omeđenom duljinama koje spajaju vršne točke A, B, C, D, E, F i G definiranih odgovarajućim koordinatama.

- Eksploatacijski prostor je bio nepravilnog oblika omeđen duljinama koje spajaju vršne točke A, B, C, D, E, F i G definirane odgovarajućim koordinatama.

Oznaka točke	Y	X
A	6 442 670.6	4 874 920.5
B	6 442 702.0	4 874 930.7
C	6 442 715.5	4 874 930.0
D	6 442 760.3	4 874 898.7
E	6 442 811.1	4 874 898.0
F	6 442 809.0	4 874 743.0
G	6 442 659.4	4 874 757.1

- Ministarstvo gospodarstva Hercegbosanske županije donijelo je Rješenje, broj 05-01-18-300/07 od 11. 04. 2013. godine, kojim se **potvrđuju geološke zalihe i kvaliteta mineralne sirovine – tehničko-građevnog kamena dolomita – na dan 31. 12. 2012. godine** na ležištu „Grguljača“ u općini Kupres.
- **Potvrđene eksploatacijske zalihe** tehničko–građevnog kamena dolomita na ležištu „Grguljača“ u općini Kupres, stanje na dan 31. 12. 2012. godine iznose:
  - eksploatacijske zalihe kategorije A: 406 802,00 m<sup>3</sup>
  - eksploatacijske zalihe kategorije B: 720 705,00 m<sup>3</sup>
  - eksploatacijske zalihe kategorije C1: 160 362,00 m<sup>3</sup>

Ukupno eksploatacijske zalihe kategorija **A + B + C1 iznose: 1 297 858,00 m<sup>3</sup>.**

- Ministarstvo gospodarstva Hercegbosanske županije i trgovačko društvo „DOLOMIT“ d.o.o. Kupres sklopili su **Aneks br. 2 Ugovora o koncesiji**, broj 05-01-18-300/07 od 10.02.2020. godine (dalje: Aneks br. 2)

Aneksom br. 2 ugovorne strane suglasno su utvrdile da su dana 10. 05. 2007. godine sklopile Ugovor o koncesiji broj 05-01-18-300/07 za eksploataciju mineralne sirovine – dolomita na ležištu

„Grguljača“, općina Kupres, kao i Aneks br. 1 Ugovora o koncesiji od 13. 07. 2010. godine. Članak I Ugovora, stavak 1, mijenja se na način da se dosadašnja količina od 30 000 m<sup>3</sup>/god zamjenjuje novom ugovorenom količinom eksploatacije dolomita u **100 000 m<sup>3</sup> godišnje**, kako je utvrđeno ovim Aneksom. Nadalje, članak II Aneksa br. 1 mijenja se tako da se dosadašnje koordinate vršnih točaka A, B, C, D, E, F i G eksploatacijskog polja zamjenjuju novim koordinatama.

Važeći eksploatacijski prostor nepravilnog oblika omeđen duljinama koje spajaju vršne točke A, B, C, D koje imaju slijedeće koordinate i nalaze se na K.č. 1477; br.Z.k. 464 K.O. Kupres.

A.	X	4.874.894.8	Y	6.442.850.8
B.	X	4.874.691,2	Y	6.442.848.4
C.	X	4.874.728.0	Y	6.442.502.0
D.	X	4.874.045.6	Y	6.442.449.6

- Temeljem zahtjeva investitora „DOLOMIT“ d.o.o. Kupres Federalno ministarstvo okoliša i turizma donijelo je Rješenje, broj: UPI 05/2-02-19-5-53/20 od 05.11.2020. godine, kojim se izdaje **okolišna dozvola za eksploataciju i preradu tehničko–građevnog kamena** na lokaciji „Grguljača“, općina Kupres. Predmetna eksploatacija provodi se na zemljištu označenom kao k.č. broj 1477, z.k. uložak broj 464, a površina eksploatacijskog polja za koju investitor ima Ugovor o koncesiji iznosi 9,5 ha.
- Temeljem zahtjeva investitora „DOLOMIT“ d.o.o. Kupres izrađen je **Projekt detaljnih geoloških istraživanja** tehničko-građevnog kamena dolomita, od strane trgovačkog društva „Sijenit“ d.o.o. Posušje, 2022. godine (dalje: PDGI-2022).
- **Općinski načelnik** putem Službe za prostorno uređenje, stambeno-komunalne poslove i katastar općine Kupres **izdao je**, temeljem PDGI-2022 i drugih urbanističko-tehničkih uvjeta, **Lokacijsku dozvolu**, broj: 03/2-19-4-39/22 od 21.10.2022. godine, za geološka istraživanja kamena dolomita na području Malih kupreških vrata „Grguljače“.
- Rješenjem Ministarstva gospodarstva Hercegbosanske županije, broj 05-01-18-300/07 od 03. 07.2023. godine, **odobreno je** trgovačkom društvu „Dolomit“ d.o.o. Kupres **istraživanje mineralne sirovine dolomita na istražnom prostoru „Grguljača“** (dalje: Rješenje o odobrenju istraživanja-2023), s nepravilno upisanim rokom važenja rješenja.
- Rješenjem o ispravci rješenja Ministarstva gospodarstva Hercegbosanske županije, broj 05-01-18-300/07 od 01. 08. 2023. godine, **ispravljena je pogreška o datumu važenja**



## Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija

**Rješenja o odobrenju istraživanja-2023.** Utvrđen je ispravljeni rok važenja Rješenja o istraživanju-2023 do 01.08.2024. godine.

Prema podacima iz Studije utjecaja na okoliš planirane tvornice za preradu dolomita (Zagreb Inspekt d.o.o. 2024.), za proizvodnju magnezija potrebno je 195 000 tona dolomita godišnje, što predstavlja približno 70 000 m<sup>3</sup> stijene u sraslom (čvrstom) stanju, uz utvrđenu obujamnu (zapreminsku) masu dolomita od 2.787 kg/m<sup>3</sup>. Vidljivo je da količina dolomita potrebna za proizvodnju magnezija iznosi 70 % dozvoljene godišnje eksploatacije prema **Ugovoru o koncesiji**.

## 4. TEHNOLOŠKE ZNAČAJKE POGONA ZA PROIZVODNJU MAGNEZIJA

Poduzeće BH Magnezij & Minerali d.o.o. Kupres, planira izgradnju i puštanje u rad tvornice odnosno tvornice za proizvodnju magnezija na lokaciji već postojeće separacije dolomita, u naselju Osmanlije, u općini Kupres.

Projektirani objekti u sklopu kompleksa smjestiti će se unutar obuhvata lociranog na katastarskim česticama označenim kao k.č. 210/4, 212/1, 212/4, 212/5, 212/6, 212/7, 212/8, 212/9, 213/1, 213/4, 214/8, 226/5, 214/1, 215/1 sve K.O. SP\_KUPRES.

### 4.1. Opis potencijalne tvornice za proizvodnju magnezija Kupres

Tvornica za proizvodnju Magnezija na lokaciji Kupres planira koristiti aluminotermički proces koji se pokazao kao tehnologija s manjim emisijama ugljičnog dioksida i boljom energetsom učinkovitosti. U potpunosti se razlikuje od korištenih metoda proizvodnje magnezija kao što su Pidgeon proces ili elektroliza. Proces je razvijen 1950. godine od strane Alcou-a te je dalje unapređen i za sada se koristi na proizvodnom nivou u NR Kini. Trenutačno je to najučinkovitiji industrijski proces dobivanja magnezija iz dolomita uz nastajanje tri vrlo vrijedna nusproizvoda te kao takav ulazi u tehnologije „nula otpada“ (eng. *zero waste*). Važno je istaknuti da je proveden i završen test s Kupreškim dolomitom na Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institut u NR Kini te je zaključeno da su ispunjeni zahtjevi za proizvodnju magnezija aluminotremičkim procesom. Proizvodnja magnezija će se provoditi kroz kalcinaciju, odvajanje magnezija i kalcija iz dolomita, aluminotermički proces i rafinaciju/pročišćavanje magnezija.

#### 4.1.1. Kalcinacija

Kalcinacijom se dolomiti, odnosno karbonati kalcija i magnezija, prevode u peći na 1150 – 1250 °C u okside (energent, ukapljeni naftni plin). Količina dolomita potrebna za ovaj stupanj je 204000

t/god. Prilikom koraka kalcinacije nastaje CO<sub>2</sub> koji se skuplja („hvata“) i pretvara u suhi led da bi se kasnije koristio u odvajanju kalcijevog od magnezijevog oksida.

#### Emisije i otpad

Za smanjivanje emisija prašine se koriste vrećasti filteri, a sakupljeni prah (oksidi kalcija i magnezija) se dalje koristi u procesima proizvodnje. U ovom koraku dolazi do tipičnih emisija u zrak izgaranjem plina. Iz skupljenog CO<sub>2</sub> od kalcinacije se proizvodi ukupno 47850 t/god. suhog leda kao nusproizvoda koji se prodaje na tržištu. Suhi led, CO<sub>2</sub> se koristi za brzo zamrzavanje hrane, transport medicinskih/farmaceutskih proizvoda, industrijsko čišćenje (pjeskarenje suhim ledom), itd. Primjenom u prehrambenoj industriji sprječava kvarenje, eliminira potrebu za vodenim ledom i produžuje rok trajanja proizvoda poput sladoleda, mesa i morskih plodova. Namjera je u budućnosti, kada tehnologija postane dostupna, prevesti sve na električnu energiju.

#### 4.1.2. Odvajanje kalcija od magnezija

Odvajanje kalcija od magnezija se provodi tako da se oksidi kalcija i magnezija dodaju u vodu te oni prelaze u hidrokside. Nakon toga se dodaje CO<sub>2</sub> iz prethodnog procesa kalcinacije te tu dolazi do onog glavnog dijela prilikom kojeg se može odvojiti kalcij od magnezija. U tom koraku precipitacijom nastaje precipitirani kalcijev karbonat (PCC) koji je netopiv u vodi te se taloži na dnu, a s druge strane dobiva se magnezijev hidrogenkarbonat koji ostaje u otopini. Filtracijom se odvaja vrlo čisti kalcijev karbonat koji ide dalje na sušenje dok otopina ide na pirolizu gdje se tekućina zasićuje zagrijavanjem na 80-90 °C. Isparavanjem se taloži kristalinični magnezijev karbonat te se kristali suše. Daljnjim zagrijavanjem kristala uz odvajanje CO<sub>2</sub> (koji se skuplja) nastaje magnezijev oksid potreban za slijedeći korak. Za ovaj korak se koristi električna energija.

#### Emisije i otpad

Sva prašina koja se skuplja pomoću filter vreća prilikom odvajanja se može koristiti ponovo u samom procesu.

Voda koja se koristi u procesu se recirkulira, odnosno koristiti će se zatvorena petlja, te do jedinog gubitka od cca. 10% dolazi uslijed isparavanja i sušenja nakon filtracija što iznosi 180.000 m<sup>3</sup> godišnje što nije zanemariva količina. Za potrebe vode planira se izgradnja nadzemne ili podzemne vodospreme koja će se puniti oborinskim vodama, a zapremine spremnika bi trebala pokriti potrebe za rad od 3 mjeseca. U slučaju dodatne potrebe bi se koristili dodatni izvor koji je u potpunosti odvojen od općinskog vodovoda.

Prilikom odvajanja kao nusproizvod nastaje i vrlo vrijedan precipitirani kalcijev karbonat PCC 106.000 t/god. koji će se dalje prodavati. Svoju primjenu nalazi kao punilo ili pigment u papiru, plastici, bojama, farmaceutskim proizvodima i gumama za poboljšanje učinkovitosti.

U ovom koraku ne dolazi do nastajanja otpada.

#### 4.1.3. Aluminotermički proces

Aluminotermički proces redukcije je glavni korak prilikom proizvodnje magnezija i koristi električnu energiju. Magnezijev oksid dobiven odvajanjem se miješa u kugličnom mlinu s aluminijskim granulama te se dalje peletira. Količina aluminija potrebna za ovaj dio procesa iznosi 12.900 t/god. Nadalje, aluminij kao redukcijsko sredstvo jednim djelom može biti otpadni iz drugih industrija što u konačnici doprinosi smanjenju ugljičnog otiska. Pelet se stavlja u peć na temperaturu 1000 – 1050 °C pod vakuumom te dolazi do redukcije, odnosno dobivanja magnezija na vrhu peći čistoće 94 – 96 % tkz. krunskog magnezija kao rezultat iznimne čistoće dolomita iz eksploatacijskog polja Grguljača. Na dnu peći kao proizvod nastaje aluminij - magnezij spinel u količini od 35.400 t/god.

##### Emisije i otpad

Magnezijski – aluminijski spinel (Mg–Al spinel) je vrlo važna sirovina u proizvodnji vatrostalnih materijala za industriju čelika, cementa i stakla zbog svoje otpornosti na toplinske udare i koroziju te kao takva spada u vrlo vrijedan nusproizvod koji se dalje prodaje na tržištu.

Kao i u prethodnim procesima, sva prašina koja se skuplja pomoću filter vreća se može koristiti ponovo u samom procesu.

Otpad u ovom koraku je nula.

#### 4.1.4. Rafinacije/pročišćavanja magnezija

Rafinacije/pročišćavanja magnezija se provodi s krunskim magnezijem s ciljem povećanja čistoće magnezija koja je potrebna za daljnje korištenje (proizvodnja legura i sl.). Krunski magnezij će se grijati na 720 °C te se s ciljem zaštite taline od oksidacije i pročišćavanje dodaje fluks (mješavina soli kalijevog i natrijevog klorida, KCl i NaCl). Nadalje, za miješanje metala i zaštite površine rastaljenog magnezija tijekom izlivanja ingota se koristi mješavina plina dušik N<sub>2</sub> s 1,5 % sumporov(IV) oksid SO<sub>2</sub>. Na taj način se dobiva 15000 t/god magnezija čistoće 99,9%. U ovom koraku se isto koristi električna energija.

### Emisije i otpad

Proračun SO<sub>2</sub> emisije je oko 26 tona na godinu prilikom rada tvornice u punom kapacitetu. Za uklanjanje plina SO<sub>2</sub> će se koristiti tehnologija ispiranja plina (eng. *scrubber*) koja može biti mokra ili suha. Današnji scrubber postižu 99,7% uklanjanja SO<sub>2</sub> uz nastajanje nusproizvoda kao što su sulfatna kiselina ili gips odnosno kalcij sulfat koji se mogu dalje plasirati na tržište.

Jedini otpad, troska, koji imamo u svim procesima nastaje u zadnjem koraku rafinacije. Troska nastaje od korištenja fluksa te se sastoji od natrijevih i kalijevih soli, a predviđa se količina od 1000 – 1500 t/god. Nastala troska će se redovito predavati oporabitelju na postupak oporabe. Oporaba se odvija tako da se iz troska prvo uklanjaju natrijev i kalijev klorid, a ostatak bogat magnezij i aluminij oksidom se dalje koristi u koristiti u proizvodnji.

Na navedene načine i u ovom koraku imamo zanemarive količine emisija te nema ni otpada.

Napomena, sol NaCl, poznata je kao kuhinjska sol, koju koristimo svakodnevno, a sol KCl kao aditiv za hranu, prvenstveno kao zamjena za sol kako bi se smanjio sadržaj natrija, a istovremeno dao slani okus. Obično se nalazi u prerađenoj hrani, uključujući grickalice (čips), juhe, umake, sir, prerađeno meso, žitarice i sportska pića.

## 4.2. Potrebe za vodom

S obzirom na prosječnu potrebnu **protočnu rezervu ~7–10 l/s** (uz sigurnosni koeficijent), te planirane mjere zatvorenih krugova i višekratne uporabe vode u separaciji/pranju, **vodoopskrba izvan javnog sustava je tehnički izvediva**, uz uvjet realizacije preporučenih hidrogeoloških istraživanja, mjerenja minimalnih istjecanja po izvoru, te projektiranja vlastitih vodosprema, crpnih stanica i mreže industrijske vode (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025).

Tablica 5 prikazuje pregled ukupnih potreba za vodom prema različitim kategorijama potrošnje u planiranoj tvornici magnezija. Najveći udio čini tehnološka odnosno procesna voda, s prosječnom dnevnom potrošnjom od oko 600 m<sup>3</sup>, što je izvedeno iz godišnje potrebe od 180.000 m<sup>3</sup> na temelju oko 300 radnih dana. Sanitarna i pitka voda za radnike iznosi dodatnih 15 m<sup>3</sup> dnevno u prosjeku, dok maksimalna dnevna potrošnja iznosi 22,5 m<sup>3</sup>, temeljeno na broju radnika (300) i normativu od 50 L po radniku dnevno te koeficijentu dnevne neravnomjernosti od 1,5. Godišnje to predstavlja približno 4.500 m<sup>3</sup> potrošnje. Protupožarna voda nije redovna potrošnja već čini stalnu rezervu od 36 m<sup>3</sup>, potrebnu za rad hidrantske mreže (procijenjena na protok od 5 L/s tijekom 2 sata). Zbrajanjem svih kategorija, ukupna dnevna potreba tvornice, bez uključanja

protupožarne rezerve, iznosi oko 815 m<sup>3</sup> u prosjeku, a oko 822,5 m<sup>3</sup> u uvjetima maksimalne sanitarne potrošnje, dok godišnja prosječna potrošnja iznosi približno 184.500 m<sup>3</sup>

Tablica 5. Sažetak potreba za vodom planirane tvornice magnezija

Kategorija vode	Jedinica	Potreba (prosjeak)	Potreba (maks.)	Napomena
<b>Tehnološka (procesna) voda</b>	m <sup>3</sup> /dan	<b>600</b>	–	Izvedeno iz 180.000 m <sup>3</sup> /god uz ~300 radnih dana
	m <sup>3</sup> /god	<b>180.000</b>	–	Godišnja potreba prema planiranoj proizvodnji Mg
<b>Sanitarna/pitka voda (radnici)</b>	m <sup>3</sup> /dan	<b>15</b>	<b>22,5</b>	300 radnika × 50 L/dan; Kd=1,5 za maksimalnu dnevnu
	m <sup>3</sup> /god	<b>≈ 4.500</b>	–	Okvirno, za 300 radnih dana (15 × 300); Stručna analiza daje dnevne vrijednosti
<b>Protupožarna voda (hidrantska rezerva)</b>	m <sup>3</sup> (rezerva)	<b>36</b>	36	Rezervni volumen (5 L/s kroz 2 h); nije redovna potrošnja
<b>UKUPNO (bez protupožarne rezerve)</b>	m <sup>3</sup> /dan	<b>≈ 615</b>	<b>≈ 622,5</b>	Prosjeak = 600+15; Maks. = 600+22,5
<b>UKUPNO (bez protupožarne rezerve)</b>	m <sup>3</sup> /god	<b>≈ 184.500</b>	–	180.000 + ~4.500 (sanitarno, okvirno za 300 dana)

Tablica 6 prikazuje mogućnosti korištenja kišnice kao dopunskog izvora vode. Jedini kvantificirani doprinos odnosi se na krovne površine objekata od oko 20.000 m<sup>2</sup>. Uzimajući u obzir godišnje oborine od 1.000 L/m<sup>2</sup> i koeficijent otjecanja od 0,9, procijenjena količina prikupljene kišnice iznosi 18.000 m<sup>3</sup> godišnje, što pokriva oko 9,75 % ukupnih potreba tvornice. Za prometne i manipulativne površine u stručnoj analizi je navedeno da će se oborinska voda također prikupljati, no izračun nije proveden pa nije dostupan numerički podatak. Time je ukupna "sigurno dokaziva" količina kišnice ograničena samo na prinos s krovova. Budući da ukupne godišnje potrebe iznose 184.500 m<sup>3</sup>, preostalih približno 166.500 m<sup>3</sup> (oko 90,25 %) mora biti osigurano iz nekog drugog izvora, potencijalno bušotine, što potvrđuje da kišnica može djelovati samo kao sekundarni, pomoćni izvor vodoopskrbe.

Tablica 6. Procijenjene količine vode iz oborina (kišnice).

Izvor oborinske vode	Površina	Usvojene oborine	Koef. otjecanja	Procijenjena količina	Udio u potrebama tvornice	Napomena
Krovne površine objekata	~20.000 m <sup>2</sup>	1.000 l/m <sup>2</sup> /god	0,9	18.000 m <sup>3</sup> /god	≈ 9,75 %	Jedina količina <b>numerički izračunata u studiji</b>
Prometnice i manipulativne površine	nije navedeno	–	–	<b>nije kvantificirano</b>	–	U studiji navedeno da će se prikupljati, ali <b>bez proračuna</b>
<b>UKUPNO iz kišnice (sigurno dokazano)</b>	–	–	–	18.000 m <sup>3</sup> /god	≈ 9,75 %	Temelji se isključivo na krovovima
<b>Preostale potrebe (iz izvora/bušotina)</b>	–	–	–	≈ 166.500 m <sup>3</sup> /god	≈ 90,25 %	Izvedeno iz ukupne potrebe 184.500 m <sup>3</sup> /god

Tablica 7 daje pregled potrebne izdašnosti potencijalnog zdenca za tri scenarija vodne opskrbe. U prosječnim uvjetima, uz doprinos kišnice i redovitu sanitarnu potrošnju, iz zdenca je potrebno osigurati oko 755 m<sup>3</sup> dnevno, što odgovara izdašnosti od približno 8,74 L/s. U konzervativnijem scenariju, koji uzima u obzir maksimalnu sanitarnu potrošnju od 22,5 m<sup>3</sup>/dan, potrebna količina blago raste na 762,5 m<sup>3</sup> dnevno ili 8,82 L/s. Najzahtjevniji scenarij predviđa uvjete u kojima nije dostupan doprinos kišnice pa zdenac mora pokriti punu dnevnu potrošnju od oko 815 m<sup>3</sup>, što zahtijeva izdašnost od približno 9,43 L/s. Kao projektni kriterij predlaže se izdašnost od 18 L/s, što

uključuje sigurnosnu rezervu i kompenzaciju za sezonske oscilacije u dostupnosti podzemne vode.

*Tablica 7. Procjena potrebne izdašnosti zdenca/izvora za potrebe postrojenja za proizvodnju magnezija.*

<b>Scenarij opskrbe</b>	<b>Dnevna količina iz zdenca (m<sup>3</sup>/dan)</b>	<b>Godišnja količina (m<sup>3</sup>/god)</b>	<b>Potrebna izdašnost (l/s)</b>	<b>Napomena</b>
<b>Prosječni uvjeti (uz kišnicu s krovova)</b>	<b>755</b>	<b>≈ 222.000</b>	<b>≈ 8,74</b>	Kišnica pokriva ~18.000 m <sup>3</sup> /god; sanitarno 15 m <sup>3</sup> /dan
<b>Konzervativno (maks. sanitarna potrošnja)</b>	<b>762,5</b>	<b>≈ 224.250</b>	<b>≈ 8,82</b>	Uključuje max. sanitarnu dnevnu potrošnju (22,5 m <sup>3</sup> /dan)
<b>Najgori slučaj (bez doprinosa kišnice)</b>	<b>815</b>	<b>≈ 244.500</b>	<b>≈ 9,43</b>	Zdenac pokriva 100% potreba u sušnom razdoblju
<b>Preporučena projektna izdašnost</b>	–	–	<b>= 18 l/s</b>	Sigurnosna rezerva i sezonske oscilacije (projektni kriterij)

Sve tri tablice zajedno daju cjelovitu sliku vodnih potreba planirane tvornice magnezija. Tehnološka potrošnja uvjerljivo dominira sustavom, dok sanitarna potrošnja i protupožarna rezerva čine znatno manji dio ukupnog opterećenja. Kišnica može osigurati tek ograničen doprinos, manje od 10 % ukupnih potreba, i to isključivo s krovnih površina, budući da ostali prinosi nisu kvantificirani. Stoga se najveći dio vodoopskrbe mora osigurati na drugi način. Procjene potrebne izdašnosti u različitim scenarijima pokazuju da bi minimalna operativna izdašnost trebala iznositi oko 9–10 l/s, dok se u projektiranju preporučuje primjena povećane vrijednosti od 18-20 l/s kako bi se postigla sigurnost u radu i otpornost sustava na sušna razdoblja i promjenjive hidrogeološke uvjete. Važno je napomenuti da Postrojenje mora imati osigurani vlastiti sustav vodoopskrbe koja se ne spaja niti na bilo koji način utječe na vodoopskrbu Općine Kupres.

## 5. ENERGETSKE KARAKTERISTIKE PLANIRANOG POSTROJENJA ZA PROIZVODNJU MAGNEZIJA KUPRES

Ovo poglavlje sintetizira dostupne tehničke i okolišne podatke o aluminotermičkom procesu na bazi dolomita s razdvajanjem Ca–Mg i hvatanjem CO<sub>2</sub> iz kalcinacije. Cilj je dati pregled ulaza/izlaza po 1 kg gotovog proizvoda (Mg ingot), izračunati reprezentativne vrijednosti potrošnje energije, učinkovitosti i emisija, te provjeriti koherenciju masenih i energetskih tokova na razini planiranog postrojenja kapaciteta 15 000 t/god uz rad 300 dana/god (3 smjene). Uključena je i procjena potreba za vodom i električnom energijom te mogućnosti njihovog osiguranja (neovisno o javnoj vodoopskrbi i uz potencijal krovnih FV sustava), kao i pregled tržišne upotrebljivosti i specifikacija ključnih koprodukata (Mg–Al spinel, PCC, tekući/suhi CO<sub>2</sub>).

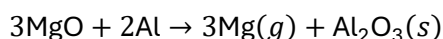
### 5.1. Tehnološki opis i maseno-energetske osnove

#### 5.1.1. Shema procesa i ključne faze

U planiranom postrojenju tehnološki slijed obuhvaća kalcinaciju dolomita, separaciju Ca/Mg uz upotrebu uhvaćenog CO<sub>2</sub> (karbonizacija Ca, piroliza i pečenje Mg međuprodukata), aluminotermijsku redukciju MgO u vakuumu/inertnoj atmosferi, kondenzaciju i rafiniranje Mg, te organiziranu proizvodnju i plasman nusproizvoda (PCC, suhi led/tekući CO<sub>2</sub>, Mg–Al spinel; u nekim varijantama i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Postrojenje je zamišljeno kao „elektrificirana“ varijanta u kojoj se toplina, osim u zoni kalcinacije (LPG plamenik), pretežno osigurava električnom energijom, a CO<sub>2</sub> iz kalcinacije sustavno hvata i koristi u separaciji Ca–Mg i/ili za proizvodnju tekućeg/suhog CO<sub>2</sub>. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025).

Separacija Ca–Mg temelji se na stvaranju CaCO<sub>3</sub> (netopljiv, taloži) i Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (topljiv, ostaje u otopini), nakon čega slijede filtracija i pranje PCC-a te piroliza i pečenje Mg međuprodukata radi dobivanja čistog MgO za redukciju. Ovaj pristup odmiče od klasičnog Pidgeon-a (dolime + FeSi), stvarajući vrijedne koprodukte i minimalizirajući otpad. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025, Ca–Mg separation – tehnološka podloga (karbonizacija, piroliza, pečenje Mg međuprodukata))

Aluminotermijska redukcija općenito se opisuje reakcijom:



U praksi MgO i Al (čisti ili iz recikliranog otpada) se homogeniziraju, briketiraju i obrađuju u peći ~1 150 °C, pri čemu aluminij preuzima kisik iz MgO-a, a oslobođene Mg pare iz kondenzatora daju krunski Mg. Velik dio topline osigurava sama egzotermna reakcija, čime opada vanjska potrošnja energije. (JOM, 2016; US 3,782,922, 1974, US 4,478,637, 1984).

### 5.1.2. Materijalna bilanca po 1 t i po 1 kg Mg

Za industrijsku konfiguraciju na dolomitu, tipična bilanca ulaza/izlaza po 1 t Mg uključuje ~13,6 t dolomita prije kalcinacije, ~0,86 t Al, ~0,03 t rafinacijskog fluksa te proizvodnju ~1,00 t Mg, ~2,36 t Mg–Al spinela, ~7,88 t PCC i ~3,19 t CO<sub>2</sub> (koji se hvata i dalje koristi). Ove vrijednosti zatvaraju materijalnu bilancu 14,49/14,43 t, a razliku čini troska u iznosu od 0.06 t. Skalirano na 1 kg Mg to odgovara: 13,6 kg dolomita, 0,86 kg Al, 0,03 kg fluksa, uz 2,36 kg spinela, 7,88 kg PCC i 3,19 kg CO<sub>2</sub> (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025).

Za vode, industrijska potrošnja je 12 t vode po 1 t Mg (≈ 12 l/kg), uz zatvorene krugove, ponovno korištenje procesnih voda i gubitke uglavnom isparavanjem. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)

### 5.1.3. Energetska bilanca po 1 t i po 1 kg Mg

Na industrijskoj razini ukupna godišnja električna potrošnja postrojenja kapaciteta 15 000 t/god iznosi ~226,3 GWh/god, što odgovara ~15 090 kWh/t Mg (≈ 15,1 kWh/kg). Potrošnja je raspodijeljena na separaciju Ca–Mg, redukciju, rafiniranje i pomoćni pogon. Kalcinacija zahtijeva plin (LPG/NG); za usporedivost s ranijim tablicama može se koristiti ~918 m<sup>3</sup> NG/t Mg kao referentna toplinska potrošnja za kalcinaciju (≈ 9 180 kWh/t, odnosno ≈ 9,2 kWh/kg) ili energetski ekvivalentna količina LPG-a (Fu et al., 2012, Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025).

Na razini 1 kg Mg, tipična **direktna** energija time je redom veličine **~24–25 kWh/kg** (≈ 15 kWh/kg električne + ≈ 9.2 kWh/kg toplinske energije iz plina), pri čemu se dio toplinskih potreba u redukciji pokriva egzotermnošću reakcije. U LCA (eng. Life Cycle Assessment) smislu, najveća varijabilnost proizlazi iz podrijetla i načina alokacije emisija za **Al reducent** (primarni vs. sekundarni Al) te iz **emisijskog faktora mrežne električne energije** (DLR, 2023; TECH MAGNESIUM, 2024).

## 5.2. Izračun potrošnje energije i emisija po 1 kg Mg

### 5.2.1. Metodologija

Za orijentacijski izračun koherentan s planiranom tehnologijom koristimo:

- Direktne procesne energije iz projektne i studijske dokumentacije (električna potrošnja po fazama; toplina za kalcinaciju), skalirane na 1 kg Mg. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)

- Emisijske faktore po tokovima, s naglaskom na osjetljivost: (i) plin (CO<sub>2</sub>-eq po m<sup>3</sup>), (ii) električna energija (CO<sub>2</sub>-eq po kWh; ovisno o miksu dobavljača), (iii) Al reducent (primarni vs. reciklirani), te (iv) mogućnost alokacije dijela opterećenja na koprodukte (PCC, CO<sub>2</sub>, AL-Mg spinel). Kao referencu za integrirani rezultat uzimamo nezavisnu **DLR** procjenu CO<sub>2</sub>-eq učinka aluminotermijskog lanca (DLR, 2023)

### 5.2.1. Energetski izračun (po kg)

- **Električna energija:** 226 296 000 kWh/god ÷ 15 000 t/god = **15 086 kWh/t** ≈ **15,09 kWh/kg** (raspored: separacija ~10,2 MWh/t, redukcija ~5,7 MWh/t, rafiniranje ~1,1 MWh/t, pomoćni ~2,0 MWh/t; preklapanja i rekuperacije ovise o detaljnoj shemi rada). (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)
- **Plin za kalcinaciju:** referentnih **~918 m<sup>3</sup>/t NG** ≈ **9,18 kWh/kg** (uz LHV ≈ 10 kWh/m<sup>3</sup>); u slučaju LPG-a koristi se energetski ekvivalent (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)

Zbrojeno: **E<sub>total</sub> ≈ 24,3 kWh/kg Mg** (bez utjelovljene energije u Al; egzotermnost redukcije smanjuje vanjske potrebe grijanja u reducirnoj zoni) (JOM, 2016)

### 5.2.2. Emisijski izračun – ilustrativni scenariji

Polazimo od istih tokova te promatramo tri scenarija za ključne faktore:

1. **Konzervativni (fosilna struja, primarni Al)** – mrežni faktor 0,4 kg CO<sub>2</sub>/kWh; Al 9,4 kg CO<sub>2</sub>/kg; NG 2,2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.
2. **Mješoviti (niski ugljik na mreži, dio sekundarnog Al)** – mrežni faktor 0,1 kg CO<sub>2</sub>/kWh; Al 4,0 kg CO<sub>2</sub>/kg; NG 2,2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.
3. **Optimizirani (niskougljična mreža, sekundarni Al, alokacija na koprodukte)** – mrežni faktor 0,05 kg CO<sub>2</sub>/kWh; Al 1,0 kg CO<sub>2</sub>/kg; NG 2,0 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> + LCA alokacija na PCC/CO<sub>2</sub>/Al-Mg spinel.

**Plin (kalcinacija):** 0,918 m<sup>3</sup>/kg × 2,2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> = **2,02 kg CO<sub>2</sub>/kg** (sc. 1–2), odnosno ~1,84 kg (sc.3 s 2,0 kg/m<sup>3</sup>).

**Električna energija:** 15,09 kWh/kg × {0,4; 0,1; 0,05} = **6,0; 1,5; 0,75 kg CO<sub>2</sub>/kg.**

**Al reducent:** 0,86 kg Al/kg Mg × {9,4; 4,0; 1,0} = **8,08; 3,44; 0,86 kg CO<sub>2</sub>/kg.**

### 5.3. Koprodukti, kvaliteta i tržišna valorizacija

**Mg–Al spinel** (npr. 35/65) je stabilan, inertan i komercijalno tražen refraktarni materijal; TDS podaci upućuju na granulacije i svojstva pogodna za vatrostalne obloge, keramiku i abrazive. U ATR konfiguraciji spinel se dobiva bez kontaminanata karakterističnih za silicijotermijske troske, što pogoduje plasmanu i valorizaciji (Mg–Al Spinel 35/65 – TDS, 2024, JOM, 2016)

**PCC (precipitirani CaCO<sub>3</sub>)** – visoko-čist proizvod dobiven korištenjem vlastitog CO<sub>2</sub> iz kalcinacije i karbonatizacije Ca(OH)<sub>2</sub>. Tipične specifikacije (svjetlina, gustoća, veličina čestica) čine ga pogodnim za plastiku, gumu, punila i premaze (PCC – TDS (2024), FU et al., 2012).

**Tekući/suhi CO<sub>2</sub>** – organizirano hvatanje i ukapljivanje/sublimacija omogućuju plasman u prehrambeni i logistički sektor (hlađenje, suhi led). Godišnja proizvodnja od ~47 850 t CO<sub>2</sub> (~ 3,19 t/t Mg) kvantitativno je usklađena s masenom bilancom procesa. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025).

Ekonomika koprodukata je ključna za nultootpadni koncept: prihod od PCC i spinela rasterećuje LCA alokacije te snižava neto CO<sub>2</sub>-eq primarnog Mg, što potvrđuju i nezavisne tehničko-ekonomske revizije. (DMT/TÜV Nord Audit Report, 2023; TECH MAGNESIUM, 2024).

### 5.4. Usporedba s Pidgeon i elektrolitičkim postupkom

Usporedne studije pokazuju da aluminotermički proces ima znatno niže specifične energije i emisije od Pidgeon-a te konkurira elektrolizi, posebno kada se u obzir uzmu koprodukti i elektrifikacija procesa. Pidgeon tipično troši ~60–80 kWh/kg (uključujući energiju ugrađenu u FeSi i gubitke), uz CO<sub>2</sub> intenzitete reda ~20–25 kg/kg Mg; elektroliza na modernim ćelijama postiže ~12–18 kWh/kg električne energije i emisije koje snažno ovise o izvoru struje (~10–18 kg/kg, uz čistu struju i manje). Na temelju inventara procesa i energetske bilanci, izravna procesna energija aluminotermijskog lanca (bez utjelovljene energije reduktanta Al) iznosi reda veličine ~15 kWh/kg Mg električne energije plus toplina kalcinacije iz plina (~0.8 m<sup>3</sup>/kg u DLR inventaru), dok DLR procjena za planirani lanac daje ~8.3 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg Mg (cradle-to-gate, bez alokacije koprodukata). Napredne aluminotermijske izvedbe, prema industrijskim izvješćima i nezavisnim procjenama, pokazuju ~24–40 kWh/kg direktne energije i ≥ 60 % niži CO<sub>2</sub>-eq od Pidgeon referenta (FU et al., 2012, JOM, 2016; TECH MAGNESIUM, 2024). DLR pokazuje da se, uz alokaciju emisija

na koprodukte (PCC, CO<sub>2</sub> i Mg-Al spinel) i/ili uz korištenje sekundarnog aluminija, emisije pripisane magneziju mogu spustiti na ≈2.5 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg Mg (alokacija) odnosno do ≈1 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg Mg (sekundarni Al scenarij), što je reda veličine ≥90% niže od tipičnih Pidgeon vrijednosti, uz uvjet niskougljične opskrbe električnom energijom.

Povijesno iskustvo (MAGNETHERM, patenti 1970-ih/1980-ih) potvrđuje industrijsku izvedivost aluminotermije uz vakuumsko kondenziranje, a recentne tehnološke revizije (DMT/TÜV) na realnim uzorcima dolomita pokazuju visok stupanj zrelosti (TRL 8–9) i odličnu čistoću proizvoda (> 99,98 %) (US 3,782,922, 1974; US 4,478,637, 1984; DMT/TÜV Nord Audit Report (2023), Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025). TRL (Technology Readiness Level) označava razinu tehnološke zrelosti, odnosno stupanj razvijenosti neke tehnologije od početne ideje do potpuno dokazanog sustava u stvarnom operativnom okruženju. NASA TRL opisuje kao sustav mjerenja zrelosti tehnologije s 9 razina, a Horizon Europe koristi službene definicije TRL 1–9 u svojim General Annexes. Prema definicijama Horizon Europe, TRL 1 znači opažene osnovne principe, TRL 2 formuliran tehnološki koncept, TRL 3 eksperimentalni dokaz koncepta, TRL 4 validaciju u laboratoriju, TRL 5 validaciju u relevantnom okruženju, TRL 6 demonstraciju u relevantnom okruženju, TRL 7 demonstraciju prototipa sustava u operativnom okruženju, TRL 8 da je sustav dovršen i kvalificiran, a TRL 9 da je stvarni sustav dokazan u operativnom okruženju. Za projekt, TRL 8–9 znači da fokus više nije na ranom istraživanju ili početnom dokazivanju koncepta, nego na završavanju sustava, njegovoj kvalifikaciji i potvrdi rada u stvarnim uvjetima. TRL 8 upućuje na to da je sustav tehnički dovršen i kvalificiran, dok TRL 9 znači da je rješenje već dokazano u operativnom okruženju (HORIZON EUROPE WORK PROGRAMME 2025).

## 5.5. Infrastrukturne potrebe: voda, električna energija, plin i PV potencijal

### 5.5.1. Električna energija: godišnja potrošnja i priključna snaga

Godišnja električna potrošnja iznosi **~226,3 GWh/god**. Za rad 300 dana/god to daje prosječnu dnevnu potrošnju **~0,754 GWh/dan**, odnosno prosječnu **srednju snagu ~31–32 MW** tijekom proizvodnih dana (bez vršne dinamike po fazama). Opskrba je planirana s mreže **JP Elektroprivreda HZ HB**, pri čemu lokalna mrežna infrastruktura (110/20/10 kV) zahtijeva adekvatno dimenzioniran priključak i transformatorsku stanicu; u studiji su navedeni relevantni prijenosni pravci i postojećih ~11 MVA distribuiranih kapaciteta na području (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025). Električna energija može se ugovoriti porijeklom iz obnovljivih izvora (npr.

putem dobavljača i/ili jamstva podrijetla, odnosno bilateralne ugovore gdje su dostupni), pri čemu u široj regiji Kupresa postoje i razvijaju se projekti vjetro i solarnih elektrana.

### 5.5.2. Plin (kalcinacija)

Kalcinacija je jedina faza s izravnim plinom (LPG/NG). U referentnim tablicama bilježi se **~918 m<sup>3</sup> NG/t** ( $\approx 9,2$  kWh/kg ili  $\sim 3,3$  kg LPG/kg) (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025). Na godišnjoj razini to rezultira u konačnoj potrošnji plina od 30.294 t LPG-a. U budućnosti, ukoliko komercijalna zrelost tehnologije dozvoli (cca 5 godina), planirana je ugradnja elektroindukcijskih peći koje bi u tom slučaju eliminirale LPG i pripadajuće emisije.

### 5.5.3. Potencijal krovne fotonaponske proizvodnje

Bez geometrijskih podataka o površinama krovova i orijentaciji, moguće je dati **parametriziran** prinos: u klimatskim uvjetima Hercegbosanske županije razumna je procjena **1,0–1,4 GWh/MWp·god**. Time **10 MWp krovnih FV** može godišnje dati **~10–14 GWh**, što bi pokrilo približno **4–6 %** godišnje električne potrošnje postrojenja. Iznad toga, bilo bi nužno razmotriti tlo-montirane parkove ili ugovore o opskrbi iz OIE (PPA). Integracija FV-a je korisna za smanjenje operativnih troškova i emisija, ali **ne mijenja činjenicu** da je za tehnološku pouzdanost potreban **mrežni priključak ~30+ MW** i stabilan elektroenergetski kapacitet (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)

## 5.6. Provjera koherencije ulaza/izlaza i glavne „točke pažnje“

Materijalna bilanca (14,49 t ulaza i 14,43 t izlaza po 1 t Mg) **koherentna je** i dosljedna tokovima dolomit $\rightarrow$ PCC/CO<sub>2</sub> i Al $\rightarrow$ spinel. Godišnje, za 15 000 t Mg, to je  $\sim 204\ 000$ – $200\ 000$  t dolomita,  $\sim 12\ 900$  t Al granula (čisti ili reciklirani),  $\sim 450$  t rafinacijskog fluksa,  $\sim 35\ 400$  t spinela,  $\sim 118\ 000$  t PCC i  $\sim 47\ 850$  t CO<sub>2</sub> (tekući/suhi) (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025).

Energetska bilanca također je dosljedna: **~226,3 GWh/god** električne energije ( $\approx 15,1$  kWh/kg) i **~0,918 m<sup>3</sup> NG/kg** (ili energetski ekvivalent LPG-a) za kalcinaciju. Ove vrijednosti dobro se uklapaju u industrijske podatke i nezavisne revizije (DMT/TÜV).

U pogledu okolišnih učinaka, **DLR** procjena  $\sim 8,3$  kg CO<sub>2</sub>-eq/kg potvrđuje konkurentnost ATR-a spram Pidgeon-a. DLR pokazuje da se, uz alokaciju emisija na koprodukte (PCC, CO<sub>2</sub> i Mg-Al

spinel) i/ili uz korištenje sekundarnog aluminija, emisije pripisane magneziju mogu spustiti na **≈2.5 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg Mg (alokacija) odnosno do ≈1 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg Mg (sekundarni Al scenarij)**, što je reda veličine **≥90% niže od tipičnih Pidgeon vrijednosti**, uz uvjet niskouglične opskrbe električnom energijom. Dodatno, sustavno hvatanje i valorizacija CO<sub>2</sub> te komercijalizacija spinela i PCC-a poboljšavaju i ekonomiku i LCA raspodjele, što industrijske revizije navode kao ključnu prednost „nultootpadnog“ koncepta (DLR, 2023; TECH MAGNESIUM, 2024)

## 5.7. Kvaliteta proizvoda i operativna zrelost

Industrijski testovi na Kupreškom dolomitu potvrdili su **čistoću Mg od 99,98 %**, što je u rangu najboljih praksi. Proces je projektiran kao **visoko-elektificiran** i kompatibilan s automatizacijom „bez ljudi na podu“, uz zatvorene sustave kondenzacije kako bi se minimizirala reoksidacija i gubici Mg. Naslanja se na povijesno validirane aluminotermijske platforme (Magnetherm i sl.) i recentne demonstracije, što podržava ocjene **TRL 8–9**. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025, DMT/TÜV Nord Audit Report, 2023, US 4,478,637, 1984)

## 5.8. Sigurnost, okoliš i usklađenost s BAT načelima

Iako referentni BAT dokumenti za Mg spojeve ne obuhvaćaju izravno ATR tehnologiju (fokusirani su na MgO iz MgCl<sub>2</sub> i dolomita za sinter), načela najboljih dostupnih tehnika, elektrifikacija, hvatanje emisija, zatvoreni vodni krugovi, produktivna uporaba nusproizvoda, u potpunosti su primijenjena u ovom procesu. Razine buke, prašine i emisija iz kalcinacije upravljaju se filtrima i sustavima hvatanja CO<sub>2</sub>; opterećenja na vode smanjuju se recirkulacijama i separacijom tehnoloških i sanitarnih tokova. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)

Sigurnosno, ključne su točke kontrola egzotermne reakcije, vakuumske kondenzacije Mg pare i sprječavanje dodira Mg s kisikom/vodom; moderna rješenja kondenzatora i inertizacije te standardne protupožarne mjere u zoni rafiniranja (N<sub>2</sub> + mali udjel SO<sub>2</sub>) adresiraju karakteristične rizike Mg metalurgije. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025; JOM, 2016)

## 5.9. Sažetak računskih rezultata (per kg i per godina)

- **Materijalno** (po kg): 13,6 kg dolomita; 0,86 kg Al; 0,03 kg fluksa → 1,00 kg Mg; 2,36 kg Al-Mg spinela; 7,88 kg PCC; 3,19 kg CO<sub>2</sub> (hvatanje/valorizacija). (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)
- **Energija** (po kg): ≈ 15,1 kWh električne + ≈ 9,2 kWh toplinske (plin) = ≈ **24,3 kWh/kg** (bez utjelovljene energije u Al). (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)
- **Emisije** (po kg): ≈ **8–10 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg** (DLR referentno ≈ 8,3 kg), s osjetljivošću na izvor Al i faktor mreže. (DLR, 2023), mogu spustiti na ≈ **2.5 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg Mg (alokacija) odnosno do ≈ 1 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg Mg** (sekundarni Al scenarij)
- **Voda** (po kg): ≈ 12 l/kg; godišnje ≈ **185 600 m<sup>3</sup>** (≈ 7,2 l/s prosjek), iz vlastitog sustava vodoopskrbe (varijantna rješenja izvan javnog sustava). (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)
- **Električna energija** (godišnje): ≈ **226,3 GWh**; prosječna snaga ~**31–32 MW** tijekom proizvodnih dana. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)
- **PV krovovi: 1 MWp ≈ 1,0–1,4 GWh/god**; 10 MWp pokriva ~4–6 % godišnje potrošnje. (Studija utjecaja na okoliš, ZGI, 2025)

## 6. GEOGRAFSKE ZNAČAJKE KUPRESA

Kupres se nalazi u jugozapadnom dijelu Bosne i Hercegovine, na prostranoj krškoj visoravni poznatoj kao Kupreška visoravan. Ovo područje pripada Dinarskom orogenetskom sustavu i odlikuje se izrazito planinsko-visokogorskim karakterom. Prosječna nadmorska visina visoravni iznosi oko 1.200 m, dok okolni planinski masivi dosežu znatno veće visine, čime Kupres zauzima jedno od najviših stalno naseljenih područja u Bosni i Hercegovini.

Kupreško polje predstavlja dominantnu geomorfološku cjelinu ovog prostora. Riječ je o velikom krškom polju nastalom tektonskim i denudacijskim procesima, s relativno ravnim dnom koje je okruženo planinama poput Vitoroga, Cincara, Stožera i Raduše. Polje ima važnu ulogu u prostornoj organizaciji naselja, prometnica i poljoprivrednih aktivnosti, dok krški reljef uvjetuje specifične hidrogeografske odnose, uključujući poniranje površinskih voda i povremene poplave u nižim dijelovima polja.

Hidrološke značajke područja obilježene su nedostatkom trajnih površinskih vodotoka, što je tipično za krška područja. Oborinske vode uglavnom infiltriraju u podzemlje kroz pukotine i ponore, hraneći složene krške vodonosnike. Površinski tokovi su rijetki i uglavnom bujičnog karaktera, aktivni tijekom razdoblja intenzivnih oborina ili topljenja snijega.

Klima Kupresa ima izražene planinske značajke. Zime su duge, hladne i snježne, s čestim temperaturnim inverzijama na dnu polja, dok su ljeta kratka i svježja. Zbog svoje nadmorske visine i otvorenosti visoravni, područje je izloženo snažnim vjetrovima, što dodatno utječe na mikroklimatske uvjete i vegetacijski pokrov.

Prirodna vegetacija pretežno se sastoji od planinskih travnjaka i pašnjaka, koji su tradicionalno korišteni za stočarstvo, dok su šumske zajednice razvijenije na padinama okolnih planina. Ovakva kombinacija reljefnih, klimatskih i hidroloških obilježja čini Kupres prepoznatljivim visokokrškim krajobrazom s izraženim prirodno-geografskim identitetom.

## 7. GEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA KUPRESA

Iako se na prvi pogled može činiti da geološki okvir šireg područja Kupresa nije izravno povezan s temom proizvodnje magnezija, ovo je poglavlje ključno jer upravo geologija kontrolira sve temeljne preduvjete projekta: mineralne i kemijske značajke dolomita, prostorni položaj i kontinuitet ležišta/kamenoloma, te pojavnost i raspored izvora i vodnih tijela na terenu. Litološki sastav, stratigrafski položaj, tektonska razlomljenost i dijagenetska povijest stijena uvjetuju i kvalitetu sirovine (odnos Ca–Mg i čistoću), ali i hidrogeološko ponašanje krša (infiltraciju, tok i istjecanje podzemnih voda). Zbog toga razumijevanje geološke građe nije „pozadinska“ informacija, nego osnova za interpretaciju i industrijske pogodnosti dolomita i okolišne osjetljivosti područja.

U području jugozapadne Bosne i Hercegovine, u gorskim i planinskim područjima, na površini i u dubljim geološkim strukturama, velike volumene zauzimaju karbonatne stijene srednje i gornjotrijaske starosti. Najčešće su to dolomiti, relativno male taložne, no značajne dijagenetske i pukotinske poroznosti (PAVIČIĆ, 2018). Ovisno o njihovom strukturnom položaju i dubini na kojoj se nalaze, te stijene mogu sadržavati ugljikovodike, geotermalnu i/ili podzemnu vodu te se koristiti kao tehničko-građevni kamen za različite namjene. U većini slučajeva, dolomiti su tektonski razlomljeni te dominira pukotinska poroznost. Mjestimično su ti dolomiti tektonski zdrobljeni do klasta dimenzija pijeska i praha (PAVIČIĆ, 2018). Osim srednje i gornjotrijaskih dolomita u geološkoj građi šireg područja Kupresa sudjeluju magmatske i sedimentne stijene raspona od permotrijasa do kvartara. Njihov kratki opis biti će prikazan na temelju opisa Osnovne geološke karte mjerila 1:100.000 listovi Livno i Bugojno te pripadajućih tumača (PAPEŠ 1967, PAPEŠ, 1972; VUJNOVIĆ et al., 1980, VUJNOVIĆ, 1975).

### 7.1. Geološke značajke područja Kupresa

#### Permotrijaske naslage - PT

Kod sela Kukavica, jugoistočno od Kupresa utvrđeno je na maloj površini nekoliko izdanaka šupljikavih i brečastih vapnenaca. Uz te vapnence otkriven je i izdanak gipsa. Odnos ovih stijena prema trijaskim tvorevinama koje izgrađuju ovo područje nije jasan, jer su kontakti pokriveni. Gips je sitnozrne homogene strukture s veličinom zrna oko 0,2 mm. Tekstura je primarno trakasta. Mjestimično se zapaža prelaz u zrnastu strukturu zbog hidratacije.

## Donjotrijaske klastične naslage – T<sub>1</sub>

Donjotrijaski sedimenti izgrađuju veći dio terena u području planine Stožer i u području između Škrte i Raduše planine. Manji izdanci otkriveni su i u dolini Šujice. U području Stožera i Škrte planine izdanjuju u tjemenu erodiranih antiklinala, a kod Šujice su izbile na površinu tektonski uz jaku dislokaciju. Donjotrijaske stijene predstavljene su tzv. Sajskim i Kampilskim naslagama. Sajske naslage su izgrađene od crvenkastih, smeđih, ljubičastih i zelenkasto-sivih pješčenjaka i kvarcnih škriljavaca s muskovitom. Sve ove stijene su vrlo dobro uslojene. Obzirom na vezivo u preparatima je utvrđeno nekoliko vrsta pješčenjaka. Najčešći su pješčenjaci s karbonatnim vezivom (kalkareniti), zatim dolaze željezoviti, pa pješčenjaci s kalcijsko-limonitskim vezivom i pješčenjaci sa silicijsko-sericitskim cementom. Kampilske naslage u području Stožera, Pršljenice i Mračaja izgrađuju tamnosivi i sivi, ponegdje žuto-sivi i plavičasti lapori, glinoviti vapnenci i pjeskoviti lapori i lapori. Vrlo su lijepo uslojeni. Debljina slojeva varira najčešće od 5 do 20 cm.

## Srednje trijaski vapnenci i dolomiti – T<sub>2</sub>

Anizik je zastupljen slojevitim i masivnim, svijetlosivim mjestimično mramoriziranim i dijagenetski izmijenjenim vapnencima, karbonatnim brečama, a sporedno dolaze dolomiti. Sedimentološkim ispitivanjima determinirani su kao: mikrospariti, pseudospariti, pjeskoviti mikro i pseudospariti, intraspariti, intrapelmikriti i mikriti. Odnos prema starijim - donjotrijaskim sedimentima je kontinuiran, osim u intenzivno tektonski poremećenim dijelovima terena. U gornjem dijelu srednjeg trijasa (ladinik) izdvojeni su pločasti i slojeviti vapnenci sa uklopcima rožnjaka, tufova, tufitičnih breča i glinenaca. U petrografskim preparatima utvrđena je osim dolomita i dolomitičnih i inkristalastih vapnenaca, skriljava silicijska laporovita stijena koja obiluje ostacima skeleta silicijskih mikroorganizama (radiolarijama). Osnovna masa je izgrađena od intimne smjese pelitskih čestica kalcita, gline i organske supstance.

## Dijabazi, doleriti i gabri - vββ

Ove stijene se masovno pojavljuju u permotrijaskim i donjotrijaskim sedimentima u vidu silova i dajkova najčešće dekametarskih razmjera. Uz njih registrirane su i mnoge mineraloške pojave željeza spekularkog sastava i milimetarske žilice azbesta. Po strukturi, to su izrazito ofitske stijene, a u mineralni sastav im ulaze bazični plagioklas, koji je često izmijenjen i s jasnim

znakovima albitizacije dok kao bojeni sastojci dolaze augit, amfibol i klorit. Među njima su veoma česti metadijabazi, tj. varijeteti u kojima su svi primarni sastojci izmijenjeni. Konstatirani su samo mali izdanci gabra unutar donjotrijaskih klastita, sjeveroistočno od sela Volari. Imaju homogenu masivnu teksturu, a struktura im je krupnozrno-ofitska. Bitni sastojci su bazični plagioklasi, augit i hornblenda.

## Efuzivne stijene ( $\eta$ )

Imaju od svih magmatita najveće rasprostranjenje. Otkrivene su na većoj površini kod sela Mračaja. Javljaju se intrastratificirane u ladiničkim sedimentima. Prema petrološkim odredbama efuzivne stijene možemo svrstati u dvije grupe: albitske efuzivne stijene i kalijske efuzive. Obe imaju iste strukturne i teksturne karakteristike. Struktura je kriptokristalna porfirska, intersertalna do hijaloofitska, a vrlo često imaju mandulastu teksturu. Međutim jasno se odvajaju po mineralnom sastavu. U grupi albitskih efuziva dolaze isključivo albiti s promjenljivom količinom stakla i mandula, a u nekima dolazi i kvarc. U zavisnosti od količine albita odnosno stakla, te prisustva kvarca određeni su spiliti, keratofiri i kvarcni keratofiri.

## Piroklastične stijene ( $\theta$ ).

Vezane su za opisane vulkanite od kojih se na terenu vrlo teško i razlikuju. Predstavljene su dosta krupnozrnatim tufovima koji idu u grupu kristalnih tufova. Među detritalnim sastojcima dolaze feldspati i kvarc, rjeđe biotit. Matriks je redovito kriptokristalast, te se teško identificira. Prema sastavu tufovi odgovaraju spilit-keratofirima, odnosno kvarc-keratofirima.

## Srednje i gornjotrijaski dolomiti i vapnenci $T_{2,3}$

Krajem srednjeg i početkom gornjeg trijasa, u ovim područjima stvaraju se tamni pločasti i slojeviti vapnenci s proslojcima lapora i pojavama pirita, što ukazuje na dublje ili reduktivne taložne okoliše. Manje su zastupljeni tamni dolomitični vapnenci, lapori i rošnjaci.

Veći dio srednje i gornjotrijaskih dolomita sačinjavaju monotone serije glavnih dolomita velike debljine. Srednjekristalasti dolomit izgrađen je pretežno od poligonalnih i romboedarskih kristala dolomita, od kojih je većina znatno zamućena kriptokristalastim inkluzijama i uklopcima.

Dolomitna breča ima sitno-brečastu strukturu. Fragmenti veličine 2–15 mm izgrađeni su od kriptokristalastog dolomita. U dolomitu ima primjesa kriptokristalastog kalcita. Cement je bistri i providni srednje- i kriptokristalasti dolomit, rjeđe kalcit.

Mikrokristalasti vapnenac dolazi u obliku proslojaka do 2 metra debljine. Struktura je mikrokristalasta. U sastavu se nalazi gusti mikrokristalasti kalcitski mulj s manjim primjesama glinovite i organske materije. Ima rijetkih romboedarskih kristala dolomita koji nisu potpuno formirani i sadrže mnogo karbonatnih inkluzija. Šupljikavi dolomitični vapnenci dolaze u gornjim dijelovima serije. Struktura im je finokristalasta. U sastavu se nalaze mikrokristalasti kalcit i finokristalasti dolomit.

Dolomiti su uvijek svijetlosivi ili na svježem presjeku malo plavičastosivi. Dobro su uslojeni. Slojevi su dosta ujednačene debljine (30–60 cm). Ne sadrže uloške vapnenaca.

Mikroskopskim analizama uzoraka s Krug planine determinirani su ovi varijeteti dolomita i dolomitskih breča: brečasti dolomit, dolomitska breča, trakasti mikrokristalasti dolomit i srednjekristalasti dolomit. Veličina fragmenata može biti do 50 mm. Osnova je izgrađena od poligonalnih, rjeđe romboedarskih zrna dolomita. Dolomitska breča izgrađena je od rijetkih detritičnih fragmenata tamnijeg mikrokristalastog dolomita s karbonatnim pigmentom. Cement u stvari predstavlja osnovnu masu stijene, jer ga ima mnogo više od fragmenata. Sastavljen je od srednjekristalastih zrna dolomita. Trakasti dolomit izgrađen je od kriptokristalastog dolomita koji je grupiran u vidu traka debljine 2–3 mm. Između ovih tamnih traka nalazi se finokristalasti dolomit u obliku traka debelih 0,05 mm. Ovaj dolomit je providan i bistar. Oblik zrna je nepravilan, rijetko poligonalan. Sadržaj dolomita je 99,5 %, a netopivog ostatka 0,5 %. Mikrokristalasti dolomit izgrađen je od finih kristala dolomita. Sadržaj dolomita je oko 98 %, a netopivi ostatak do 2%. Srednjekristalasti dolomit izgrađuju nepravilna ili rjeđe poligonalna i romboedarska zrna dolomita. Zrna su obično mutna. Debljina otkrivenog dijela gornjotrijaskih dolomita iznosi oko 800 metara. Kako im podina nije otkrivena, ne može se utvrditi čitava njihova debljina.

## Vapnenci i dolomiti donje i srednje jure (J<sub>1,2</sub>)

Nerasčlanjeni sedimenti donje i srednje jure zastupljeni su na malim prostorima u području sela Vodice i kod izvora Plive. Izgrađeni su od sivih i svijetlosivih pločastih i slojevitih organogeno-detritičnih vapnenaca u kojima gotovo redovno dolazi mnoštvo drški pentakrinusa, brahiopoda, megalodusa i komadi nejasnih fosila, pretežno mekušaca. Unutar ovih, mjestimice dolaze, trosni (djeluju higroskopno) dolomiti koji u području izvora Plive apsolutno dominiraju.

## Gornjojurski vapnenci (J<sub>3</sub>)

Najveći dio jugozapadnog područja izgrađuju sprudni vapnenci malma. Zastupljeni su na sjeverozapadnim dijelovima Kupreškog polja i sjeveroistočnim dijelovima planine Vitorog, a sastavni su dio jedinice Gerzovo-Janj-Plazenica. Najčešće to su slojeviti i masivni svijetlosivi vapnenci prepuni makrofossilnim ostacima, a pripadaju alohemo-sparitskim varijetetima. Karakteristično je miješanje klipaina i elipsaktinija, uz koje se često javlja i mnoštvo velikih gastropoda.

## Kredni vapnenci (K)

Kredne naslage širom područja Bugojna i Livna predstavljene su pretežno plitkovodnim karbonatnim platformskim sedimentima, dominantno krednim vapnencima i dolomitima, često debelouslojenim, pločastim ili bankovitim, s izraženim sprudnim, oolitnim, pizolitnim, organogeno-detritičnim i mikritskim facijesima. Donjokredne naslage izgrađe su od mikro i kriptokristalastih vapnenaca, lokalno dolomitiziranih, bogatih orbitolinama, miliolidama, algama (*Salpingoporella*, *Cuneolina*) i gastropodima, dok gornja kreda sadrži hondrodontne i rudistne vapnence, te globotrunkanske mikritske vapnence s pelagičnim foraminiferama. Naslage su više puta zahvaćene transgresijama, diskordancijama i tektonskim deformacijama, što odražava dinamičku povijest Jadranske karbonatne platforme tijekom krede.

## Oligomiocenski konglomerati s kalkarenitima (Ol,M)

Konglomerate i kalkarenite koji dolaze u većem prostranstvu u području Šujice i Mokronoga, kao i manje izdanke takvih konglomerata kod Mandaka na Tušnici i kod Mandina Sela, izdvojeni su posebno zbog toga, što imaju drugačiji stratigrafski položaj od prominskih naslaga kojima su litoloski slični. Izgrađeni su pretežno od konglomerata. Kalkareniti dolaze kao ulošci. Kalcilutiti i glinoviti vapnenci su vrlo malo zastupljeni i dolaze samo u proslojcima. Ovi klastiti su znatno slabije cementirani od klastita prominskih naslaga. Znatne razlike postoje i u sastavu detritusa. Dok je u prominskim klastitima detritus pretežno izgrađen od odlomaka vapnenaca gornje krede i paleogena, detritus ovim klastitima izgrađuju vapnenci i dolomiti iz čitavog mezozoika.

## Miocen (M)

Kod Kupresa su ispod debelog kvartarnog pokrivača potoci otkrili lapore Kupreškog bazena. U Vukovskom polju sačuvan je manji erozioni ostatak neogenskih naslaga koje su istaložene na srednje i gornjotrijaskim dolomitima. Naslage Kupreškog polja su izgrađene od svijetlosivih lapora, i laporovitih vapnenaca, glina s malim proslojcima ugljena i od pješčenjaka. Iste petrografske grade su neogenski slojevi Vukovskog i Kovačevog polja.

## Kvartar (Q)

Kvartarni sedimenti u području Bugojna i Livna široko su rasprostranjeni i predstavljaju mlade, površinske, heterogene naslage nastale djelovanjem ledenjačkih, jezerskih, riječnih, bujičnih i padinskih procesa. Najzastupljeniji su morenski materijali (blokovi, šljunak, pijesak, glina), potom limnoglacialni i fluvioglacialni sedimenti u velikim poljima (Kupreško, Ravanjsko, Livanjsko, Glamočko), građeni od šljunka, pijeska, glina i lokalnih konglomerata. Aluvijalne naslage ispunjavaju doline, čine ih pijesak, šljunak, glina i mulj, dok su deluvijalne i proluvijalne naslage smještene uz padine i podnožja planina kao nesortirani materijal (blokovi, kršje, glina, pijesak). Česti su i sipari na strmim padinama (posebno Tušnica, Vran). U poljima su prisutni i jezersko-barski sedimenti, sitnozrnati muljevi, pijesci i treset, često s podzemnom vodom. Kvartarne naslage su uglavnom slabo vezane, promjenjive debljine, lokalno do 10–15 m, a u glacijalno-riječnim ispunama polja dosežu i mnogo više. One značajno oblikuju današnji reljef, kontroliraju hidrogeološke odnose, te predstavljaju važan izvor šljunka, pijeska i drugih tehničkih materijala.

## Glacijalni sedimenti (gl)

Glacijalni talozi u području Bugojna i Livna predstavljeni su prvenstveno morenskim, limnoglacialnim i glaciofluvijalnim naslagama, koje jasno odražavaju djelovanje pleistocenskih ledenjaka u visokoplaninskim zonama (Cincar, Vran, Tušnica, Osječenica). Morene se javljaju kao heterogeni, nesortirani nanosi glinenog, pjeskovitog i šljunkovitog materijala s krupnim blokovima, raspoređeni uz padine i u cirkovima, te u većim količinama oko planinskih masiva. Limnoglacialni sedimenti ispunjavaju krška polja poput Kupreškog, Ravanjskog, Livanjskog i Glamočkog, sastavljeni od glacijalno transportiranog šljunka, pijeska, mulja i lokalnih



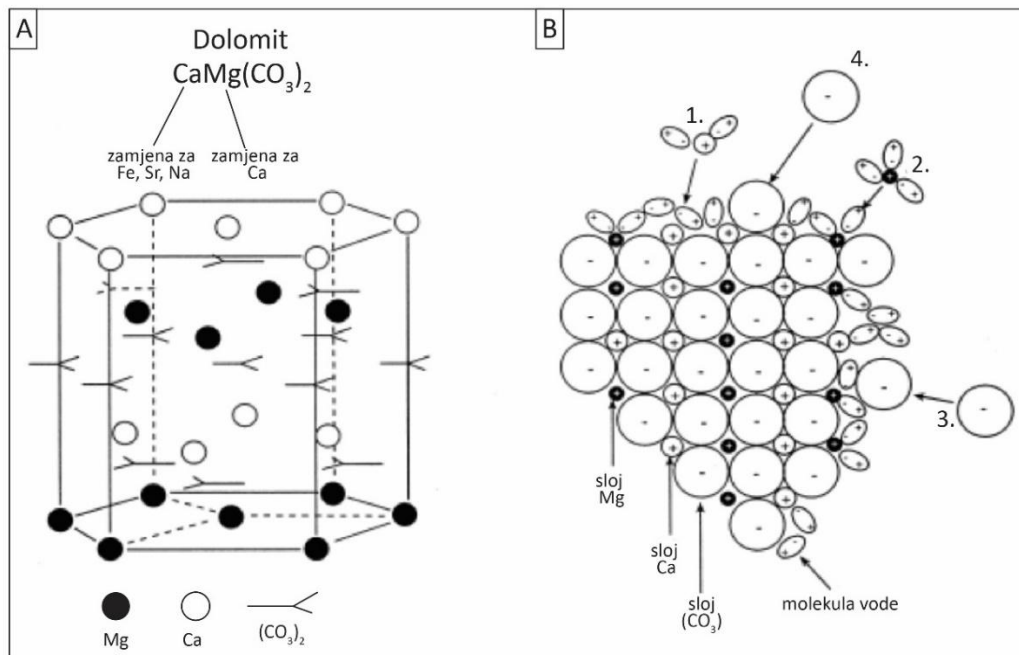
## Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija

konglomerata, često u jezersko-barskim sekvencama koje svjedoče o povremenim ledenjačko-jezerskim jezerima. Glaciofluvijalne naslage čine dobro isprani, ali i dalje heterogeni šljunkovito-pjeskoviti materijal, taložen u prostranim poljima i nizinskim dijelovima, s karakterističnim zaobljenim valuticama vapnenca i dolomita. Ove tri skupine glacijalnih taloga čine neprepoznatljiviji trag pleistocenske glacijacije u ovome dijelu Dinarida, značajno oblikujući reljef, popunjavajući depresije i stvarajući temelje današnjim hidrogeološkim sustavima.

## 7.2. Taložne i dijagenetske značajke Kupreških trijaskih dolomita

Taložne i dijagenetske značajke dolomita ovdje se opisuju zato što su upravo one presudne da srednje i gornjotrijaski dolomiti Kupresa predstavljaju pogodnu mineralnu sirovinu za proizvodnju magnezija aluminotermičkim procesom. Iako su „glavni dolomiti” vrlo rasprostranjeni u Europi i Aziji, njihov mineralni i kemijski sastav može biti značajno varijabilan, osobito u pogledu stehiometrijskog odnosa Ca i Mg te udjela nečistoća (npr. silikatnih, glinovitih i Fe-faza), što izravno utječe na tehnološku prikladnost i stabilnost procesa. Istodobno, dijageneza (rekristalizacija, dolomitizacija, cementacija i lokalno otapanje) kontrolira razvoj specifične poroznosti i propusnosti: u dolomitima se često razvija pukotinska i interkristalna poroznost koja ih čini vodonosnicima te izravno utječe na brzinu toka i izdašnost izvora. U usporedbi s vapnencima, dolomiti su u pravilu manje podložni razvoju velikih otopinskih kanala, a dijagenetske izmjene matriksa i dominacija pukotinskog toka jedan su od razloga zašto se podzemna voda u dolomitima često kreće sporije i s izraženijom ovisnošću o pukotinskim sustavima.

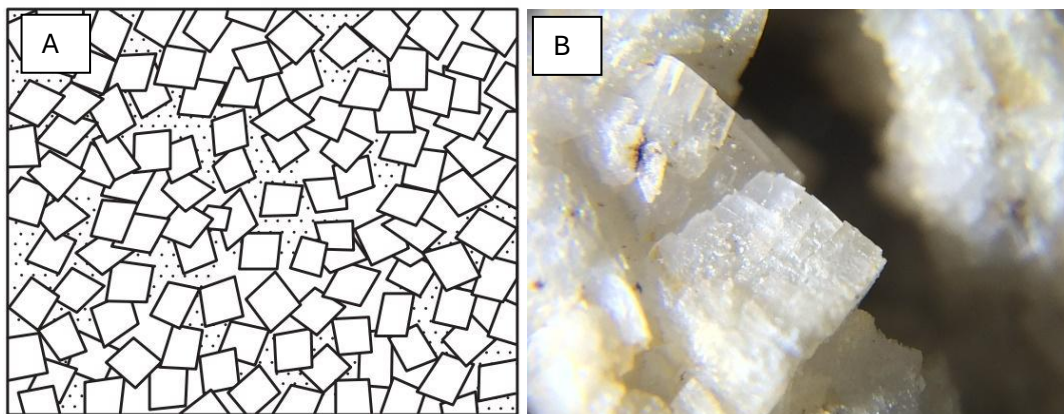
Karbonatne stijene su sedimentne stijene koje sadrže više od 50 % karbonatnih minerala, a to su uglavnom kalcit, dolomit i aragonit (SINGHAL & GUPTA, 2010). Te stijene su anionski kompleksi izgrađeni od  $(CO_3)^{2-}$  i dvovalentnog metalnog kationa kao što su  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$  i  $Cu^{2+}$  i dr. (AHR, 2008). Grupirane su u skupine na temelju kristalne strukture ili unutrašnjeg rasporeda atoma. Najčešći karbonatni minerali su kalcit ( $CaCO_3$ ) i dolomit ( $Ca,Mg(CO_3)_2$ ), a oba kristaliziraju u romboedarskoj klasi trigonskog kristalografskog sustava (Slika 3).



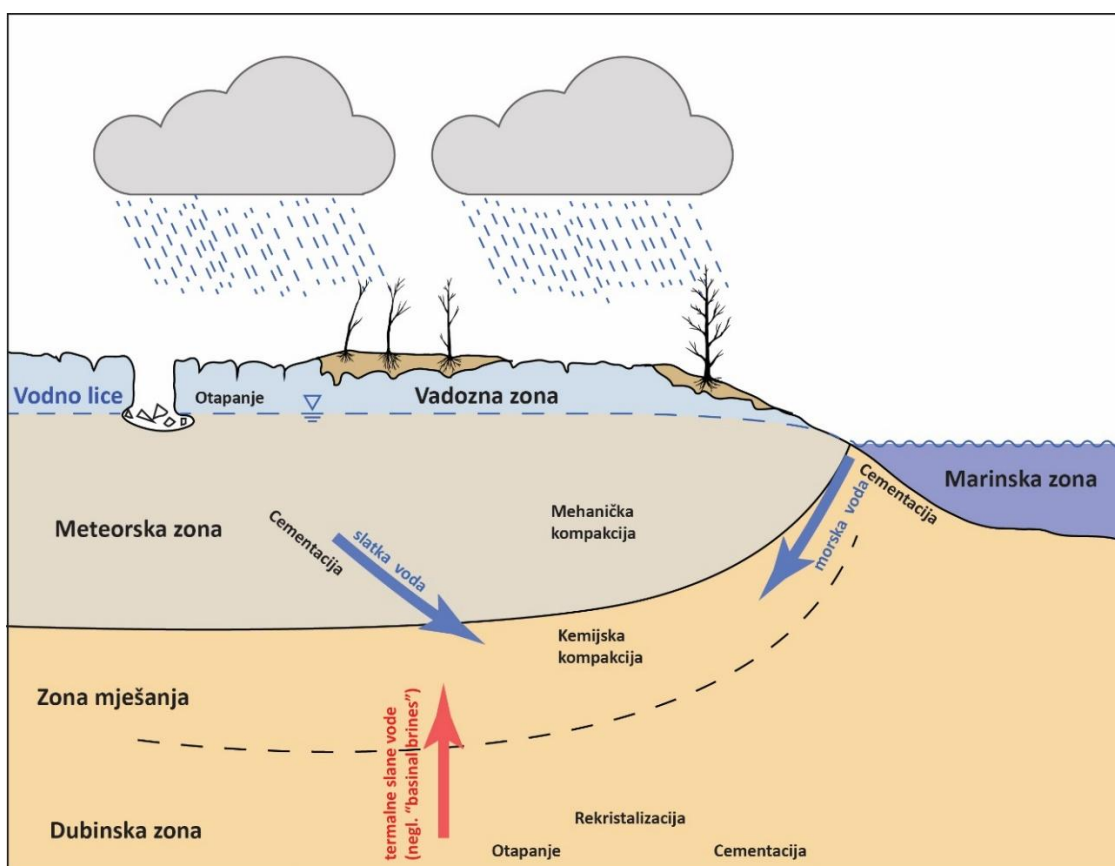
Slika 2. Dolomitna kristalna rešetka A) idealna struktura stehiometrijskog dolomita; B) Shematski prikaz realne kristalne rešetke dolomita. Molekule vode se preferencijalno vežu na površinske katione rastućeg kristala. Zato što Ca ioni nisu hidratizirani poput Mg iona, teže ugradnji u sloj Mg iona stvarajući tipičnu strukturu kalcijskog dolomita. Bezvodni  $\text{CO}_3$  ioni moraju imati dovoljnu količinu energije kako bi zamijenili molekule vode vezane na kationski sloj (LIPPMAN, 1973; GALLUCIO, 2009).

Najčešće karbonatne stijene su vapnenci (izgrađeni uglavnom od minerala kalcita, Mg-kalcita, rjeđe aragonita) i dolomiti, izgrađeni uglavnom minerala dolomita (TIŠLJAR, 1994). **Postoji cijeli raspon prijelaza iz vapnenaca u dolomite ovisno o udjelu kalcita i dolomita u ukupnom mineralnom sastavu (TIŠLJAR, 1994).** Kemijska formula dolomita,  $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$  predstavlja idealan slučaj kada se dolomit sastoji od jednakog broja iona Ca i Mg raspoređenih u zasebnim ravninama koje su razdvojene ravninama iona  $\text{CO}_3^{2-}$  (slika 2). U prirodi takvi su slučajevi rijetki, odnosno postoji suvišak jednog od iona uz moguće primjese i drugih iona, npr. željezo. No manji ionski radijus magnezija u odnosu na kalcij uzrokuje promjenu kristalne rešetke što rezultira gubitkom rotacijske simetrije (AHR, 2008).

Osnovna svojstva karbonatnih stijena su tekstura, sklop, struktura, tip zrna te mineralni sastav. Kod dolomita jedna od najvažnijih značajki je dijagenetski sklop i mineralni i kemijski sastav. Sadrži sklop (engl. „pattern“) rasta kristala za vrijeme dijageneze (PAVIČIĆ, 2018, Slika 3 i 4) (AHR, 2008).



Slika 3. A) Dijagenetski sklop u dolomitima (AHR, 2008). Dolomit potpuno zamjenjuje kalcit u kristalnoj rešetci te nastaje karakteristični dijagenetski sklop potpuno nevezan za inicijalne uvjete i mehanizme taloženja. Vidljiva je dobro razvijena interkristalna poroznost dolomita. B) fotografija rekristaliziranog gornjotrijaskog dolomita pod lupom (povećanje 8x) (PAVIČIĆ, 2018).



Slika 4. Raspodjela dijagenetskih okoliša i dijagenetskih procesa u Zemljinoj kori (prema MOORE, 1989; AHR, 2008).

Dijageneza obuhvaća sve promjene koje se događaju u stijeni nakon taloženja, a prije metamorfoze. Veličina, oblik, orijentacija i međusobni odnos pojedinih kristala kontroliraju

poroznost i propusnost jer kontroliraju i povezanost šupljina između kristala, što omogućuje gibanje fluida kroz stijenu u mikroskopskom mjerilu (AHR, 2008). Pri procjenjivanju poroznosti važno je voditi računa o porijeklu i načinu nastanka određenog tipa poroznosti, kako bi mogli procijeniti i njezin iznos u većem volumenu stijene. Poroznost u recentnim karbonatnim stijenama varira u rasponu od 40 % do 70 %, no u starijim karbonatnim stijenama je u pravilu od 5 do 15 % (CHOQUETTE & PRAY, 1970; MOORE, 1989; AHR, 2008; MOORE & WADE, 2013). Poroznost u karbonatima može biti i dvostruko reducirana uslijed dijageneze zalijeganja (engl. „burial diagenesis“) do dubine od 1720 m (SCHMOKER & HALLEY, 1982). Također, dubina zalijeganja intenzivnije utječe na smanjenje poroznosti od vremena provedenog na određenoj dubini (SCHMOKER & HALLEY, 1982). Smanjenje propusnosti uslijed dijageneze zalijeganja brže i veće je od smanjenja poroznosti (BUDD, 2001). Zbog značajnog utjecaja dijageneze na poroznost i propusnost dolomita, potrebno je detaljno opisati taložnu poroznost te dijagenetske okoliše (slika 5) i dijagenetsku prošlost stijene koja kontrolira razvoj poroznosti.

Strukturna, tekstura, mineralni, kemijski sastav i poroznost u karbonatnim stijenama nastali su te se mijenjaju određenim procesima koji se mogu grupirati u:

- 1) sedimentacijske procese (biološki, kemijski, mehanički);
- 2) dijagenetske procese (kemijska reaktivnost stijena);
- 3) mehanički lom stijene (tektonska prošlost stijena).

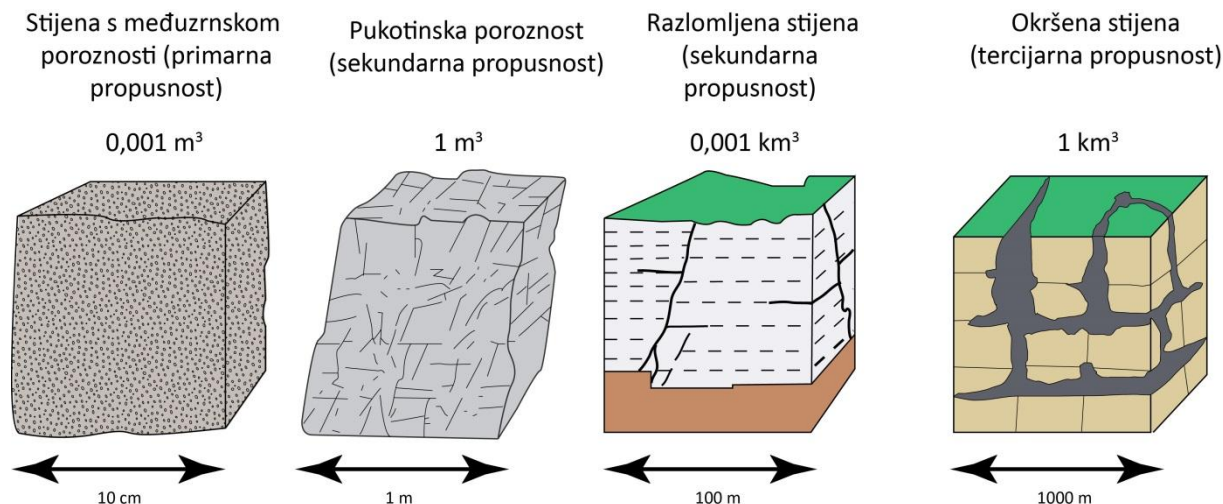
SCHLANGER et al. (1974) predložili su pristup proučavanja dijagenetskog potencijala pelagičkih sedimenata kao rezultat mineralnog sastava sedimenata i uvjeta taloženja (TUCKER & WRIGHT, 2009). Taj se pristup može primijeniti i na plitkomorske sedimente, tj. na dolomite nastale iz plitkomorskih sedimenata. Uvjeti taloženja, dubina mora, brzina sedimentacije, izvorišni materijal, tip sedimentacije, temperatura, organizmi, kompakcija, veličina zrna i primarna poroznost, značajke su koje kontroliraju rezultate dijageneze (TUCKER & WRIGHT, 2009).

U karbonatnim stijenama, složeni odnos i međudjelovanje taložnih uzročnika rezultiraju taloženjem raznovrsnih facijesa koji se izmjenjuju vertikalno i lateralno. Dodatnu složenost uzrokuju i dijagenetski i tektonski procesi, a rezultat svih ovih procesa je velika prostorna varijabilnost strukture, teksture, mineralnog, kemijskog sastava, poroznosti i poroznosti te ostalih značajki stijena (LUCIA, 2000; EHRENBERG & NADEAU, 2005; S. N. EHRENBERG et al., 2006; BORGOMANO et al., 2008; HARRIS, 2010; MOORE & WADE, 2013; BRIGAUD et al., 2014).

## 8. HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE KRŠKOG PODZEMLJA

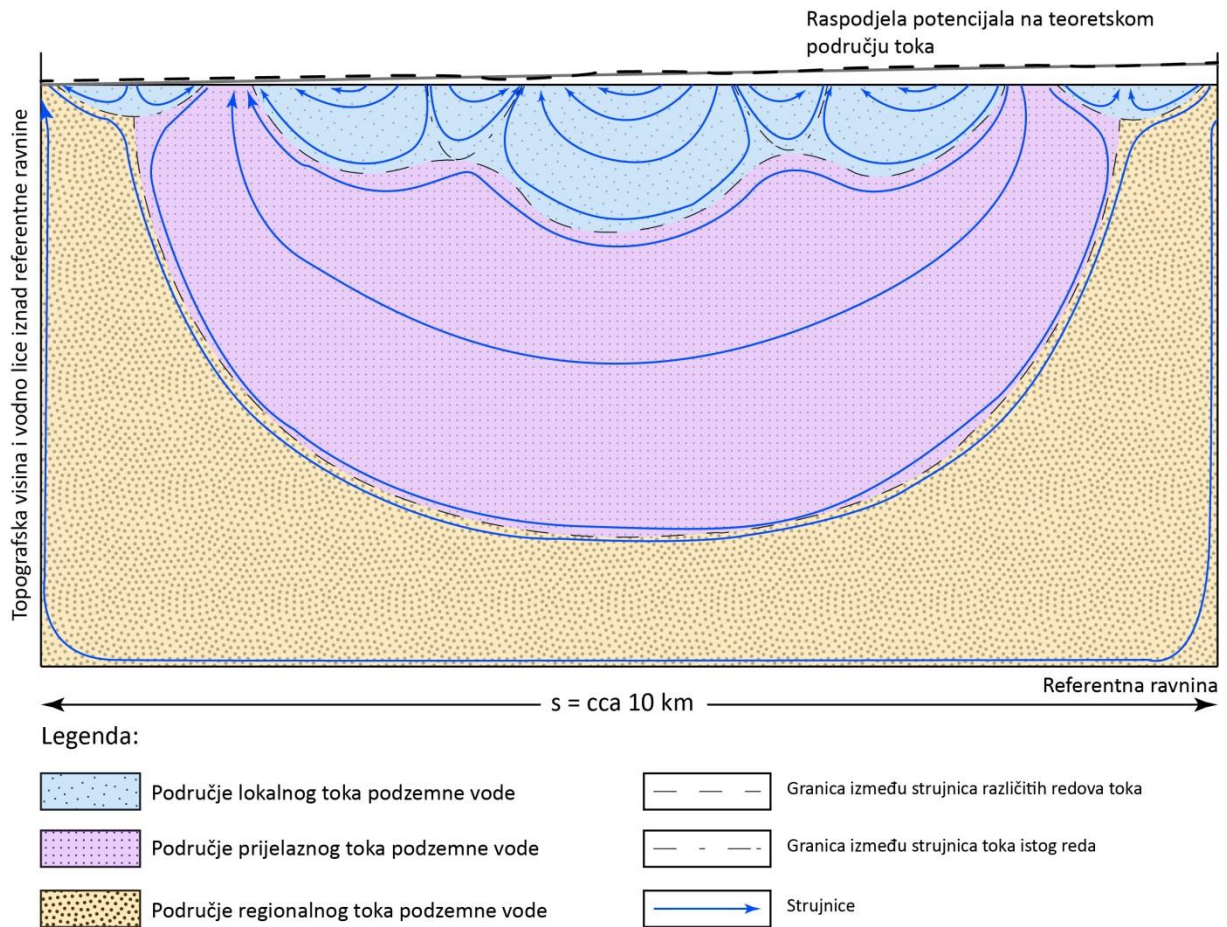
Poglavlje o hidrogeološkim značajkama zauzima središnje mjesto u ovoj stručnoj analizi zato što se planirani zahvat nalazi u **osjetljivom krškom okolišu**, gdje su podzemne vode glavni nositelj hidrološke funkcije prostora, ali i najranjiviji okolišni medij. U kršu, a osobito u sustavima u kojima dominira pukotinski tok, moguće su brze i teško predvidive hidrauličke veze između zone infiltracije, ponora, rasjednih zona i izvora, pa potencijalni utjecaji (npr. promjene režima otjecanja, zamućenja, promjene kemizma ili akcidentalna onečišćenja) mogu imati posljedice izvan neposredne lokacije zahvata. Osim zaštite okoliša, hidrogeološka analiza je nužna i iz praktičnog razloga: projekt uključuje značajne potrebe za vodom te je potrebno znanstveno utemeljeno procijeniti **održivost zahvata vode**, sezonsku varijabilnost izvora i rizike povezane s eksploatacijom u kršu. Drugim riječima, razumijevanje hidrogeološkog sustava ovdje nije samo „opis stanja“, nego temelj za procjenu ranjivosti, projektiranje mjera zaštite i definiranje učinkovitog monitoringa.

Gorska i planinska područja jedinstveni su okoliši koji sadržavaju velike zalihe podzemnih voda te sigurno sudjeluju u napajanju vodonosnika u nizinama koje se nalaze u njihovom podnožju (WELCH, 2012; ALFORD, 1985; VIVIROLI et al., 2003; WILSON & GUAN, 2004; TETZLAFF & SOULSBY, 2008). Kamenolomi a pogotovo oni sa relativno malom eksploatacijom nemaju značajnog utjecaja na vodnu bilancu i režim toka podzemne vode. Topografija koja je najpouzdaniji podatak a dobro se može analizirati na digitalnim modelima reljefa ima veliki utjecaj na tok podzemne vode (TOTH, 1963). Tok podzemne vode u gorskim područjima potrebno je opisivati u različitim mjerilima (TOTH, 1963). Kako je takav tok važno promatrati u prostornom mjerilu tako je važno shvatiti i vremensko mjerilo toka podzemne vode. Lokalni tok podzemne vode (onaj koji napaja većinu izvora na Kupresu) ima relativno mala utjecajna područja što podupiru i zone sanitarne zaštite a time i relativno veliku brzinu toka podzemne vode. Regionalni tok podzemne vode koji snabdjeva nizinske izvore može trajati i tisućama godina a brzina toka ovisi o nizu čimbenika.



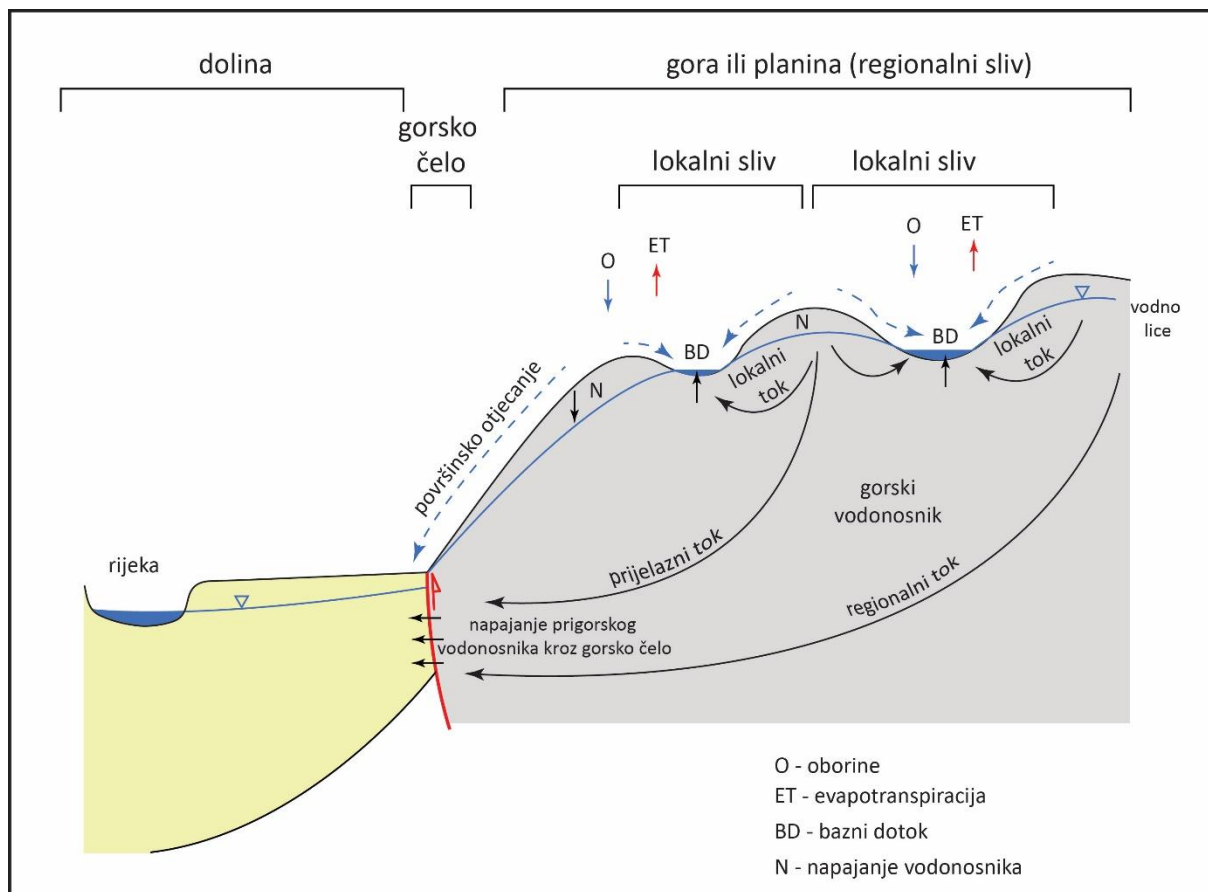
Slika 5. Shematski prikaz raspodjele poroznosti karbonatnih stijena u različitim mjerilima (SCESI & GATTINONI, 2009).

U planinskim i gorskim područjima tok vode pokreće gravitacija gdje se hidraulički gradijent ostvaruje uslijed razlike u topografskoj visini područja napajanja i područja istjecanja. U uvjetima gdje se obnavljanje vodonosnika odvija koncentrirano u područjima veće gustoće ponikvi i difuzno kroz tanak pokrivač tla, vodno lice je relativno plitko pod površinom a njegova geometrija u regionalnom mjerilu je replika površine terena (HUBBERT, 1940, TOTH, 1963, FORSTER & SMITH, 1988b; HARTE & WINTER, 1995; WINTER et al., 2008; WORMAN et al., 2006; HAITJEMA & MITCHEL-BRUKER, 2005; GLEESON & MANNING, 2008). Hidraulički gradijent tada je funkcija površine terena, količine napajanja vodonosnika te raspodjele hidrauličke vodljivosti u vodonosniku. TOTH, 1963 je podijelio tok podzemne vode na regionalni, prijelazni (engl. *intermediate*) i lokalni (TOTH, 1963). Kod regionalnog toka podzemne vode, glavni dio napajanja odvija se u topografski najvišim a istjecanje u topografski najnižim područjima (TOTH, 1963, 2009, GLEESON & MANNING, 2008, WELCH, 2012). Kod lokalnog toka podzemne vode područja napajanja i istjecanja su u istom drenažnom bazenu (TOTH, 1963, GLEESON & MANNING, 2008). Kod prijelaznog toka podzemne vode, područje napajanja nalazi se u topografski višem bazenu nego područje istjecanja (TOTH, 1963, GLEESON & MANNING, 2008).



Slika 6. Gravitacijski uvjetovani tok podzemne vode u teoretskom drenažnom bazenu s složenom topografijom. Prikazana su područja regionalnog, prijelaznog i lokalnog toka podzemne vode (prema TOTH, 1963).

Regionalni tok podzemne vode u gorskim i planinskim područjima duboki je tok podzemne vode kroz razlomljene vodonosnike koji može dosezati dubine od više stotina metara (TOTH, 1963 i Slika 6 i 7). Duboka cirkulacija podzemne vode vrlo je spora te istječe u površinske vodotoke u dolinama kao bazni tok, potpovršinski tok ili kroz gorska i planinska čela u prigorske vodonosnike (WELCH, 2012).



Slika 7. 2D konceptualizacija toka podzemne vode u gorskim i planinskim područjima (WELCH, 2012 & TOTH, 1963, 2009).

Krš predstavlja teren nastao korozivnim djelovanjem površinske i podzemne vode na topive, uglavnom karbonatne stijene, posebice vapnenca i dolomita. Krški vodonosnici, poznati po svojoj kompleksnoj i heterogenoj prirodi, često se proučavaju primjenom načela „crne kutije“, koje podrazumijeva analizu sustava na temelju vidljivih ulaznih i izlaznih podataka, bez dubljeg zadiranja u složene unutarnje procese (BORGHI et al., 2016; BAKALOWITZ, 2005). Podzemna voda u tim vodonosnicima teče kroz mrežu kanala, pukotina i rasjeda, koje je obično teško precizno kartirati. Krški vodonosnici se razlikuju po svojim karakteristikama toka podzemne vode ovisno o svojim karakteristikama a posebno se razlikuju vapnenca i dolomiti. Topive stijene poput vapnenca otapaju se djelovanjem površinskih i podzemnih voda, što stvara karakteristične značajke poput špilja, ponikava i izvora. Dolomiti su puno manje topivi od vapnenaca pa se dominantan tok podzemne vode ostvaruje kroz mrežu pukotina i pukotinskih sustava.

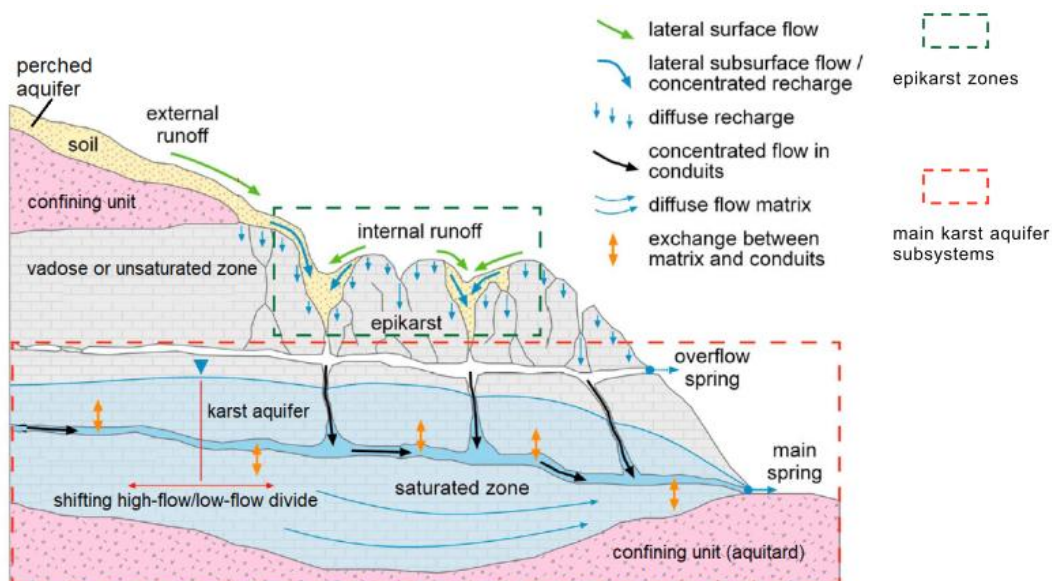
Oba tipa vodonosnika posebno su ranjivi na onečišćenja. Pri tome potrebno je razlikovati (A) intrinzičnu i (B) specifičnu ranjivost (VRBA & ZAPOROZEC, 1994). Intrinzična ranjivost odnosi se

na hidrološke i hidrogeološke karakteristike područja, neovisno o vrsti onečišćivala, njegovoj količini i vremenskoj dinamici ispuštanja. Specifična ranjivost uključuje ljudske aktivnosti, poput utjecaja poljoprivrede i naselja u površinskim i podzemnim slivovima, kao i svojstva samog onečišćivala.

Glavna karakteristika ovih terena su veliki sustavi pukotina koji nastaju kao posljedica spomenutog kemijskog otapanja, ali i drugih čimbenika poput klime, pedoloških, geoloških i vegetacijskih karakteristika područja (MAYER i URUMOVIĆ, 2006). Pukotine su ključne za protok vode kroz stijenu, odnosno za skladištenje vode u krškim vodonosnicima. Oni su važan izvor pitke vode za oko 10 % ljudske populacije, dok su s druge strane iznimno osjetljivi na antropogen utjecaj (CALLI et al., 2025).

Podzemne vode u kršu osobito su izložene onečišćenjima zbog neposredne povezanosti s procesima na površini i brze hidrauličke veze površinskih voda s podzemnim vodonosnicima. Za razliku od klastičnih vodonosnika, gdje se podzemna voda kreće svega nekoliko metara na dan, u kršu brzine tečenja dosežu i nekoliko kilometara dnevno (MAYER i URUMOVIĆ, 2006; CALLI et al, 2025). Dodatni problem predstavlja čest izostanak površinskih naslaga, a ako i postoje, najčešće su vrlo tanke, stoga postupne filtracije gotovo da i nema, a pronos onečišćenja u dublje dijelove je direktniji. Mnogobrojni krški oblici (jame, vrtače, ponori) pritom predstavljaju izravne ulazne točke onečišćivala u vodonosnik (MAYER i URUMOVIĆ, 2006). Zbog navedenog je ključno poznavati potencijalne izvore zagađenja i razumjeti načine širenja istih, te provoditi kontinuirani monitoring krških vodonosnika kako bi se na prijetnje moglo pravovremeno reagirati.

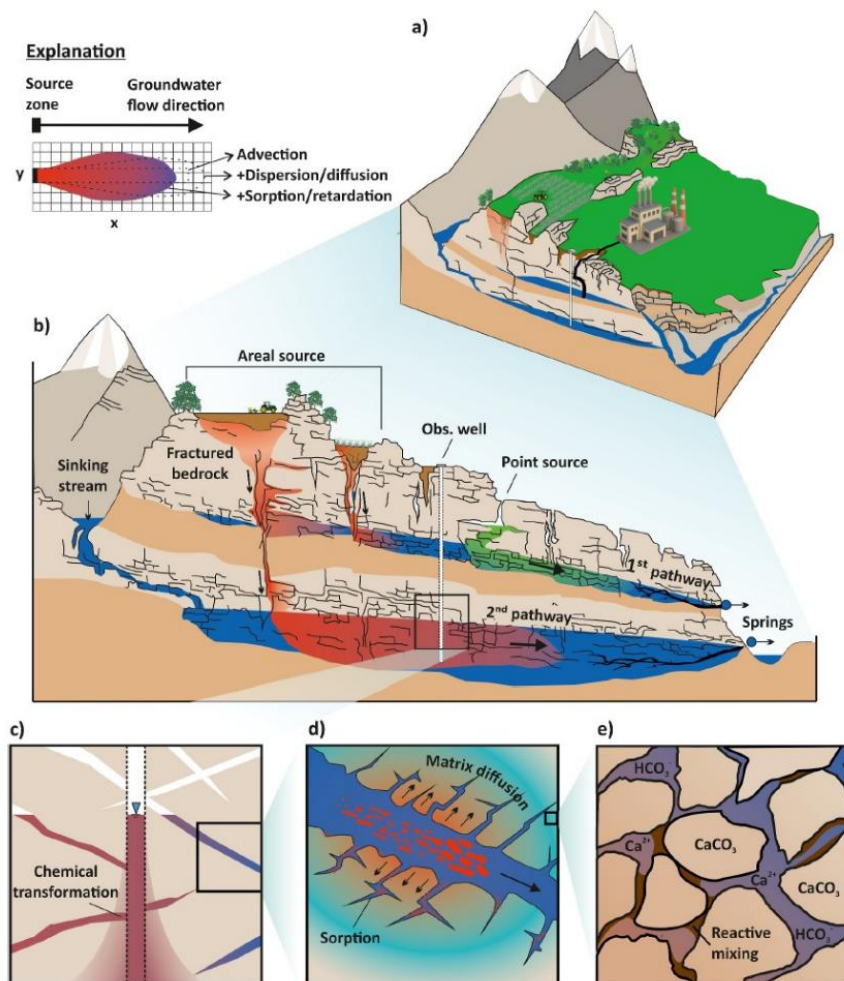
Na slici 8 prikazan je pojednostavljeni presjek tečenja površinske i podzemne vode unutar krškog vodonosnika. Izdvojene su glavne hidrogeološke zone, te glavni procesi prihranjivanja i skladištenja vode unutar zona.



Slika 8. Karst drainage system (HARTMANN et al., 2014; modificirano prema KUNIANSKY et al, 2022)

Kompleksnost kretanja vode u krškim vodonosnicima određena je brojnim faktorima poput poroznosti zastupljenog sedimenta (bilo da se radi o površinskim naslagama ili ispuni); prisutnosti kanala, rasporeda i povezanosti pukotina, visine vodnog lica i hidrauličkih gradijenata; drugim riječima heterogenosti vodonosnika (FIELD, 1993; KUNIANSKY et al, 2022). U nesaturiranoj zoni protok je laminaran i sporiji jer se odvija kroz mikropukotine i pore, dok u saturiranoj zoni voda teče kroz razvijene kanale, pa je protok turbulentan i znatno brži (Slika 8) (KUNIANSKY et al, 2022).

Poznavanje kretanja vode kroz obje zone je preduvjet poznavanja kretanja zagađivala u krškim sustavima. Zagađivala su uglavnom kemijske i biološke prirode. Kemijska zagađivala mogu se podijeliti na organska, anorganska, otopljena, suspendirana i hlapiva, dok biološka čine virusi, bakterije i mikroorganizmi, koja također mogu, a i ne moraju biti vezana s drugim suspendiranim tvarima. Zagađivala mogu potjecati iz različitih načina korištenja zemljišta kao što su poljodjelstvo, graditeljstvo, rudarstvo (MAYER i URUMOVIĆ, 2006). U slučaju rudnika, posebnu opasnost predstavlja rudarska drenaža koja se povezuje s oksidacijom sulfidnih minerala u napuštenim rudnicima, jalovištima i rudarskim oknima. Naime, tijekom razdoblja visokih voda i obilnih oborina dolazi do ispiranja materijala, odnosno metala u njima (Fe, Mn, Al, Pb, Zn, Ni), koji se uglavnom prenose u otopljenom obliku. Posljedica su povišene koncentracije metala u krškim izvorima i površinskim vodotocima (BONDU et al., 2023). Osim toga, česte su negativne posljedice procjeđivanja oborinskih voda iz urbanih predjela u vodonosnike (npr. komunalne i industrijske otpadne vode), ali i prirodnih izvora (primjer otapanja minerala arsenopirita u stijeni i izlučivanjem štetnog arsena) (MAYER i URUMOVIĆ, 2006; NAKIĆ, 2010; CALLI et al., 2025).



Slika 9. Konceptualni prikazi procesa transporta otopljenih tvari u krškim vodnim resursima na različitim prostornim skalama: (a) 3D blok-dijagram na skali krškog vodonosnika, (b) skala vodonosnika, (c) skala bušotine, (d) skala pojedinačne pukotine, (e) skala pora (opisana na razini reprezentativnog elementarnog volumena, REV, poznatog i kao Darcyjeva skala). U ovom je prikazu atenuacija otopljenih tvari opisana kemijskom transformacijom na koju utječu fizikalni, kemijski i (biogeo)kemijski procesi. Slika opisuje isključivo antropogeno onečišćenje, prikazujući difuzne (arealne) i točkaste izvore, budući da su oba tipa relevantna za probleme onečišćenja u krškim sustavima.. (modificirano prema ÇALLI et al., 2025.)

Slika 9 ilustrativno prikazuje kompleksnost prijenosa onečišćenja od razine pora do razine vodonosnika. Svi procesi strujanja, transporta i kemijskih reakcija promatraju se kroz jedno prosječno, reprezentativno područje, tzv. reprezentativni elementarni volumen (REV). REV omogućuje razumijevanje problema na mikrorazini, koji se mogu preslikati na makrorazinu, tj. na razinu vodonosnika.

Osnovni mehanizmi transporta onečišćenja su: a) advekcija i b) hidrodinamička disperzija (BAČANI i VLAHOVIĆ, 2012; CALLI et al., 2025). Advekcija predstavlja širenje onečišćenja uzrokovano samim tokom fluida, dok je hidrodinamička disperzija proces širenja otopljene tvari,

u smjeru gibanja podzemne vode, kao posljedice mehaničke disperzije i molekularne difuzije. Mehanička disperzija nastaje zato što čestice vode i onečišćivala teku različitim brzinama kroz nejednaki porni prostor, pa odstupanja od prosječne brzine toka uzrokuju širenje oblaka otopljene tvari (onečišćivala). Molekularna difuzija se odnosi na gibanje čestica onečišćivala kao posljedice kemijskog potencijala, tj. razlike u koncentraciji promatranog onečišćivača u otopini. S druge strane, osnovni fizički proces koji utječe na smanjenje koncentracije onečišćivača u podzemnoj vodi je disperzija, odnosno razrjeđivanje (BAČANI i VLAHOVIĆ, 2012).

Može se zaključiti da onečišćenje se kroz krške sustave može kretati vrlo brzo i raspršiti u više tokova koji prate nepredvidive smjerove do mjesta istjecanja. Iako se dio onečišćenja može brzo razrijediti, ostatak može ostati zarobljen u manje propusnim zonama matriksa te se postupno oslobađati (što uvelike ovisi i o viskoznosti toka (CALLI et al, 2025)). Budući da su onečišćenja podzemnih voda slabo vidljiva i najčešće se uočavaju tek na eksploatacijskim objektima, zaštita podzemnih voda jedna je od najvažnijih znanstvenih i stručnih aktivnosti u svijetu.

Kao zakonska osnova zaštite podzemnih voda EU, navodi se Okvirna Direktiva o Vodama, ODV (WDF, 2000). Direktiva predstavlja glavni pokretač za postizanje održivog upravljanja vodama u EU, a jedan od glavnih ciljeva uključuje smanjivanje postojećeg i sprječavanje budućeg onečišćenja vode. U Bosni i Hercegovini izvorišta koja se koriste za javnu vodoopskrbu, prema Federalnom Zakonu o zaštiti voda, moraju biti zaštićena. Osnovni preduvjet je uspostavljanje zona sanitarne zaštite i provođenje propisanih mjera zaštite unutar tih zona prema „Pravilniku o načinu utvrđivanja uslova za određivanje zona sanitarne zaštite i zaštitnih mjera za izvorišta vode za javno vodosnabdjevanje stanovništva“.

Za krške vodonosnike propisuju se četiri zone sanitarne zaštite, a zbog specifičnosti krškog područja primjenjuje se nekoliko kriterija, vrijeme zadržavanja vode u podzemlju, brzina podzemnog toka i količina napajanja. Također, uvodi se mogućnost mikrozoniranja (prema zakonskoj regulativi o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta).

Prema odredbama ovog pravilnika za zaštitu izvorišta vode utvrđuju se četiri zaštitne zone i to: a) I. zaštitna zona kao zona sa najstrožim zabranama i ograničenjima; b) c) d) II. zaštitna zona kao zona sa strogim zabranama i ograničenjima; III. zaštitna zona kao zona sa umjerenim zabranama i ograničenjima; IV. zaštitna zona kao zona sa preventivnim zabranama i ograničenjima.

## 8.1. Hidrogeološke značajke područja Kupresa

Područje Kupresa nalazi se u hidrogeološki izuzetno osjetljivom i složenom dijelu Dinarskog krša, koji u regionalnom smislu predstavlja **razvodnu zonu između jadranskog i crnomorskog sliva**. Takav položaj karakterističan je za središnje dijelove Dinarida, gdje se granice velikih slivova ne definiraju isključivo topografijom, već su u velikoj mjeri uvjetovane složenim podzemnim hidrogeološkim odnosima u kršu (Slika 10) (BONACCI, 1987; FORD & WILLIAMS, 2007).

Na površini terena Kupreška visoravan i Kupreško polje predstavljaju blagi reljefni prag, no u krškim uvjetima **površinska razvodnica ne mora odgovarati stvarnim smjerovima podzemnog otjecanja**. Zbog razvijenog krškog podzemlja, poniranja voda i pukotinsko-kavernoznog toka, oborinske i površinske vode s područja Kupresa mogu se podzemnim putem usmjeravati prema različitim regionalnim slivovima, ovisno o litološkim odnosima, tektonskoj građi i hidrauličkom stanju sustava (HERAK & STRINGFIELD, 1972; MILANOVIĆ, 2004).

Ovakav hidrogeološki položaj **konkretno je i izravno dokumentiran za područje Kupreškog polja**. Na temelju geomorfoloških, hidroloških i hidrogeoloških analiza, STEPIŠNIK (2014) izričito navodi da **kroz Kupreško polje prolazi razvodnica između jadranskog i crnomorskog sliva**, pri čemu dio voda otječe prema sustavima koji pripadaju jadranskom slivu, dok se drugi dio usmjerava prema crnomorskom slivu. Autor jasno zaključuje da je Kupreško polje smješteno na razvodnici između dvaju velikih europskih slivova, što potvrđuje njegovu ulogu hidrološko-hidrogeološkog prijelaznog područja (STEPIŠNIK, 2014). Prema dostupnim podacima ne postoje naznake da bi postrojenje imalo širi utjecaj na slivove; eventualni utjecaji, ukoliko bi se pojavili, očekuju se u relativno uskoj lokalnoj zoni oko lokacije. Definirane zone sanitarne zaštite pojedinih izvorišta dodatno podupiru zaključak o prostorno ograničenim područjima ranjivosti. Razinu i prostorni doseg utjecaja na podzemne vode potrebno je utvrditi lokacijski specifičnim hidrogeološkim istraživanjima i praćenjem stanja, što je standardna praksa za sve zahvate ovog tipa.

Na širem regionalnom području najrasprostranjenije propusne stijene kavernozno-pukotinske poroznosti su mezozojski dolomiti i vapnenci (Slika 10). Ove stijene imaju hidrogeološke funkcije vodonosnika u kojem se zadržavaju velike količine podzemne vode. Ove vodonosnike karakterizira tečenje podzemnih voda privilegiranim pravcima kroz rasjedne i pukotinske sustave i krškim kanalima. Odlikuje ih visoka hidraulička vodljivost koja omogućuje intenzivnu dinamiku podzemnih voda. Oscilacije razina podzemnih voda su vrlo izražene, a izdašnosti izvora u minimumu relativno jako niske. Izvori se odlikuju visokim koeficijentom neravnomjernosti

izdašnosti ( $Q_{max}/Q_{min} > 10$ ), uz skoro potpunu infiltraciju oborina. Područje je to bez površinskog otjecanja u krškim masivima, kao i koncentriranim poniranjem površinskih voda u ponorima u području krških polja. Prihranjivanje krških vodonosnika odvija se direktno preko okršenih zona, ponora, površinskih tokova i izgrađenih akumulacijskih bazena. Važno je istaći da prihranjivanje krških vodonosnika nije isto u različitim hidrološkim uvjetima, jače je i brže u hidrološkim razdobljima visokih voda te da prihranjivanje više zavisi od režima oborina i njihovog intenziteta, nego od ukupnih godišnjih oborina. Pritom je važno da se smjerovi otjecanja mogu razlikovati ovisno o hidrološkim uvjetima, a razvodnica može imati **dinamičan karakter**.



Slika 10. Regionalna hidrogeološka karta šireg područja Kupresa prema Nacrtu plana upravljanja vodama na vodnom području Jadranskog mora u Federaciji BiH (2022-2027).

Geološka građa Kupreške visoravni, koju pretežito izgrađuju karbonatne stijene trijasko i jurske starosti uz izraženu tektonsku razlomljenost, dodatno pogoduje takvom hidrogeološkom ponašanju. Regionalne geološke i hidrogeološke karte potvrđuju da se područje Kupresa nalazi u

zoni složenih strukturnih odnosa koji omogućuju podzemno otjecanje prema različitim slivnim sustavima (Čičić et al., 2002; Vlahović et al., 2005).

Zbog navedenih razloga, područje Kupresa se s hidrogeološkog stajališta opravdano smatra **razvodnim i prijelaznim područjem između jadranskog i crnomorskog sliva**, s naglašenom osjetljivošću na promjene u prirodnim i antropogenim uvjetima.

Područje Kupresa u hidrogeološkom smislu pripada vodnom tijelu koje spada u neposredni sliv rijeke Certine. Površine je 54,3 km<sup>2</sup>, dominantno pukotinske i pukotinsko -kavernozne poroznosti i izgrađeno je od sijedećih vrsat stijena:

- **Srednje propusne stijene pukotinske poroznosti** :  $T_2$  – crvenkasti pločasti vapnenci, rožnaci, tufovi, tufitne breče, alevroliti. Funkcija: lokalni vodonosnici ograničenog rasprostranjenja, povremeni izvori pitke vode.
- **Srednje propusne stijene kavernozno-pukotinske poroznosti** - Dolomiti i vapnenci **srednjeg i gornjeg trijasa ( $T_{2,3}$ )**. Funkcija: vodonosnici većeg rasprostranjenja, brojni izvori pitke vode, krški vodonosnici.
- **Dobro propusne stijene kavernozno-pukotinske poroznosti**: Vapnenci jure ( $J_{1,2}$ ,  $J_3$ ,  $K$ ) – intenzivno okršeni, tranzitni vodonosnici. Funkcija: voda brzo ponire, rijetki izvori pitke vode, podzemne vode otječu prema nižim područjima (Livanjskom i Duvanjskom polju, vrela Plive i Janja).
- **Nepropusne stijene**:  $PT$ ,  $T_1$ ,  $Ol$ ,  $M$ ,  $M$ , funkcija podinskih i bočnih hidrogeoloških barijera. Vrlo slaba vodopropusnost, hidrogeološke barijere. Ove naslage izgrađuju zapadne padine Kupreškog polja, gdje se formiraju manji izvori i potoci Ribnjak, Otinovac, Milač i Mrtvica, te teku preko neogenskih naslaga i kvartara

Kvartarne i ledenjačke naslage nisu svrstavane u niti jednu kategoriju radi svog ograničenog rasprostiranja i debljine te promjenjive hidrogeološke uloge. Na području gdje rastresite kvartarne naslage leže na propusnim vapnencima i dolomitima ( $K$ ,  $J_3$ , i  $T_{2,3}$ ) potoci postepeno gube vodu u ponorima, koja se pojavljuje na vrelima Veliki i Mali Stržanj Sturba i Žabljak.

Dubina do podzemne vode na području vodnog tijela podzemnih voda Kupres kreće se između 2 do 40 m. Pokrovne naslage su debljine 0,5 do 6 m a sačinjavaju ih glina, pijesak, prah i kvartarni slabo vezani konglomerati. Prihranjivanje podzemnih voda se odvija oborinama koje padnu po padinama Stožera i iz površinskih vodotokova. Istjecanje se odvija najčešće preko brojnih manjih izvora, koji se javljaju na padinama Stožera. Potok Milač nastaje iz više stalnih izvora iz donje i srednje-trijaskih naslaga, a njegovo izvorišno područje nalazi se istočno i sjeveroistočno od

mjesta Kupres. Izdašnost najvećih izvora se kreće od 1 do 4 l/s. Najznačajniji izvori i kaptaze su: Otinovci, Bunar VB -1 (Vila Promet); Šadinac, Hajdarevac i Batinića vrelo. Srednja godišnja ukupna izdašnost prema hidrogeološkoj procjeni bilance podzemnih voda ovog vodnog tijela je  $Q_{sr}=1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Prema prosječnim mjerenim izdašnostima izvorišta  $Q_{sr}$  je oko  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  (Slišković, 1995).

**Količinsko stanje** podzemnih voda vodnog tijela Kupres određeno temeljem bilance voda određeno je kao **dobro**, pri čemu se u "Planu upravljanja vodama na vodnom području Jadranskog mora u Federaciji BiH (2022-2027)" navodi kako PVT Kupres ima neznatno prekoračenje granične vrijednosti zahvaćanja iznad 20 % u odnosu na procijenjenu količinu podzemne vode u minimumu, što ga međutim nije svrstalo u "loše" stanje jer nisu obuhvaćeni svi izlazi iz tog vodnog tijela. Napominje se kako su ove analize provedene u načelu s podacima i podlogama koji su prikupljeni do 2018. Godine.

**Kemijsko stanje** podzemnih voda vodnog tijela Kupres također je određeno kao **dobro**, podzemna voda je po hidrokemijskom facijesu hidrokarbonatno-sulfatnog tipa, a povećana koncentracija sulfata prirodna je posljedica geološke građe terena (pojave gips-anhidritnih naslaga).

Dodatna karakteristika vodnih tijela podzemnih voda je njihova ranjivost na površinska onečišćenja. Određivanje ranjivih područja u kršu ima posebni značaj za ukupno sagledavanje rizika od nepostizanja dobrog stanja podzemnih voda. Određivanje ranjivosti na površinska onečišćenja, za tijela podzemnih voda u kršu, u načelu je složeni postupak koji zahtijeva kvalitetne podloge i detaljne analize, a u "Nacrtu plana upravljanja vodama na vodnom području Jadranskog mora u Federaciji BiH (2022-2027)" ranjivost podzemnih vodnih tijela procijenjena je kroz određivanje prirodne i specifične ranjivosti kao niska, dok je rizik od nepostizanja dobrog stanja podzemnih voda procijenjen kao osrednji.

Dio vode koji se nalazi na najvećim dubinama gotovo pa se ni ne kreće te predstavlja statičke rezerve podzemne vode a na to ukazuju podaci iz MAYER et al., 1994 iz zdenca BV-1 u Vratnom na Kalniku u Hrvatskoj gdje je određena starost podzemne vode u gornjotrijaskim dolomitima od  $4500 \pm 150$  godina. Kako na regionalni tok podzemne vode najviše utječu morfologija površine terena, obnavljanje podzemne vode u vodonosniku i raspodjela hidrauličke vodljivosti (HUBBERT, 1940, TOTH, 1963, 2009, GLEESON & MANNING 2008, WELCH, 2012). Da bi se odredio smjer toka te dubina i geometrija vodnog lica potrebno je procijeniti hidrogeološke značajke površine terena i podzemlja. Geometrija vodnog lica najviše ovisi o odnosu napajanja i hidrauličke vodljivosti

vodonosnika ( $\frac{R}{K}$ ) (GLEESON & MANNING, 2008), a smjer toka ovisiti će još o geometriji površine trena i strukturnom sklopu vodonosnika.

Nemoguće je odrediti hidrauličku vodljivost u regionalnom mjerilu jer ona ovisi o sedimentacijskim, dijagenetskim i strukturnim značajkama vodonosnika koje su prostorno vrlo promjenjive te je i hidraulička vodljivost promjenjiva u vertikalnom i horizontalnom smjeru. Zato je važno je što preciznije procijeniti red veličine hidrauličke vodljivosti odnosno osrednjenu i izotropnu vrijednost hidrauličke vodljivosti. Drugi način je područje istraživanja shvatiti kao uslojenu sredinu (prema ANDERSON et al., 2007) te uzeti različite vrijednosti hidrauličke vodljivosti za tlo, saprolit, razlomljenu i trošnu stijenu, razlomljenu stijenu te slaboporpusnu do nepropusnu podlogu (ANDERSON et al., 2007; WELCH, 2012). Točnije i preciznije vrijednosti hidrogeoloških značajki se mjere i određuju dalje u lokalnom mjerilu u područjima zanimljivim za vodoistražne radove.

## 8.2. Taložna poroznost i utjecaj dijageneze na poroznost i hidrogeološku ulogu karbonatnih stijena

Dijagenetski procesi pri izmjeni inicijalne, taložne poroznosti mogu povećati ili smanjiti poroznost (AHR, 2008). Određivanje i opisivanje tipa poroznosti koristiti se pri procjeni iznosa i raspodjele poroznosti u analiziranoj stijeni. Dolomiti su u pravilu krtiji od vapnenaca i podložniji su lomovima, što rezultira u pravilu većom pukotinskom poroznosti u odnosu na vapnence iste veličine zrna i ukupne debljine (AHR, 2008). Naime, nisu sve pukotine rezultat tektonskih utjecaja nego i taložnih i dijagenetskih kao što su pukotine koje nastaju po stromatolitnim laminama. Dijagenetski se procesi događaju u vapnencima i dolomitima, no kako su istraživane stijene dolomiti, opisi dijagenetskih tipova poroznosti odnosit će se samo na one koji nastaju u dolomitima, a načinjeni su prema opisima u AHR (2008).

Poroznost se dijagenetskim putem može povećati procesima rekristalizacije, zamjene minerala (dolomitizacija) te otapanjem. **Rekristalizacija** predstavlja proces gdje dolazi do otapanja vrlo malih kristala (mikrit) kalcita te kristalizacije većih kristala sparita. Ovakva rekristalizacija događa se uglavnom u plitkim dijagenetskim okolišima u ranim fazama dijageneze te taložne značajke stijene ostaju sačuvane. Rekristalizacija se naravno može događati i u okolišu dubinske dijageneze kada su taložne značajke stijena potpuno uništene. Poroznost se kod rekristalizacije povećava, jer se povećava prostor između pojedinih kristala. To je najčešći primjer povećanja poroznosti dijagenezom. Naime, propusnost ovako nastale poroznosti je u pravilu relativno niska

jer su pore mikrometarskih dimenzija, a mjesta povezanosti pora submikrometarskih, što uzrokuje da kapilarne sile blokiraju tok fluida u takov formiranoj poroznoj sredini.

Najčešći mineral koji služi u **zamjeni minerala** prilikom dijageneze je dolomit, a taj se proces zove dolomitizacija. Ipak, dolomitizacija češće uzrokuje smanjenje poroznosti nego povećanje (LUCIA, 2000). Poroznost, a time i propusnost se prilikom dolomitizacije povećava u slučajevima kada dolazi do potpuno dolomitizacije bez kristalizacije dodatnog dolomitnog cementa. Također, do povećanja poroznosti može doći kada se odvija otapanje kalcita i gotovo istovremena, prostorno nepravilna kristalizacija dolomita, koja onda stvara velike šupljine između kristala dolomita.

Poroznost povećana **otapanjem** obuhvaća: a) povećanje međuzrnskih šupljina; b) moldičku poroznost; c) „vuggy“ odnosno šupljinsku poroznost; d) kanali nastali otapanjem (uključuje i proširenje pukotina procesima otapanja).

Ovakve dijagenetske strukture su uglavnom mikrometarskih dimenzija osim krških oblika koji su od decimetarskih do ponekad i kilometarskih dimenzija. U dolomitima otapanje se uglavnom događa u mikrometarskom mjerilu. Otapanje može biti vezano za vadozni i meteorski dijagenetski okoliš gdje cirkuliraju oborinske vode ili za dubinski dijagenetski okoliš gdje cirkuliraju termalne slane vode (Slika 5). U vadoznom dijagenetskom okolišu, porozna stijena može se naći na površini ili plitko pod površinom gdje cirkuliraju oborinske vode koje s vremenom povećavaju već postojeće šupljine nastale za vrijeme taloženja ili u prethodnim dijagenetskim fazama. Također skeleti organizama izgrađeni od aragonita ili kalcita, mogu se otopiti pa nastaju moldička i šupljinska (engl. „vuggy“) poroznost. Količina otapanja ovisi o sastavu stijene koja se otapa, kemizmu oborinskih voda te vremenu koje stijena provodi u vadoznom dijagenetskom okolišu. U dubinskom dijagenetskom okolišu otapanje se događa pod utjecajem tlaka i temperature i termalnih slanih voda. Za otapanje u dubinskom dijagenetskom okolišu karakteristična je pojava tzv. „saddle“ dolomita, fluorita, sfalerita i drugih metalnih sulfida. Ti se minerali ne pojavljuju u plitkim dijagenetskim okolišima. S obzirom na različitosti procesa, otapanje u plitkim dijagenetskim okolišima i dubinskom okolišu treba razmatrati zasebno.

Poroznost se dijagenetski može smanjiti cementacijom, kompakcijom, rekristalizacijom te mineralnom zamjenom. Iz navedenoga je vidljivo da neki procesi koji uzrokuju povećanje poroznosti također mogu uzrokovati i smanjenje poroznosti.

**Cementacija** je proces kada cement ispunjava dostupne šupljine u stijeni. To se može dogoditi u bilo kojem dijagenetskom okolišu u bilo kojoj fazi dijageneze i često se događa u više faza za vrijeme dijageneze. To je jedan od najčešćih dijagenetskih procesa smanjenja poroznosti, a

dodatno smanjenje može uzrokovati **mehanička kompakcija**. Ona je rezultat dubine zalijeganja stijene i težine krovinskih stijena, zbog čega se zrna ili klasti preslože što rezultira smanjenjem poroznosti. Na kompakciju ukazuje uređenost i gustoća slaganja krupnijih čestica (npr. peloida) u sedimentu. Na dubinu tj. uvjete kompakcije ukazuju stiloliti odnosno stilolitski šavovi.

Smanjenje poroznosti uzrokuje **rekristalizacija**. Mikriti mogu imati značajnu međuzrnsku poroznost koja bude gotovo potpuno uništena kada mikrit rekristalizira u sparit (kristali većih dimenzija). Na mjesto mikrita formira se mozaik mikrosparita koji gotovo da nema nikakvu međuzrnsku poroznost jer kristali mikrosparita rastu tako da popune prostor mikrita i međuzrnske poroznosti.

Dolomitizacija je češća u dubinskom okolišu na kojeg ukazuje „saddle“ dolomit. U plitkim dijagenetskim okolišima dolomitizacija rezultira zamjenom kalcita sa dolomitom u još nekonsolidiranom ili slabo konsolidiranom talogu, uz moguće očuvanje taložnih struktura.

Trijaski dolomitno-vapnenački vodonosnik ( $T_{2,3}$ ) nalazi u vrlo zamršenim strukturnim odnosima. Bore i rasjedi te rasjedne zone velikih dimenzija (dm, hm, km) daju temeljna strukturna obilježja ovom vodonosniku. Odnos ovog vodonosnika prema izolatorskim stijenskim kompleksima vrlo je zamršen. U normalnom stratigrafskom slijedu u podini vodonosnika se nalaze donjotrijaski kompleks klastičnih stijena koji je vodonepropustan ili slabo vodopropustan. U krovini se transgresivno i diskordantno nalaze raznovrsne taložne stijene mezozojske i kenozojske starosti. Ove su stijene primarno nastajale u području prostrane karbonatne platforme na pasivnom rubu Tethys-a, čije se horizontalno rasprostiranje moglo pratiti tisućama kilometara (od današnjih Portugala i Španjolske, preko Turske sve do Kine), a debljina istaloženih karbonatnih sekvencija nerijetko je prelazila tisuću metara (HAAS & DEMÉNY, 2002). Ovako shvaćeni srednje i gornjotrijaski karbonatni kompleks odlikuje se postojanom debljinom i velikim lateralnom rasprostranjenošću. Istaloženi vapnenci su kasnijim dijagenetskim procesima transformirani u dolomite, a dijagenetskim i tektonskim procesima pretvorni u vodonosnike.

Primarna poroznost ili sinsedimentacijska poroznost u vapnencima i dolomitima razvijena je u više tipova: poroznost biogene skeletne rešetke, unutarzrnska i međuzrnska poroznost, fenestralna i sklonišna poroznost. Fenestralna i sklonišna poroznost mogu biti vrlo značajne pri razvoju sekundarne poroznosti jer dolomitizacija može značajno povećati propusnost ovog u pravilu slabopropusnog tipa poroznosti (MOORE, 1989). Uloga primarne poroznosti u hidrogeološkom smislu za sada nije dovoljno poznata, tj nije istraživana u ovim vodonosnicima. Pretpostavlja se da je njezina uloga u razvoju sekundarne poroznosti za vrijeme dijageneze bila

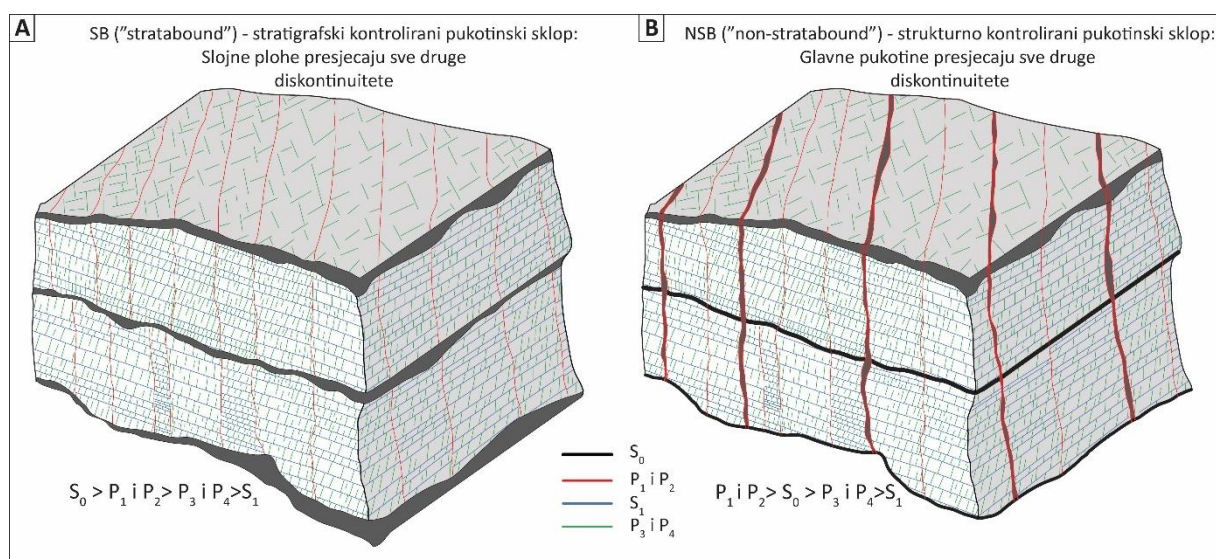
vrlo značajna. Prema dostupnim podacima (ŠESTANOVIĆ, 1993) kreće se u granicama između 1 i 3 %.

Sekundarna poroznost ili postsedimentacijska poroznost hidraulički je najznačajniji tip poroznosti ovog vodonosnika. Na temelju podataka terenskih istraživanja kao i literaturnih podataka može se sa sigurnošću reći da su razvijeni brojni tipovi ove poroznosti (interkristalna, moldička, šupljinska, kanalna, špiljska, prslinska, brečna, poroznost trošenja ...). Vrijednosti efektivne poroznosti procijenjene su promatranjem izdanaka u kamenolomima na 3 do 25 %. Iznos poroznosti djelomično je sedimentološki i dijagenetski uvjetovana a djelom tektonski. Njezina je uloga u hidrogeološkom smislu najznačajnija za tok podzemne vode. U prilog značajnoj sekundarnoj a i tercijarnoj poroznosti govore i brojni krški oblici razvijeni na površini ovog vodonosnika. Prisutne su vrtače što svjedoči o brzom vertikalnom poniranju vode u podzemlje. Zbog toga pojedine, ali ipak značajne dijelove možemo uvrstiti u krške vodonosnike. Razlog sigurno puno veće sekundarne poroznosti u odnosu na primarnu poroznost je i puno duže vrijeme tokom kojeg nastaje i razvija se sekundarna poroznost.

Transmisivnost i vodopropusnost kao i neki drugi hidrogeološki parametri za sada nisu dovoljno proučavani u istraživanom prostoru. Samo za ilustraciju mogu poslužiti vrijednosti određene interpretacijom pokusnog crpljenja u nekim zdencima u Hrvatskoj (primjer zdenca BV-1 u Vratnom-Kalnik, MAYER et al., 1994.) gdje su utvrđene vrijednosti koeficijenta transmisivnosti između  $T = 2,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  i  $T = 5,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Kako je zdencom zahvaćen samo dio dolomitnog vodonosnika na dubini između 400 i 430,3 m ispod površine terena, može se dati i gruba procjena koeficijenta vodopropusnosti od oko  $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ , što približno odgovara srednje zrnomo pijesku (Mayer, i dr., 1994.). VERBOVŠEK (2008, 2009) je dao vrijednosti hidrauličkih parametara za različite karbonatne vodonosnike srednjeg i gornjeg trijasa u Sloveniji na temelju podataka iz 397 bušotina i zdenaca u Sloveniji. Prosječne vrijednosti hidrauličke vodljivosti za srednje i gornjotrijaske dolomite su  $K = 5,32 \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (VERBOVŠEK, 2008, 2009).

Dolomitno-vapnenački vodonosnik u ovim područjima napaja se infiltracijom oborinskih voda dominantno iz topografski najviših područja u kojima je i najveća gustoća vrtača te najveća količina oborina. Infiltracija odnosno napajanje vodonosnika poniranjem oborinske vode nije kvantificirana. Površina vodonosnika na više područja često doseže znatne veličine, i u pravilu je prekrivena tankim, razrahljenim površinskim pokrivačem od šumskog tla. Pretpostavlja se da veliki dio oborinskih voda prodire u podzemlje. U prilog toj pretpostavci govori činjenica da su u dolomitnim terenima vrlo rijetke vododerine koje bi ukazivale na intenzivno površinsko otjecanje.

Tečenje vode u dolomitima se dominantno odvija kroz mreže pukotinskih sustava u velikom rasponu mjerila (od km do mm) što rezultira posebnim specifičnostima tečenja vode ali i izdašnosti izvora u dolomitima u odnosu na vapnence (Slika 11). Naime izdašnosti izvora u dolomitima često su niže od izdašnosti izvora u vapnencima no također su i puno manje oscilacije jer se tok ne odvija samo kroz preferirane puteve (kanali i rasjedni i pukotinski sustavi) nego kroz kompleksnu mrežu višedimenzionalnih pukotinskih sustava (Slika 11).



Slika 11. Tipovi pukotinskog sklopa srednje i gornjotrijaskih dolomita. A) SB sklop - slojne plohe presijecaju sve diskontinuitete. B) NSB sklop - pukotine p, presijecaju sve druge diskontinuitete (PAVIČIĆ, 2018).

U dolomitima je tok podzemne vode u najvećoj mjeri kontroliran geometrijom i povezanošću pukotinskog sustava, jer je matriksna propusnost često niska zbog dijagenetske rekristalizacije i cementacije, a dolomit je u pravilu manje sklon razvoju velikih krških kanala nego vapnenac. Voda se zato kreće prvenstveno kroz diskontinuitete (slojne plohe, pukotine i rasjede), pri čemu na brzinu i smjer toka presudno utječu otvorenost pukotina, njihov razmak, orijentacija i stupanj međusobnog presijecanja (povezanosti). Dobro povezane pukotine i rasjedne zone mogu djelovati kao preferencijalni drenažni putovi i lokalno omogućiti brži tok i veću izdašnost izvora, dok slabije povezani ili mineralno ispunjeni diskontinuiteti usporavaju tok i pojačavaju „rezervoarski“ karakter stijenskog masiva. Zbog takve heterogenosti, dolomitni vodonosnici često pokazuju izraženu prostornu varijabilnost propusnosti, male strukturne razlike na terenu mogu rezultirati velikim razlikama u izdašnosti i dinamici izvora.

### 8.3. Zone sanitarne zaštite izvora Bašinac

Izvorište Bašinac je locirano na sjeveroistočnom rubu Kupreško polje, u podnožju jugozapadne padine masiva Mala Plazenica, između zaseoka Čevići i Olovo, neposredno ispod ceste Kupres–Zlosela svega par stotina metara od lokacije predviđene za MFE postrojenje za proizvodnju magnezija. Ovo je poglavlje obrađeno jer za vrijeme izrade ove stručne analize traje postupak uključanja izvora Bašinac u javnu vodoopskrbu što je vidljivo iz ELABORAT ZAŠTITE IZVORIŠTA VODOOPSKRBNOG SUSTAVA OPĆINE KUPRES.

Hidrogeološka interpretacija oslanja se na regionalne geološke podloge (OGK, list Bugojno i prateća objašnjenja) te detaljnije mikro-tektonsko sagledavanje sliva. U dokumentu su izdvojena dva tektonska bloka (“A” i “B”) razdvojena većim normalnim rasjedom, uz naglašenu rasjednu zonu “1” regionalnog značaja, opisanu kao zdrobljena/brečasta i okršena zona širine do približno 50 m, koja bitno upravlja smjerovima i brzinama podzemnog tečenja te ponašanjem izvorišta u različitim hidrološkim stanjima.

U hidrogeološkom smislu, elaborat razlikuje slabo propusne klastične limnoglacialne naslage (dolomitni grus i gromade uz malo gline, tipično debljine nekoliko metara, lokalno i znatno više) te dobro propusne karbonatne stijene s pukotinskom i kavernožnom poroznošću, karakteristične za krš (ponikve/vrtače i zone brze infiltracije). Na temelju jednostavne bilance sliva navodi se približna površina oko 3 km<sup>2</sup>, srednje godišnje oborine oko 1300 l/m<sup>2</sup> i koeficijent infiltracije oko 0,3, iz čega se procjenjuje srednji protok  $Q_{sr} \approx 0,037 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $\approx 37 \text{ l/s}$ ), uz napomenu da dio voda može otjecati i prema drugim sustavima (spominje se smjer prema izvorima Plive preko neogenih naslaga).

Bašinac je opisan kao kaptirani stalni izvor s bunarskim zahvatom dubine 52 m; opis bušenja navodi prolazak kroz rasjednu zonu i okršene karbonate, a navodi se i postojanje istražne bušotine u blizini. U vodoopskrbnom sustavu zahvat radi crpno (uronjena crpka 25 kW), s prosječnim dnevnim radom oko 7 sati i prosječnom količinom crpljenja oko 2,5 l/s. Voda se vodi prema vodospremi “Kupres” iznad područja Riganca (navodi se kota oko 1230 m i volumen oko 500 m<sup>3</sup>), a izvorište je važan dio opskrbe dijela niske zone grada i pripadnih naselja, uz spomen planova širenja opskrbnog cjevovoda.

Za definiranje zona zaštite ključan je dio s trasiranjem podzemnih voda. Trasiranje je izvedeno sjeverno od Čardačice, uz stalni dotok vode za poniranje od oko 2,5 l/s (preljev iz rezervoara), a kao traser korišteno je 2,0 kg natriumfluoresceina uz praćenje fluorometrom. Zabilježena su tri maksimuma: prvi nakon približno 44 sata (što daje procijenjenu prividnu brzinu oko 589 m/dan), drugi nakon oko 92 sata (oko 279 m/dan) i treći nakon oko 139 sati (oko 183 m/dan). Elaborat dodatno objašnjava da se za zoniranje, radi "najnepovoljnijeg scenarija", mogu uzimati i konzervativnije brzine (npr. 1000 m/dan), dok se mjerena referentna vrijednost u dokumentu veže uz red veličine oko 580 m/dan.

Kakvoća vode prikazana je kroz tablične rezultate fizikalno-kemijskih i mikrobioloških analiza (mali vodostaj 2024.). U prikazanim parametrima navode se pH 7,5 i električna provodljivost 479  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , vrlo niska oksidativnost ( $\text{KMnO}_4$ )  $<0,5 \text{ mg/l O}_2$  te nitrati 2,95 mg/l (u odnosu na graničnu vrijednost 50 mg/l u tablici). U uzorku su teški metali prikazani ispod MDK, a mikrobiološki su ukupne koliformne bakterije 8 Cfu/100 ml, uz napomenu da E. coli nije izolirana.

Zone sanitarne zaštite definirane su u skladu s pravilnikom (S.N. FBiH 88/12) i činjenicom da se radi o krškom vodonosniku, gdje je moguć stroži i detaljniji režim zoniranja. I zona je najstroža zona zahvata i neposrednog okruženja, a u dokumentu je navedena površina I zone od 7.938,3 m<sup>2</sup> uz upućivanje na zemljišno-knjižne i grafičke priloge. II zona je postavljena kao zona brzog dotoka, uz oslonac na rezultate trasiranja (oko 0,58 km/dan), rekonstruirane pravce tečenja i hidrogeološke uvjete; za IIa zonu se navodi površina 317.404,5 m<sup>2</sup> (i ukupna dužina granice 2.192,3 m). Usto se predlaže IIb podzona na dijelu terena ocijenjenom kao vrlo osjetljiv (okršena površina s mogućim vremenom dotoka do izvorišta u velikim vodama kraćim od 1 dana), uz napomenu da prostor nije urbaniziran pa uspostava IIb zone ne traži značajna materijalna ulaganja. III zona obuhvaća preostali dio sliva do hidrogeološke razvodnice, a IV zona se za Bašinci izričito ne utvrđuje u nacrtu Odluke.

Ranjivost i rizici razrađeni su kroz kombinaciju kartiranja prirodne osjetljivosti (bodovanje litologije/hidrogeoloških svojstava, stupnja okršenosti, nagiba terena i oborina) i katastra postojećih/potencijalnih izvora onečišćenja. U katastru se izdvajaju eksploatacijsko polje mineralne sirovine (dolomit) površine 90.182 m<sup>2</sup> s pratećim aktivnostima, više stambenih objekata/zaseoka s nereguliranim otpadnim vodama te cestovna infrastruktura, pri čemu se magistralna cesta Kupres–Zlošela naglašava kao posebno osjetljiva jer je asfaltirana bez propisnih rigola za prihvata i kontrolu oborinskih voda s kolnika. Za procjenu rizika koristi se pristup COST 620 i indeks intenziteta rizika (RII) kao funkcija hazarda (HI) i prirodne ranjivosti ( $\pi$ ), uz

rangiranje od “vrlo malen” do “vrlo visoki” rizik; kao rezultat, prometnica Kupres–Zlosela u II zoni dobiva vrlo visoki rizik ( $R_{II} \approx 0,01$ ), dio objekata u II zoni visoki rizik (npr.  $R_{II} 0,015-0,025$ ), eksploatacijsko polje dolomita visoki rizik kad je aktivno ( $R_{II} \approx 0,025$ ) i srednji kad miruje ( $R_{II} \approx 0,032$ ), dok je nogometni stadion u III zoni procijenjen kao srednji rizik ( $R_{II} \approx 0,032$ ). Dodatno se procjenjuje “teret onečišćenja” preko ekvivalent stanovnika (ES), pri čemu ukupna procjena iznosi 122 ES (97 stanovnika + doprinos krupne stoke).

Mjere zaštite su prevedene u provedivi okvir kroz nacrt Odluke koji preuzima režime zabrana i dopuštenja (Z, S, SD) za različite aktivnosti po zonama, te kroz fazni pristup sanaciji prema razinama rizika. Elaborat predlaže provođenje mjera u tri faze; u prvoj fazi (prioritet, oko 1 godine) naglasak je na rješavanju otpadnih voda objekata u II zoni (nepropusne sabirnice, sanacije i organizirano pražnjenje ili kanalizacijsko rješenje), na mjerama za magistralnu cestu na dionici koja prelazi II zonu (u skladu s pravilnikom), te na postupanju s eksploatacijskim poljem prema rudarskim/projektnim obvezama. U drugoj fazi (oko 3 godine) obuhvaćaju se onečišćivači srednjeg rizika u III zoni s istom logikom kontrole otpadnih voda i upravljanja aktivnostima u prostoru. Monitoring količina navodi se kao automatski i vezan uz Agencija za slivno područje Jadranskog mora, dok plan monitoringa kakvoće predviđa periodična uzorkovanja u različitim hidrološkim stanjima i povremene proširene analize (npr. metali, mineralna ulja, fenoli, pesticidi). Procjena troškova provedbe mjera dana je okvirno na oko 330.000 KM, uz stavke poput informiranja dionika, rješavanja/obilježavanja i osiguranja I zone, sanacijskih zahvata (najveći dio), monitoringa kakvoće i nadzora nad provedbom.

Predviđena lokacija postrojenja za proizvodnju magnezija, prema dostupnom prijedlogu zoniranja sanitarne zaštite, smještena je na samoj granici predloženih II. i III. zone sanitarne zaštite izvorišta, što ovu poziciju čini posebno osjetljivom s aspekta zaštite podzemnih i površinskih voda. U skladu s odredbama **Pravilnika o načinu utvrđivanja uslova za određivanje zona sanitarne zaštite i zaštitnih mjera za izvorišta vode za javno vodosnabdijevanje stanovništva**, u zonama sanitarne zaštite se ograničavaju ili zabranjuju aktivnosti koje mogu ugroziti kvaliteta i zdravstvenu ispravnost vode, pri čemu je režim u II. zoni stroži (zabrane i stroga ograničenja), dok se u III. zoni određene aktivnosti mogu provoditi isključivo uz pojačane zaštitne mjere i strogi nadzor. S obzirom na karakter postrojenja i prateće aktivnosti (gradnja i rad postrojenja, manipulacija i skladištenje sirovina i pomoćnih materijala, zbrinjavanje i transport otpada), te imajući u vidu da se zahvat nalazi neposredno uz granicu zona u kojima se takve aktivnosti u pravilu ograničavaju ili zabranjuju, proizlazi da bi, **ukoliko predložene zone budu prihvaćene i utvrđene Odlukom**, postrojenje u ovakvom planiranom obliku i na predmetnoj



## Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija

lokaciji bilo nespojivo s propisanim režimom zaštite, odnosno ne bi se moglo izgraditi bez izmještanja zahvata izvan obuhvata zaštitnih zona.

## 8.4. Primjeri zimskog/planinskog turizma i rudarskih/industrijskih aktivnosti

Poglavlje je usmjereno na “stvarnu blizinu” – situacije u kojima se **aktivni rudarski zahvati, kamenolomi ili metalurška postrojenja** nalaze u istom prostoru s **planinskim/zimsko-turističkim naseljem ili skijaškom infrastrukturom**, u pravilu unutar nekoliko kilometara. U takvim uvjetima koegzistencija se ne može temeljiti na jednostavnom “bufferu” udaljenosti, nego na kombinaciji **prostornog planiranja po zonama rizika, kontinuiranog monitoringa, upravljanja prometom i transparentne komunikacije** prema lokalnoj zajednici i turističkom sektoru. Ispod su sažeto opisani primjeri koji ilustriraju različite industrijske tipove (podzemni rudnik, metalurška rafinerija, talioničko postrojenje, kamenolomi) i različite modele turističke funkcije (urbani zimski turizam, lokalna skijališta, regionalne zimske staze) (Slika 12).

### 1) Kiruna, Švedska – urbani zimski turizam uz podzemni rudnik željezne rude (LKAB)

Kiruna je jedan od najpoznatijih europskih slučajeva prostorne i funkcionalne “simbiotičke” povezanosti grada i rudnika. Kiruna Mine je veliki podzemni rudnik željezne rude u samom području Kirune, u vlasništvu LKAB-a. U ovom primjeru zimski turizam je primarno urbani i doživljajni (Arktik, snježne aktivnosti, Northern Lights), ali posebna specifičnost je da je industrija ugrađena i u turistički proizvod: destinacijska organizacija Kiruna Lapland nudi organizirane posjete LKAB-ovu Visitor Centru, pri čemu se posjetitelji autobusom prevoze iz turističkog centra izravno u planinu i do posjetiteljske razine unutar rudnika. Time se aktivna industrijska infrastruktura ne promatra samo kao “susjed” turizmu, nego i kao kontrolirana atrakcija koja podiže interes i razumijevanje rudarskog identiteta mjesta.

Ključna razlika Kirune u odnosu na druge primjere jest da koegzistencija ovdje uključuje **upravljanje geotehničkim rizikom na razini grada**. Širenje/produžetak eksploatacije uzrokuje **slijeganje/nesigurnost tla**, zbog čega je Kiruna poznata po dugoročnom programu premještanja dijelova grada. Upravo taj element pokazuje što znači “koegzistencija u blizini” u najrealnijem smislu: nije riječ o izostanku izazova, nego o tome da se izazovi rješavaju **planskim, faznim i institucionalno vođenim pristupom**, dok se turistička funkcija grada istovremeno održava i razvija (uključujući i industrijski turizam).

## 2) Reith im Alpbachtal / Brixlegg, Austrija – skijalište Reither Kogel u istoj dolini s metalurškom rafinerijom (Montanwerke Brixlegg)

U Tirolu je moguće u kratkom radijusu vidjeti klasičan alpski obrazac: **turizam na padinama i industrija u dnu doline**. Skijalište Reither Kogel opisuje se kao zimsko-sportsko područje “na rubu naselja Reith im Alpbachtal”, s ponudom poput noćnog skijanja. U neposrednoj blizini (u istom dolinskom sustavu) nalazi se **Montanwerke Brixlegg**, austrijska kompanija koja se profilira kao **postrojenje za preradu/“upcycling” bakra** s velikim brojem zaposlenih na lokaciji Brixlegg. Za ovu lokaciju je važno da je blizina i praktično potvrđena: Rome2rio navodi da je udaljenost između Brixlegga i Reitha oko **2 km**, što dobro ilustrira “<5 km” tipologiju u smislu naselje–postrojenje.

Koegzistencija se ovdje tipično oslanja na **morfološku separaciju** (industrijski kompleks u ravnijem dijelu doline, turističke aktivnosti na višim ekspozicijama), ali i na standarde okolišnog upravljanja. Montanwerke Brixlegg eksplicitno navodi da je njihov sustav upravljanja okolišem certificiran prema **ISO 14001**, što je važan institucionalni signal u turistički osjetljivim dolinama (gdje su kvaliteta zraka, buka i percepcija “čistoće” destinacije posebno osjetljive teme). Ovaj primjer je posebno koristan u benchmarkingu jer predstavlja **koegzistenciju turizma i metalurgije** (ne samo rudarstva/kamenoloma), pri čemu su “interface” rizici najčešće vezani uz **emisije u zrak, buku i promet**, odnosno upravljanje onim što turisti najlakše primijete.

## 3) Szklarska Poręba, Poljska – skijalište Szrenica i aktivni granitni kamenolom unutar urbanog prostora

Szklarska Poręba je snažan primjer jer pokazuje koegzistenciju u kojoj je industrijska aktivnost praktično “u gradu”, a ne “negdje u dolini”. Turistički, područje se oslanja na zimsku ponudu planine Karkonosze, a skijaška infrastruktura (Szrenica Ski Arena) promovira kilometre staza i sustave zasnježivanja. Istovremeno, znanstveni izvori navode da je **Szklarska Poręba Huta quarry lociran unutar grada Szklarska Poręba** te da je to trenutno jedino mjesto u poljskom dijelu masiva gdje se **eksploatira granit**, pretežito kao **arhitektonsko-građevni kamen**.

Upravo činjenica da se eksploatacija odvija “u sklopu grada” čini ovaj slučaj izuzetno relevantnim za vaš kriterij “< 5 km”: ovdje je fokus koegzistencije na **operativnoj disciplini** (upravljanje prašinom, bukom, vibracijama ako ih ima, radnim vremenima i rutama teretnog prometa) i na **percepcijskoj kompatibilnosti** (turistička destinacija mora zadržati doživljaj prirodnog okruženja i zimskog ugođaja, dok industrija mora dokazivati uredno upravljanje utjecajima). Ovaj primjer također pokazuje da turizam i eksploatacija često koegzistiraju najstabilnije kada su

**povijesno ukorijenjeni u istoj lokalnoj ekonomiji** – tj. kada industrijska aktivnost nije “nova” u prostoru turizma, nego dugotrajna i regulirana.

#### **4) Rucas / Montoso (Bagnolo Piemonte), Italija – skijalište u području aktivnih kamenoloma “Pietra di Luserna”**

U Pijemontu, na području Bagnolo Piemonte–Montoso–Rucas, koegzistencija industrije i zimskog turizma često je čak eksplicitno komunicirana kroz lokalne rute i interpretaciju prostora. Visit Cuneese navodi da se **RucaSki nalazi na visoravnima Bagnolo Piemonte, “samo 5 km od Montosa”**, čime se potvrđuje vrlo bliska veza između skijaške točke i obližnjeg naselja Montoso. Istovremeno, lokalna stranica Montoso opisuje da su u tom području **aktivni mnogi poznati kamenolomi “Pietra di Luserna”**. Turističko-skijaški opis na OnTheSnow dodatno naglašava da je skijalište Rucas smješteno **u području gdje mnogi poznati bagnolo kamenolomi još uvijek rade**, što je rijetko eksplicitno “spajanje narativa” turizma i industrije u jednoj rečenici.

Ovaj primjer je posebno koristan za benchmarking jer pokazuje “pragmatičnu koegzistenciju” kroz tri elementa: (1) **topografsku segmentaciju** (kamenolomi i skijaške točke mogu biti u istom bazenu, ali na različitim mikro-lokacijama/visinama), (2) **lokalnu ekonomsku međuovisnost** (kamen i turizam su oba dio identiteta), te (3) **turističku interpretaciju industrijskog krajolika** (npr. tematske rute koje vode prema kamenolomima i povezuju naselja, kamenolome i rekreacijske točke). To je primjer gdje industrija nije nužno “skrivena”, nego se kroz planiranje i kulturni kontekst može “uklopiti” u širi doživljaj destinacije.

#### **5) Sauda, Norveška – zimska destinacija i talioničko postrojenje u samom gradskom središtu (Eramet / Sauda Smelteverk)**

Sauda predstavlja model u kojem je industrija izravno u urbanoj jezgri: Sauda Smelteverk opisan je kao **talioničko postrojenje smješteno u gradu Sauda**. Operater Eramet za lokaciju Sauda navodi da je postrojenje njihov ključni proizvođač u segmentu manganovih legura (feromangan) te ističe i energetske/klimatske projekte (npr. pilot postrojenje za hvatanje ugljika). Turistički, Sauda je prepoznata kao zimska destinacija s alpskim i nordijskim sadržajima; Visit Norway navodi da je Sauda Ski Centre u Svandalenu **oko 8 km od centra grada**, dok Wikipedia za Sauda Skisenter navodi **oko 5 km od grada Sauda**. Iako to znači da “ski-padine” mogu biti na rubu vašeg strožeg kriterija od 5 km, ključna poruka slučaja Saude je da se **urbani zimski turizam i svakodnevni život destinacije odvijaju uz industrijski kompleks u gradu**, dok se skijaška infrastruktura nalazi u neposrednom planinskom zaleđu.

Sauda je također primjer u kojem se jasno vidi važnost okolišnog upravljanja u blizini turizma. NORCE je početkom 2026. objavio da surađuje s Eramet Norway Sauda na smanjenju emisija industrijske prašine (“virtually dust-free”), što pokazuje kako se industrija u turistički osjetljivom prostoru često oslanja na **istraživačko-razvojne i monitoring projekte** kako bi održala društvenu licencu za rad. Dodatno, Eramet komunicira da postrojenje u Saudi, osim proizvodnje legura, **doprinosi lokalnoj zajednici kroz recikliranu električnu i toplinsku energiju, uključujući i daljinsko grijanje javnih zgrada, gradskih ulica i sportskih objekata**, što je dobar primjer “pozitivne integracije” industrije u funkcije turističkog grada.

### Zaključna sinteza iz pet primjera

Promatrani slučajevi pokazuju da je koegzistencija industrije i zimskog/brdskog turizma u radijusu <5 km realna, ali je stabilna samo kada se upravlja kroz **instrumente visoke razine**: (a) prostorno planiranje temeljeno na zonama rizika (posebno u Kiruni zbog slijeganja), (b) kontinuirani monitoring i transparentna komunikacija (naglašeno u Saudi kroz projekte prašine i okolišne mjere), (c) prometna i logistička kontrola (kritično u kamenolomima unutar/uz turistička naselja), (d) sezonska prilagodba operacija te (e) jasno sidrena usklađenost i certificirani sustavi upravljanja okolišem (vidljivo npr. kod Montanwerke Brixlegg kroz ISO 14001). Drugim riječima, “blizina” ne nestaje, ona se upravlja. A ono što ove primjere čini benchmark-korisnima za projekte jest činjenica da svaki od njih demonstrira različitu dominantnu rizik-os: **tlo i slijeganje (Kiruna), zrak/buka u dolini (Brixlegg/Reith), prašina i percepcija unutar grada (Szklarska Poręba), promet i krajobrazna kompatibilnost (Rucas/Montoso), te industrijska prašina i integracija energije u urbane funkcije (Sauda).**

## Mining & Tourism: < 5 km Cohabitation Cases in Europe

Kiruna, Sweden	Szklarska Poręba, Poland	Reith im Alpbachtal, Austria
Iron Ore Mine & Arctic Tourism	Granite Quarry & Ski Resort	Copper Plant & Ski Area
		
Distance to Town: ~1.6 km	Distance to Quarry: ~2.2 km	Distance to Plant: ~1.45 km
 		
 Mining Site	 Tourism Area	 Distance < 5 km

Slika 12. Primjeri kohabitacije turizma i rudarske/industrijske aktivnosti (ilustracija).

## 9. MOGUĆI UTJECAJI NA OKOLIŠ TE OKOLIŠNI MONITORINZI I ISTRAŽIVANJA KOJIMA SE KONTROLIRA UTJECAJ NA OKOLINU

Hidrogeološka istraživanja predstavljaju temelj za planiranje zaštite krških izvora i optimizaciju njihove uporabe. U ovom slučaju mjere zaštite okoliša mogu se podijeliti u dvije kategorije:

1) Istraživačke aktivnosti pomoću kojih bi se izradio 3D geološki model podzemlja te utvrdile hidrauličke veze između pojedinih ponora i izvora odnosno područja prihranjivanja i područja istjecanja te brzine toka podzemne vode. Nekoliko je uobičajenih metoda koje se mogu koristiti no važno je da se provode sinergijski jer jedna metoda sama za sebe ne može dati potpunu sliku o geološkoj i hidrogeološkoj građi podzemlja. Među njima se ističu:

i) **Geofizička istraživanja** predstavljaju nezamjenjiv element u proučavanju podzemnih voda, osobito u krškim terenima karakteriziranim kompleksnim pukotinskim sustavima. Primarni cilj takvih istraživanja je definirati geometriju rasjednih zona. Integracijom geofizičkih s drugim podacima postiže se preciznija karakterizacija podzemnih uvjeta i znatno povećava pouzdanost hidrogeološkog modela. Metode dovoljno visoke razlučivosti su metoda električne tomografije (ERT) i audio–magnetotelurske (AMT) metoda za dublje zahvate (preko 170 m). Među njima, ERT predstavlja temeljnu metodu u krškim istraživanjima jer omogućuje učinkovito kartiranje varijacija otpornosti podzemlja (CARRIÈRE et al., 2013; ZHU et al., 2011; EPTING et al., 2009ab; EPTING et al., 2012). Međutim, akvizicija ERT podataka postaje otežana na dubinama većim od 150 m, pa se metoda AMT integrira kako bi proširila dubinu istraživanja (KRIVOCHIEVA & CHOUTEAU, 2003).

ii) **Trasiranje podzemnih voda**, prirodnim i/ili umjetnim traserima, među najznačajnijim su istraživačkim alatima za dobivanje uvida u strukturu i hidrogeokemijsku dinamiku vodonosnika. Tehnike trasiranja uključuju dodavanje definirane količine traseru u ponorne tokove i praćenje njegovog pojavljivanja na nizvodnim izvorima ili kanalima. Analize vremena transporta i bilance mase traseru omogućuju određivanje aktivnih kanala, brzina strujanja i hidrodinamičkih poveznica.

iii) **Hidrogeološka i hidrokemijska istraživanja** u krškim područjima usmjerena su na razumijevanje složenih odnosa između površinskih i podzemnih voda, identifikaciju vodonosnika, smjerova i dinamike toka te procjenu ranjivosti sustava na onečišćenje. Zbog izrazite heterogenosti i anisotropije krških sustava, standardni istraživački pristupi u kršu kombiniraju geološka, hidrološka, hidrogeološka, geokemijska i izotopna ispitivanja, uz često korištenje trasera i dugotrajnog monitoringa.

Osnovu hidrogeoloških istraživanja čini detaljna geološka i strukturna analiza, kojom se identificiraju litološke jedinice, rasjedi, pukotinski sustavi, kontaktne zone između različitih stijena te potencijalni putovi infiltracije i drenaže. Na temelju tih podataka izrađuje se konceptualni hidrogeološki model, koji definira tip vodonosnika (pukotinski, kavernozi ili mješoviti), njegove granice, zone napajanja i pražnjenja te hidrauličku povezanost s površinskim vodama.

Hidrološka komponenta istraživanja uključuje praćenje oborina, površinskih tokova i krških izvora, s naglaskom na varijabilnost protoka i odgovor sustava na oborinske događaje. U kršu se često bilježe brzi i nelinearni odgovori izvora na kišu, što ukazuje na postojanje brzih drenažnih putova, ali i sporijih rezervoarskih komponenti u pukotinskoj i matricnoj poroznosti.

Za kvantitativnu procjenu dinamike toka podzemnih voda primjenjuju se hidraulička mjerenja (razine podzemne vode, izdašnosti izvora, temperaturni i električnokonduktivni signali), kao i traserski pokusi (boje, soli ili prirodni traseri). Međutim, u posljednjim desetljećima sve važniju ulogu imaju izotopne metode, osobito analize stabilnih izotopa kisika ( $\delta^{18}\text{O}$ ), koje omogućuju uvid u porijeklo vode, vrijeme zadržavanja i brzinu infiltracije bez umjetnog zadiranja u sustav.

Stabilni izotop kisika ( $^{18}\text{O}$ ) prirodno je prisutan u vodi, a njegov omjer u odnosu na lakši izotop ( $^{16}\text{O}$ ) izražava se kao  $\delta^{18}\text{O}$  vrijednost. Izotopni sastav oborina varira sezonski i prostorno, ovisno o temperaturi, nadmorskoj visini, udaljenosti od mora i količini oborina. U pravilu, zimske oborine i oborine na većim nadmorskim visinama imaju niže (negativnije)  $\delta^{18}\text{O}$  vrijednosti, dok su ljetne oborine izotopno teže.

Analizom  $\delta^{18}\text{O}$  u oborinama, površinskim vodama i podzemnim vodama moguće je pratiti prijenos izotopnog signala iz atmosfere u podzemlje. U krškim sustavima, brza infiltracija kroz ponore, pukotine i otvorene kanale rezultira relativno brzim prijenosom sezonskog izotopnog signala oborina u izvore i podzemne vode. U takvim slučajevima, izotopni sastav izvora pokazuje izražene sezonske oscilacije, s malim vremenskim pomakom u odnosu na oborine, što upućuje na kratko vrijeme zadržavanja i velike brzine toka.

Suprotno tome, u dijelovima krškog sustava gdje dominira sporija infiltracija kroz pukotinsku i matriksnu poroznost, sezonske varijacije  $\delta^{18}\text{O}$  signala su prigušene ili gotovo izbrisane. Podzemne vode tada pokazuju stabilne izotopne vrijednosti koje predstavljaju mješavinu višegodišnjih oborina, što omogućuje procjenu duljeg vremena zadržavanja vode u sustavu. Analizom amplitude i faznog pomaka izotopnog signala između oborina i podzemnih voda može se kvantitativno procijeniti brzina infiltracije i prosječno vrijeme boravka vode.

U kombinaciji s izotopima vodika ( $\delta^2\text{H}$ ) i dodatnim geokemijskim parametrima (temperatura, električna vodljivost, glavni ioni),  $\delta^{18}\text{O}$  analize omogućuju razlikovanje različitih izvora napajanja (npr. lokalne oborine, topljenje snijega, površinski tokovi), identifikaciju miješanja voda te procjenu udjela brzih i sporih komponenti toka u krškom vodonosniku. Takav integrirani pristup posebno je vrijedan u studijama utjecaja na okoliš, jer omogućuje neinvazivnu procjenu ranjivosti vodonosnika i potencijalnih putova širenja onečišćenja.

Analize stabilnih izotopa kisika predstavljaju snažan alat za razumijevanje infiltracijskih procesa i brzine podzemnog toka, osobito u složenim krškim sustavima gdje su konvencionalne hidrauličke metode često ograničene. Njihova primjena značajno doprinosi pouzdanoj interpretaciji hidrogeoloških uvjeta i donošenju informiranih odluka u planiranju zahvata i zaštiti okoliša.

iv) Trodimenzionalni (3D) geološki i hidrogeološki modeli predstavljaju suvremeni i integrirani pristup analizi podzemlja, osobito u složenim krškim područjima gdje su prostorni odnosi litologije, struktura i hidrogeoloških značajki izrazito heterogeni. Cilj 3D modeliranja je objediniti sve raspoložive prostorne i tematske podatke u koherentan digitalni model koji omogućuje realističan prikaz geološke građe, geometrije vodonosnika, granica između hidrogeoloških jedinica te putova toka podzemne vode. Geološki 3D model predstavlja temelj za izradu 3D hidrogeološkog modela, u kojem se litološke jedinice reinterpreteraju u hidrogeološke domene prema njihovim hidrauličkim svojstvima, kao što su poroznost, propusnost, skladišni kapacitet i stupanj okršenosti. U kršu se pritom često razlikuju zone matriksne, pukotinske i kavernozone poroznosti, koje se u modelu mogu prikazati kao zasebni volumeni ili kao prostorno promjenjiva hidraulička svojstva unutar iste jedinice. Posebno je važno uključiti utjecaj rasjednih zona, koje mogu imati ulogu preferencijalnih putova toka ili, suprotno tome, djelovati kao hidrauličke barijere. U kontekstu studija utjecaja na okoliš, 3D geološko i hidrogeološko modeliranje ima ključnu ulogu u procjeni ranjivosti vodonosnika i potencijalnih putova širenja onečišćenja. Prostorni modeli omogućuju simulaciju različitih scenarija, poput promjena u

režimu oborina, zahvata u prostoru, eksploatacije mineralnih sirovina ili izvanrednih događaja (npr. akcidentalna onečišćenja). Integracijom modela toka podzemne vode s modelima transporta tvari moguće je procijeniti brzinu i smjer širenja zagađivala, vrijeme dolaska do osjetljivih točaka (izvori, bušotine) te učinkovitost prirodnih zaštitnih mehanizama.

Zaključno, 3D geološko i hidrogeološko modeliranje predstavlja nezaobilazan alat u modernim hidrogeološkim istraživanjima krša. Ono omogućuje integrirano razumijevanje prostorno složenih sustava, transparentnu interpretaciju dostupnih podataka i pouzdanu podlogu za donošenje odluka u planiranju zahvata, upravljanju vodnim resursima i procjeni utjecaja na okoliš. U studijama utjecaja na okoliš takvi modeli ne služe samo kao prikaz postojećeg stanja, već i kao prediktivni alat za procjenu budućih promjena i rizika.

Kontinuirani monitoring okolišnih parametara nakon puštanja pogona u rad koji se projektiraju na temelju provedenih istraživanja te utvrđenih hidrauličkih veza ponora, lokacije pogona i izvora. Među njima se ističu:

## 2. Aktivnosti javno dostupnog okolišnog monitoringa;

i) **Monitoring kemijskog stanja vode na glavnim izvorima** (automatski logeri i periodičke kemijske analize) predstavlja važnu komponentu hidrogeoloških istraživanja i zaštite vodnih resursa u krškim područjima. Sustavni i dugoročni monitoring omogućuje pravodobno prepoznavanje promjena u kvaliteti vode, procjenu prirodne varijabilnosti sustava te identifikaciju potencijalnih izvora onečišćenja. Standardni pristup monitoringu kemijskog stanja krških izvora temelji se na kombinaciji kontinuiranih mjerenja pomoću automatskih logera i periodičkih laboratorijskih kemijskih analiza. Ovakav integrirani pristup omogućuje istovremeno praćenje brzih, kratkotrajnih promjena i dugoročnih trendova u kemijskom režimu izvora. Automatski logeri postavljeni na izvorima ili u izvorišnim zonama kontinuirano mjere osnovne fizikalno-kemijske parametre, kao što su temperatura vode, električna vodljivost, pH, mutnoća i, po potrebi, koncentracija otopljenog kisika. Mjerenja se provode u kratkim vremenskim intervalima (od nekoliko minuta do jednog sata), čime se dobiva visoko-rezolucijski vremenski niz podataka. U krškim sustavima takvi podaci su osobito vrijedni jer omogućuju detekciju naglih promjena povezanih s oborinama, topljenjem snijega ili iznenadnim dotocima površinske i/ili otpadne vode. Periodičke kemijske analize, koje se provode uzorkovanjem izvorske vode u redovitim vremenskim razmacima (npr. mjesečno, sezonski ili u hidrološki značajnim trenucima), nadopunjuju kontinuirani monitoring detaljnim uvidom u kemijski sastav vode. Laboratorijske

analize obuhvaćaju glavne katione i anione, hranjive tvari, elemente u tragovima te, prema potrebi, specifične pokazatelje onečišćenja.

Integracija kontinuiranog i periodičkog monitoringa omogućuje izgradnju pouzdanog referentnog stanja kemijskog režima izvora, što je posebno važno prije provedbe planiranih zahvata u prostoru. Takav referentni okvir služi kao osnova za buduće usporedbe i procjenu utjecaja, ali i kao alat za ranu detekciju nepovoljnih promjena. U studijama utjecaja na okoliš, ovakav sustav monitoringa predstavlja ključni mehanizam za upravljanje rizicima, jer omogućuje pravodobno reagiranje i prilagodbu mjera zaštite vodnih resursa.

Monitoring kemijskog stanja krških izvora, temeljen na kombinaciji automatskih logera i periodičkih kemijskih analiza, predstavlja nužan i učinkovit pristup za razumijevanje funkcioniranja krških vodonosnika i njihovu zaštitu. Takav pristup omogućuje sveobuhvatno praćenje kratkoročnih promjena i dugoročnih trendova, osiguravajući kvalitetnu podlogu za donošenje odluka u planiranju zahvata i očuvanju okoliša.

**ii) Mjerenja i monitoring emisije prašine** predstavljaju dio su procjene i kontrole utjecaja postrojenja za proizvodnju magnezija na okoliš i zdravlje stanovništva. Sustavni monitoring ovih utjecaja nužan je za provjeru usklađenosti s propisanim graničnim vrijednostima, procjenu učinkovitosti mjera zaštite te pravodobno prepoznavanje nepovoljnih promjena u okolišu. Mjerenja emisije prašine obuhvaćaju praćenje koncentracija lebdećih čestica različitih frakcija, s posebnim naglaskom na ukupnu suspendiranu prašinu (TSP) te frakcije  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$ , koje imaju najveći potencijalni utjecaj na zdravlje ljudi. Monitoring se provodi kombinacijom kontinuiranih mjernih uređaja postavljenih na glavnim točkama emisije i periodičkih mjerenja u okolišu, osobito u naseljenim područjima i osjetljivim zonama u okolici postrojenja. Kontinuirana mjerenja emisije prašine omogućuju praćenje varijabilnosti emisija u realnom vremenu i povezivanje uočenih promjena s pojedinim fazama tehnološkog procesa ili meteorološkim uvjetima. Periodička mjerenja, koja se provode u skladu s važećim normama i metodologijama, služe za verifikaciju rezultata i procjenu dugoročnih trendova. Dobiveni podaci koriste se za ocjenu učinkovitosti tehničkih mjera smanjenja emisija, poput filtera, zatvorenih transportnih sustava i sustava za ovlaživanje materijala.

**iii) Mjerenja i monitoring buke** u postrojenju za proizvodnju magnezija provode se s ciljem utvrđivanja razina buke koje potječu od tehnološke opreme, prometnih aktivnosti i manipulacije materijalima. Glavni izvori buke uključuju drobilice, mlinove, ventilatore,

transportne trake i vozila za prijevoz sirovina i gotovih proizvoda. Mjerenja se provode na reprezentativnim mjernim mjestima unutar postrojenja i na granici zahvata, kao i u najbližim naseljenim područjima, uzimajući u obzir dnevne i noćne uvjete rada. Standardni postupci mjerenja buke obuhvaćaju određivanje ekvivalentne razine buke u određenim vremenskim razdobljima, pri čemu se posebna pažnja posvećuje razlici između dnevnog, večernjeg i noćnog režima. Rezultati mjerenja uspoređuju se s propisanim graničnim vrijednostima kako bi se procijenila potreba za dodatnim mjerama zaštite, poput zvučnih barijera, akustične izolacije opreme ili organizacijskih mjera smanjenja buke. Integrirani pristup mjerenju emisije prašine i buke omogućuje cjelovitu procjenu utjecaja cementare na okoliš i kvalitetu života lokalnog stanovništva.

Mjerenja emisije prašine i buke u postrojenjima za proizvodnju cementa predstavljaju nužan alat za osiguranje okolišne prihvatljivosti industrijskih aktivnosti. Sustavni monitoring, u kombinaciji s tehničkim i organizacijskim mjerama smanjenja emisija, omogućuje usklađenost s propisima, smanjenje negativnih utjecaja na okoliš i doprinos održivom razvoju industrije cementa.

**iv) Postavljanje sustava za pročišćavanje otpadnih voda** na izlazu iz postrojenja za proizvodnju magnezija predstavlja ključnu mjeru zaštite vodnog okoliša i osiguravanja usklađenosti industrijskih aktivnosti s važećim okolišnim propisima. Tehnološki procesi u proizvodnji magnezija, koji uključuju preradu mineralnih sirovina i termičke postupke te hlađenje i ispiranje opreme, mogu generirati otpadne vode promijenjenog kemijskog sastava, povišene mineralizacije i sadržaja suspendiranih tvari. Bez odgovarajuće obrade, takve vode mogu imati nepovoljan utjecaj na površinske i podzemne vodne sustave, osobito u osjetljivim područjima poput krša.

Sustav pročišćavanja otpadnih voda projektira se s ciljem uklanjanja ili smanjenja onečišćujućih tvari prije ispuštanja vode u okoliš ili njezina ponovnog korištenja u tehnološkom procesu. Na izlazu iz postrojenja obično se postavlja centralna jedinica za obradu otpadnih voda, koja integrira više stupnjeva pročišćavanja, ovisno o količini i karakteru nastalih otpadnih voda. Prvi stupanj najčešće uključuje mehaničko pročišćavanje, kojim se uklanjaju krupne suspendirane čestice i talog, čime se štiti daljnja oprema i stabilizira rad sustava.

U sljedećim fazama provodi se obrada, prilagođena specifičnostima otpadnih voda iz proizvodnje magnezija. Ova obrada može uključivati neutralizaciju pH vrijednosti, uklanjanje otopljenih soli, metala ili drugih specifičnih komponenti nastalih tijekom procesa. Posebna se pažnja posvećuje regulaciji alkalnosti i ukupne mineralizacije vode, kako bi se spriječili negativni utjecaji na

recipijent ili na sustave ponovne uporabe vode. U pojedinim slučajevima primjenjuju se i napredni postupci obrade, poput filtracije, taloženja ili membranskih tehnologija, kada je potrebno postići visoku razinu kakvoće ispuštene vode.

Postavljanje pročišćivača na izlazu iz postrojenja omogućuje kontrolirano ispuštanje otpadnih voda u okoliš, uz stalno praćenje ključnih pokazatelja kakvoće vode. Sustav se u pravilu nadopunjuje mjernim mjestima i opremom za uzorkovanje, čime se omogućuje redoviti monitoring protoka i kemijskog sastava pročišćenih voda. Ovakav pristup osigurava pravodobno uočavanje odstupanja od propisanih graničnih vrijednosti i omogućuje brzo poduzimanje korektivnih mjera.

U kontekstu studija utjecaja na okoliš, postavljanje pročišćivača vode predstavlja jednu od osnovnih mjera ublažavanja negativnih utjecaja industrijskog postrojenja. Sustav pročišćavanja značajno smanjuje opterećenje vodnih tijela onečišćujućim tvarima, čime se štiti kakvoća površinskih i podzemnih voda te očuvanje ekosustava nizvodno od ispušta. Posebno je važna njegova uloga u krškim područjima, gdje zbog brze hidrauličke povezanosti i ograničene prirodne filtracije postoji povećan rizik od širenja onečišćenja.

Osim zaštite okoliša, pročišćivači vode doprinose i održivosti proizvodnog procesa, jer omogućuju djelomičnu ili potpunu recirkulaciju vode unutar postrojenja, smanjujući ukupnu potrošnju svježe vode. Time se postižu i ekonomske koristi, uz istodobno smanjenje pritiska na lokalne vodne resurse.

Zaključno, postavljanje pročišćivača vode na izlazu iz postrojenja za proizvodnju magnezija predstavlja tehnički i okolišno nužnu mjeru kojom se osigurava kontrolirano upravljanje otpadnim vodama, smanjenje negativnih utjecaja na okoliš i usklađenost s načelima održivog razvoja. U studijama utjecaja na okoliš takav sustav ima ključnu ulogu kao preventivna i zaštitna mjera za očuvanje vodnih resursa i okoliša u cjelini.

## 10. ZAKLJUČAK

Planirani projekt postrojenja za proizvodnju magnezija na području Kupresa, promatran u širem kontekstu europske industrijske politike, predstavlja strateški važan korak prema jačanju sigurnosti opskrbe i smanjenju ovisnosti o uvozu kritičnih i strateških mineralnih sirovina. Magnezij je ključan metal za više industrijskih lanaca vrijednosti, a globalna ponuda je izrazito koncentrirana na uvoz iz Kine, zbog čega se rizici opskrbe (tržišni i geopolitički) prelijevaju na europsku industriju te dodatno naglašavaju potrebu za razvojem vlastitih proizvodnih kapaciteta uz tehnologije kompatibilne s ciljevima dekarbonizacije i kružnog gospodarstva.

U tom okviru, ova stručna analiza je postavljena kao multidisciplinarna, znanstveno utemeljena procjena potencijalnih utjecaja projekta na okoliš, s naglaskom na osjetljiv krški sustav Kupreške visoravni. Analizirani su prirodni uvjeti (geološke i hidrogeološke značajke), sirovinska osnova i značajke eksploatacije u obližnjem kamenolomu, tehnološki koncept postrojenja, energetske i vodne potrebe te potencijalni rizici za podzemne vode, zrak i gospodarenje materijalnim tokovima. Također, analizirana je sva dokumentacija eksploatacijskog polja dolomita, Grguljača. Takav pristup daje stručnu podlogu za informirano odlučivanje investitora, nadležnih tijela i lokalne zajednice, posebno u dijelu koji se odnosi na ranjivost krških vodonosnika. **Iako je poseban naglasak stavljen na utjecaj na okoliš na područje Kupresa, stručna analiza je primjenjiva za bilo koju potencijalnu lokaciju gdje je projekt postrojenja u skladu s prostorno planskom dokumentacijom.**

Analiza tehnoloških opcija i odabranog tehnološkog rješenja upućuje na to da je aluminotermijska redukcija, uz prethodno razdvajanje Ca–Mg i snažno oslanjanje na elektrifikaciju procesa, najpovoljniji proces u usporedbi s tradicionalnim metodama proizvodnje magnezija. Tehnološki slijed je definiran kroz kalcinaciju dolomita, separaciju Ca/Mg uz korištenje vlastitog uhvaćenog CO<sub>2</sub>, aluminotermijsku redukciju MgO u kontroliranim uvjetima, kondenzaciju i rafiniranje metala te organiziranu proizvodnju koprodukata (PCC, CO<sub>2</sub>/suhi led, Mg–Al spinel). Konceptualno, proces je projektiran kao alternativa klasičnim tehnološkim procesima (npr. Pidgeon) upravo kroz minimiziranje otpada i veće mogućnosti valorizacije nusproizvoda što postupak čini isplativim i okolišno prihvatljivim.

Ključno je da dostupna projektna i okolišna dokumentacija, kako je analizirana u stručnoj analizi, opisuje postrojenje kao sustav koji je usmjeren prema minimalnom utjecaju na okoliš: predviđeni su zatvoreni kružni tokovi vode, sustavi hvatanja i uporabe CO<sub>2</sub> te tržišna valorizacija nus-

produkata. Time se ostvaruje „zero waste“ pristup u smislu da se dominantni tokovi nusproizvoda planiraju plasirati na tržište, dok se jedini značajniji čvrsti tok (troska iz završne rafinacije) predaje ovlaštenom oporabilju, bez potrebe za trajnim odlaganjem. Industrijske analize na trijaskom kupreškom dolomitu pritom potvrđuju kvalitetu proizvoda (čistoća Mg 99,98 %), što je snažan dokaz izvedivosti u operativnom smislu no i glavni razlog odabira ove lokacije za planirano postrojenje.

Operativna zrelost tehnologije dodatno je potkrijepljena činjenicom da se proces oslanja na validirane aluminotermijske platforme i recentne demonstracije, zbog čega se u dokumentima navode ocjene tehnološke spremnosti u rasponu TRL 8–9. Projekt na TRL 8–9 obično uključuje kasnu fazu inovacije: testiranje, demonstraciju, pilotiranje, veliku validaciju proizvoda te korake potrebne za tržišno uvođenje ili redovitu operativnu primjenu. To proizlazi iz Horizon Europe opisa Innovation Actions i Innovation and Market Deployment Actions, koji obuhvaćaju prototipiranje, testiranje, demonstraciju, pilotiranje, veliku validaciju proizvoda, tržišnu replikaciju i aktivnosti potrebne za uvođenje inovacije na tržište.

U kombinaciji s potvrđenom čistoćom magnezija, zatvorenim sustavima kondenzacije (radi smanjenja reoksidacije i gubitaka) te kompatibilnošću s visokim stupnjem automatizacije, projekt se može ocijeniti kao tehnološki visoko razvijen, uz jasno prepoznate „točke pažnje“ koje je potrebno dodatno razraditi kroz dopunu dokumentacije i ciljane verifikacije na terenu.

Sirovinska osnova projekta temelji se na srednje i gornjotrijaskim dolomitima Kupresa, a eksploatacijsko polje Grguljača, prema analiziranoj dokumentaciji, raspolaže potrebnom rudarsko tehničkom dokumentacijom i važećim rješenjima za legalan rad. Istodobno je naglašeno da je kamenolom u ovoj fazi (nositelj koncesije „DOLOMIT“ d.o.o. Kupres) odvojeni, gospodarski nevezani entitet u odnosu na investitora planirane tvornice („BH Magnezij & Minerali“ d.o.o. Kupres), što je važno za razumijevanje odgovornosti, upravljačkih mehanizama i ugovornih odnosa u lancu opskrbe sirovinom. Iako su trenutačno odvojeni subjekti, projekt BH Magnezij predviđa integraciju kamenoloma i tvornice, pravno i ekonomski, što znači da bi postali jedinstven subjekt sa zajedničkom odgovornošću.

Prema podacima iz Studije utjecaja na okoliš planirane tvornice za preradu dolomita (Zagreb Inspekt d.o.o. 2024.), za proizvodnju magnezija potrebno je 195.000 tona dolomita godišnje, što predstavlja približno 70 000 m<sup>3</sup> stijene u sraslom (čvrstom) stanju, uz utvrđenu obujamnu (zapreminsku) masu dolomita od 2.787 kg/m<sup>3</sup>. Vidljivo je da količina dolomita potrebna za

proizvodnju magnezija iznosi 70 % dozvoljene godišnje eksploatacije. Potvrđene bilančne rezerve iznose oko 1,43 milijuna m<sup>3</sup>, što upućuje na dugoročnu održivost opskrbe sirovinom.

Maseno energetske osnove procesa u dokumentu su prikazane kao koherentne, s jasno povezanim tokovima dolomit → PCC/CO<sub>2</sub> i Al → spinel, te sa stabilnom bilancom ulaza/izlaza. Za projektirani godišnji kapacitet od 15.000 t Mg navedeni su i godišnji tokovi glavnih ulaza/izlaza (dolomit, aluminij, rafinacijska troska, spinel, PCC i CO<sub>2</sub>), čime se potvrđuje da je „zero-waste“ koncept oslonjen na realne i kvantificirane tokove koprodukata. Posebno je značajno da se iz uhvaćenog CO<sub>2</sub> od kalcinacije planira proizvoditi suhi led kao tržišni nusproizvod, dok se PCC (precipitirani CaCO<sub>3</sub>) javlja kao velik i komercijalno relevantan tok, što je bitno i za ekonomiku i za okolišni profil projekta.

Energetska bilanca također je u dokumentu prikazana kao dosljedna: navodi se približno 226,3 GWh/god električne energije (oko 15,1 kWh/kg Mg) te potreba goriva za kalcinaciju (izražena kroz ekvivalent prirodnog plina). Istodobno je eksplicitno istaknuta potreba za standardizacijom jedinica i dosljednim prikazom pojedinih energenata u projektnoj dokumentaciji (npr. različiti načini navođenja količina goriva), kako bi se izbjegle interpretacijske nejasnoće i kako bi se energetski proračun mogao transparentno pratiti kroz faze projektiranja, ishoda dozvola i kasnijeg pogona. Takva dorada dokumentacije nije prepreka izvedivosti, ali jest nužan korak za regulatornu i stručnu vjerodostojnost projekta.

Najosjetljiviji segment projekta, u smislu okolišnih rizika odnosi se na hidrogeološke značajke područja i osiguranje vode za nesmetan rad tvornice bez utjecaja na trenutni vodoopskrbni sustav. Važno je napomenuti da ta istraživanja tek treba provesti a rezultati takvih istraživanja ne bi imali samo značaj za tvornicu nego i za širu zajednicu. Prema “plan upravljanja vodama za vodno područje jadranskog mora u Federaciji Bosne i Hercegovine (2022. – 2027.)“, količinsko stanje podzemnih voda vodnog tijela Kupres određeno temeljem bilance voda određeno je kao dobro, pri čemu se u navodi kako PVT Kupres ima neznatno prekoračenje granične vrijednosti zahvaćanja iznad 20 % u odnosu na procijenjenu količinu podzemne vode u minimumu. Kemijsko stanje podzemnih voda vodnog tijela Kupres također je određeno kao dobro, podzemna voda je po hidrokemijskom facijesu hidrokarbonatno-sulfatnog tipa, a povećana koncentracija sulfata prirodna je posljedica geološke građe terena (pojave gips-anhidritnih naslaga) što je ohrabrujuće za provođenje hidrogeoloških istraživačkih aktivnosti.

U dolomitima je tok podzemne vode dominantno kontroliran geometrijom i povezanošću pukotinskih sustava, jer je matriksna propusnost često niska zbog dijagenetske rekristalizacije i

cementacije, a dolomiti su u pravilu manje skloni razvoju velikih krških kanala nego vapnenci. Zbog toga voda teče prvenstveno kroz diskontinuitete (slojne plohe, pukotine i rasjede), pri čemu otvorenost i povezanost pukotinskih sustava može lokalno stvarati brze drenažne putove (veća izdašnost), dok slabije povezani ili mineralno ispunjeni diskontinuiteti usporavaju tok i pojačavaju „rezervoarski“ karakter stijenskog masiva. Upravo ta heterogenost objašnjava zašto mala strukturna razlika na terenu može rezultirati velikom razlikom u izdašnosti izvora te zašto se u dolomitnim vodonosnicima podzemna voda često kreće sporije nego u vapnencima s razvijenijim kanalima.

U pogledu potreba za vodom, u dokumentaciji su kvantificirane godišnje potrebe tvornice od približno 180.000 m<sup>3</sup>/god. Procijenjene količine koje se mogu pokriti prikupljanjem oborinske vode iznose oko 18.000 m<sup>3</sup>/god, odnosno oko 9,5 % ukupne potrebe, dok bi se preostali dio morao osigurati drugim zahvatom. Važno je napomenuti da postoje tehnologije gdje se potrebe za vodom mogu dodatno smanjiti odvajanjem tekuće faze od prašine pomoću centrifugalnih dekantera. Iz toga slijedi da bi za stabilan rad postrojenja trebalo osigurati izdašnost od približno 7–10 l/s (projektirana količina sa strane sigurnosti mora biti duplo veća), što je izvedivo, ali zbog krškog i pukotinski kontroliranog karaktera vodonosnika zahtijeva detaljna i opsežna hidrogeološka istraživanja, ne samo radi dokazivanja količina, već i radi potvrde da zahvaćanje neće utjecati na okolne izvore, osobito one koji se koriste za vodoopskrbu Općine Kupres.

Upravo zato je u ovoj stručnoj analizi opravdano dano važno mjesto hidrogeološkim istraživanjima i preporukama jer je u krškim uvjetima prije vodozahvata važno kvantificirati i razumjeti dinamiku toka podzemnih voda, ranjivost na onečišćenje te stvarne hidrauličke veze između ponora, zona infiltracije i izvora. Kao preporučene metode navode se geofizička istraživanja visoke razlučivosti (ERT, uz AMT za dublje zahvate), trasiranje podzemnih voda prirodnim i/ili umjetnim traserima, te kombinacija geoloških, hidroloških, hidrogeoloških, geokemijskih i izotopnih ispitivanja, na temelju kojih se izrađuje konceptualni (a potom i 3D) hidrogeološki model. Takav model je ključan jer omogućuje simulaciju scenarija (npr. promjene režima oborina, povećani zahvati vode, akcidenti) i procjenu transporta potencijalnih zagađivala do osjetljivih točaka.

Nadalje, kako bi se osiguralo da projekt zadrži predviđeno nizak utjecaj na okoliš, nužno je uspostaviti i sustav monitoringa okolišnih parametara prije početka rada (baseline), tijekom pokusnog rada i u punom pogonu. Posebno se ističe monitoring kemijskog stanja vode na glavnim izvorima, kombinacijom automatskih logera (temperatura, električna vodljivost, pH, mutnoća i

dr.) i periodičkih laboratorijskih analiza, jer krški sustavi mogu reagirati brzo i nelinearno na oborinske događaje ili izvanredne situacije. Monitoring, uz jasno definirane pragove i protokole reakcije, omogućava pravovremeno uočavanje promjena i korektivne mjere prije nego što promjene postanu trajne ili prijeđu u štetne posljedice.

U dijelu upravljanja vodama i potencijalnim emisijama, stručna analiza jasno upućuje da su zatvoreni vodni krugovi i kvalitetno pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda (nema industrijske otpadne vode jer se u postrojenju ne koriste kemikalije) temelj za okolišnu prihvatljivost zahvata. Postavljanje centralne jedinice za obradu otpadnih voda na izlazu iz postrojenja, uz višestupanjski tretman (mehanički i fizikalno kemijski, uz mogućnost naprednih postupaka prema potrebi), uz mjernu opremu i uzorkovanje, predstavlja preventivnu mjeru koja izravno smanjuje rizik za krški recipijent i omogućuje recirkulaciju dijela vode unutar postrojenja. Takva infrastruktura je, uz kontrolu prašine filtrima i odgovorno upravljanje svim nusproizvodima, preduvjet da se „zero waste“ koncept iz projektne dokumentacije prenese i u realne pogonske uvjete.

27.1.2026 godine objavljen je „Elaborat zaštite izvorišta vodoopskrbnog sustava općine Kupres izvorišta: Bašinci, Točak, Šadinac, Hajdarevac i Vođenica“ u kojima je obrađen i izvor Bašinci koji se nalazi nedaleko od lokacije predviđene za gradnju postrojenja. Prema elaboratu, predviđena lokacija postrojenja nalazila bi se u 2. i 3. zoni sanitarne zaštite izvora Bašinci sa strogim mjerama zaštite te ukoliko predložene zone budu odobrene od nadležnih tijela, izgradnja ovako projektiranog postrojenja na predviđenoj ne bi bila prihvatljiva.

Sve navedeno vodi objedinjeno prema završnoj ocjeni: prema analiziranoj dokumentaciji i prikazanim maseno energetskim osnovama, MFE projekt postrojenja za proizvodnju magnezija ima visoku tehnološku razvijenost (TRL 8–9), a tehnološki postupci i procesi su konceptualno projektirani tako da ne bi trebali imati bitan negativan utjecaj na okoliš te su usmjereni prema „zero waste“ pogonu kroz valorizaciju PCC a, Mg–Al spinela i uhvaćenog CO<sub>2</sub>, uz organizirano zbrinjavanje jedino preostale rafinacijske troske preko ovlaštenog oporabitelja. Sirovinska osnova je dugoročno održiva i u okvirima dozvoljene eksploatacije, pri čemu je važno naglasiti razdvojenost gospodarskih subjekata kamenoloma i tvornice u ovoj fazi projekta no s intencijom da se oni udruže u zajednički gospodarski entitet. Međutim, za potpunu okolišnu sigurnost i regulatornu robusnost projekta nužno je dopuniti određene segmente: uskladiti i standardizirati pojedine dijelove projektnih proračuna (osobito u dijelu energenata), te, najvažnije, provesti detaljna i obimna hidrogeološka istraživanja i uspostaviti sustavan monitoring kako bi se



## Stručna analiza projektne dokumentacije MFE procesa za proizvodnju magnezija

osigurale potrebne količine vode (uz činjenicu da kišnica pokriva tek manji dio potreba) bez negativnog utjecaja na okolne izvore, posebno vodoopskrbne.

Time se projekt može pozicionirati kao referentan primjer održive metalurgije u krškom prostoru, uz demonstraciju da visoko-industrijski zahvati mogu biti usklađeni s najvišim okolišnim standardima, pod uvjetom da se preporučene istražne i nadzorne mjere provedu dosljedno i prije pune operativne faze.

## Literatura

Ahr, W.M. (2008): *Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks*, *Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks*. <https://doi.org/10.1002/9780470370650>

Alford, D. (1985), Mountain hydrologic systems, *Mountain Research and Development*, 5(4), 349–363.

Anderson, S. P., F. von Blanckenburg, and A. F. White (2007), Physical and Chemical Controls on the Critical Zone, *Elements*, 3, 315-319.

Bačani, A. & Vlahović, T. (2012): *Hidrogeologija Primjena u graditeljstvu*. Galić, Mirela (ur.). Split: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, 2012. 335

Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology journal*, 13(1), 148-160.

Biondić, B., & Biondić, R. (2014). **Hydrogeology of the Dinaric Karst**. Croatian Waters & UNESCO International Hydrological Programme, Zagreb.

Bonacci, O. (1987). **Karst Hydrology: With Special Reference to the Dinaric Karst**. Springer-Verlag, Berlin.

Bondu, R., Casiot, C., Pistre, S., & Batiot-Guilhe, C. (2023): Impact of past mining activities on water quality in a karst area in the Cévennes region, Southern France. *Science of The Total Environment*, 873, 162274.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162274>

Borghi, A., Renard, P., & Cornaton, F. (2016). Can one identify karst conduit networks geometry and properties from hydraulic and tracer test data?. *Advances in Water Resources*, 90, 99-115.

Borgomano, J.R.F., Fournier, F., Viseur, S., Rijkels, L. (2008): Stratigraphic well correlations for 3-D static modeling of carbonate reservoirs. *AAPG Bulletin* 92, 789–824. <https://doi.org/10.1306/02210807078>

Brigaud, B., Vincent, B., Durllet, C., Deconinck, J.F., Jobard, E., Pickard, N., Yven, B., Landrein, P. (2014): Characterization and origin of permeability-porosity heterogeneity in shallow-marine carbonates: From core scale to 3D reservoir dimension (Middle Jurassic,

Paris Basin, France). *Marine and Petroleum Geology* 57.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.004>

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (2004): Commodity Profile: Magnesium. Available on  
<https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534460>. Accessed: December 10th, 2023.

Brown, R.E.: Environmental Challenges for the Magnesium Industry. In: Sillekens, W.H.,  
Agnew, S.R., Neelameggham, N.R., Mathaudhu, S.N. (eds) *Magnesium Technology*  
2011. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-48223-1\_3

Budd, D.A. (2001): Permeability loss with depth in the Cenozoic carbonate platform of  
west-central Florida. *AAPG Bulletin* 85, 1253–1272.

Buğdaycı, M., Turan, A., Alkan, M., & Yücel, O. (n.d.). *Magnesium production from  
calcined dolomite via the Pidgeon process*. U *Encyclopedia of Magnesium and Its Alloys*  
(manuscript draft). Istanbul Technical University. [ResearchGate](#)

Çallı, K. Ö., Chiogna, G., Bittner, D., Sivelle, V., Labat, D., Richieri, B., et al. (2025). Karst  
water resources in a changing world: Review of solute transport modeling approaches.  
*Reviews of Geophysics*, 63, e2023RG000811. <https://doi.org/10.1029/2023RG000811>

Caputo, M.V. (2011): Amazon Basin Potash Perspectives.– In: 45 Congresso Brasileiro de  
Geologia. Belém, Pará. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11187.63522>

Carrière, S.D.; Chalikakis, K.; Sénéchal, G.; Danquigny, C.; Emblanch, C. (2013).  
Combining electrical resistivity tomography and ground penetrating radar to study  
geological structuring of karst unsaturated zone. *Journal of Applied Geophysics*, 94, 31-  
41.

Choquette, P.W., Pray, L.C. (1970): Geologic nomenclature and classification of porosity  
in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin* 54, 207–250.

Čičić, S., Mojićević, M., Pamić, J., & Tomić, B. (2002). Geološka karta Bosne i  
Hercegovine, mjerilo 1 : 500 000. Geološki zavod Bosne i Hercegovine, Sarajevo.

Daigle, B., & DeCarlo, S. (2022). *Magnesium Price Spike: A Flash in the Pan?*. Office of  
Industries, US International Trade Commission.

Ehrenberg, S.N., Eberli, G.P., Baechle, G. (2006): Porosity-permeability relationships in  
Miocene carbonate platforms and slopes seaward of the Great Barrier Reef, Australia  
(ODP Leg 194, Marion Plateau). *Sedimentology* 53, 1289–1318.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00817.x>

Ehrenberg, S.N., Eberli, G.P., Keramati, M., Moallemi, S.A. (2006): Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolostone reservoirs. AAPG Bulletin 90, 91–114. <https://doi.org/10.1306/08100505087>

Ehrenberg, S.N., Nadeau, P.H. (2005): Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships. AAPG Bulletin 89, 435–445. <https://doi.org/10.1306/11230404071>

Ehrenberger, Simon: Carbon Footprint of Magnesium Production and its Use in Transport Applications, Monograph (Project Report), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2020.

<https://cdn.ymaws.com/www.intlmag.org/resource/resmgr/sustainability/LCA-update-summary-2020-Oct-.pdf> 4.3.2025. DOI:10.13140/RG.2.2.32386.50883

Epting, J.; Huggenberger, P.; Glur, L. (2009a). A Concept for Integrated Investigations of Karst Phenomena in Urban Environments - Merging geophysical and hydrometrical investigations with 3D hydrogeological modeling for applied urban hydrogeology within a gypsum karst area. Engineering Geology.

Epting, J.; Huggenberger, P.; Glur, L. (2009b). Integrated investigations of karst phenomena in urban environments. Engineering Geology 109(3-4), 273-289

Epting, J.; Wüest, A.; Huggenberger, P. (2012). Investigating sediments and rock structures beneath a river using underwater ERT. Central European Journal of Geosciences 4(1), p 81 - 93, DOI: 10.2478/s13533-011-0052-0

EUROPEAN COMMISSION COMMUNICATION (2011): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials.– Brussels, 2.2.2011, COM(2011) 25 final.

EUROPEAN COMMISSION COMMUNICATION (2014): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – On the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative.– Brussels, 26.5.2014, COM(2014) 297 final.

EUROPEAN COMMISSION COMMUNICATION (2017): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.– Brussels, 13.9.2017, COM(2017) 490 final.

EUROPEAN COMMISSION COMMUNICATION (2020): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability.– Brussels, 3.9.2020, COM(2020) 474 final.

European Commission. (2023). *Critical raw materials (fifth list 2023)*. [Internal Market SMEs](#)

European Commission. (2024a). *Critical Raw Materials Act*. [Internal Market SMEs](#)

European Commission. (2024b, May 22). *Q&A on the Critical Raw Materials Act*. [European Commission](#)

Field, M.S. (1993): Karst hydrology and chemical contamination. *Journal of Environmental Systems*, volume 22, number 1, pages 1-26, DOI: 10.2190/X7MV-C93E-66GK-BFH7

Financial Times. (2024, April 16). *Europe restarts magnesium mining to counter reliance on China*. [Financial Times](#)

Ford, D., & Williams, P. (2007). **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. John Wiley & Sons, Chichester.

Friedrich, Horst E.; Mordike, Barry L.: *Magnesium Technology*, Springer-Verlag, Berlin, 2006.

Fu, Daxue; Wang, Yaowu; Peng, Jianping; Di, Yuezhong; Tao, Shaohu; Feng, Naixiang: Comparison of extracting magnesium by aluminothermic reduction and Pidgeon process, *Advanced Materials Research* 550-553 (2012) 1779-1783. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.550-553.1779

Gleeson, T. & Manning, H. (2008): Regional groundwater flow in mountainous terrain: Three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls. *Water Resour. Res.*, 44. W10403, DOI: 10.1029/2008WR006848.

Grohol, M. & Veeh, C. (2023): Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report.– European Commission: Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, 158 p. [https:// doi.org/10.2873/725585](https://doi.org/10.2873/725585)

Guidelines on Best Available Techniques and Provisional Guidance on Best Environmental Practices relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Secretariat of the Stockholm Convention on Persistent

Organic Pollutants, United Nations Environment Programme, 2008.

<https://www.greenpolicyplatform.org/sites/default/files/downloads/tools/Guidelines%20on%20best%20available%20techniques%20and%20provisional%20guidance%20on%20best%20environmental%20practices%20relevant%20to%20Article%205%20and%20Annex%20C.pdf> (4.3.2025).

Haas, J., & Demény, A. (2002). Early dolomitisation of Late Triassic platform carbonates in the Transdanubian Range (Hungary). *Sedimentary Geology*, 151(3-4), 225-242.

Haitjema, H. M., and S. Mitchell-Bruker (2005), Are water tables a subdued replica of the topography?, *Ground Water*, 43(6), 781–786, doi:10.1111/j.1745- 6584.2005.00090.x.

Hansen, T., & Zander, N. 2011. Extraction of silica and magnesium compounds from olivine, European Patent EP 1 373 139 B1.

Harris, P.M. (2010). Delineating and quantifying depositional facies patterns in carbonate reservoirs: Insight from modern analogs. *AAPG Bulletin* 94, 61–86. <https://doi.org/10.1306/07060909014>

Harte, P. T., and T. C. Winter (1995), Simulations of flow in crystalline rock and recharge from overlying glacial deposits in a hypothetical New England setting, *Ground Water*, 33(6), 953–964.

Herak, M., & Stringfield, V. T. (Eds.). (1972). *Karst: Important Karst Regions of the Northern Hemisphere*. Elsevier, Amsterdam.

Hollingbery, L. A., & Hull, T. R. (2012). The thermal decomposition of natural mixtures of huntite and hydromagnesite. *Thermochimica acta*, 528, 45-52.

Home, A. (2021, October 26). *Europe's magnesium crunch poses another carbon conundrum*. Reuters. <https://afry.com/en/newsroom/news/afry-supports-njordurs-magnesium-project-in-iceland> (9.12.2025.)

<https://muresmag.eu/> (9.12.2025.)

<https://www.verdemg.com/> (9.12.2025.)

Horizon Europe Work Programme 2025 14. General Annexes (European Commission Decision C(2025) 2779 of 14 May 2025)

Hubbert, M. K. (1940). The theory of ground-water motion. *The Journal of Geology*, 48: 785–944.

INTERNATIONAL MAGNESIUM ASSOCIATION (2023): Magnesium Applications. Available on: [https://www.intlmag.org/page/mg\\_applications\\_ima](https://www.intlmag.org/page/mg_applications_ima). Accessed: November 17th, 2023.

Johnson, M. C., & Sullivan, J. L. (2014, September). *Lightweight materials for automotive application: An assessment of material production data for magnesium and carbon fiber* (ANL report). Argonne National Laboratory. [publications.anl.gov](https://publications.anl.gov)

Johnson, M. C., & Walker, D. (1993). Brucite [Mg (OH) 2] dehydration and the molar volume of H<sub>2</sub>O to 15 GPa. *American Mineralogist*, 78(3-4), 271-284.

Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M.T.H., Smakhtin, V. & Kang, S. (2019): The state of desalination and brine production: A global outlook.– *Science of the total environment*, 657, 1343–1356. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>

Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M. & Krukowski, S.T. (2006): *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses.*– Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 7th edition, 1565 p.

Krivochieva, S.; Chouteau, M. (2003). Integrating TDEM and MT methods for characterization and delineation of the Santa Catarina aquifer (Chalco Sub-Basin, Mexico). *Journal of applied geophysics*, 52(1), 23-43.

Kuniansky, E. L., Taylor C. J., Williams J.H., & Paillet F. (2022). Introduction to karst aquifers. The Groundwater Project. [doi.org/10.21083/978-1-77470-040-2](https://doi.org/10.21083/978-1-77470-040-2).

LAROB MAGNESIUM (2024): Available on: <https://www.latrobemagnesium.com/>. Accessed on: December 10th, 2023.

Li, Xiaolong; Zhang, Tingan; Liu, Yan; Guo, Junhua; Xu, Jingzhong; Lian, Yuanyuan: Relative vacuum reduction innovative processes applied in primary magnesium production—Comprehensive analysis of thermodynamics, resource, energy flow, and carbon emission *Journal of Magnesium and Alloys*, In Press (2024). DOI: 10.1016/j.jma.2024.06.027

Liu, W., Peng, X., Liu, W., Zhang, X. & Wang, X. (2022): A cost-effective approach to recycle serpentine tailings: Destruction of stable layered structure and solvent displacement crystallization.– *International Journal of Mining Science and Technology*, 32/3, 595–603. <http://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.03.004>

Lu, H. & Neelameggham, N.R. (2021): Industrial Practice of Extracting Magnesium from Serpentine.– In: MILLER, V.M., MAIER, P., JORDON, J.B., NEELAMEGGHAM, N.R. (eds):

Magnesium Technology 2021. The Minerals, Metals & Materials Series, 153–159.  
[http://doi.org/10.1007/9783030655280\\_23](http://doi.org/10.1007/9783030655280_23)

Lucia, F.J. (2000). Dolomitization; a porosity-destructive process; 2000-2001 AAPG distinguished lecturers; abstracts. AAPG Bulletin 84, 1879.

Mayer, D. & Urumović, K. (2006): Identifikacija krških vodonosnih sustava. Skripta za doktorski studiji, smjer Geološko inženjerstvo.

Mayer, D., Dragičević, I., Urumović, K. (1994): Analiza i reinterpetacija rezultata hidrogeoloških istraživanja na području općine Križevci. Hidroprojekt-ing, Zagreb.

MFE MAGNESIUM FOR EUROPE (2024): Available on: <https://www.mfeeurope.com/>. Accessed on: December 10th, 2023.

Milanović, P. (2004). Water Resources Engineering in Karst. CRC Press, Boca Raton.

Moore, C.H. (1989): Carbonate diagenesis and porosity. Elsevier.

Moore, C.H. (1989): Carbonate diagenesis and porosity. Elsevier.

Moore, C.H., Wade, W.J. (2013): Carbonate Reservoirs, 2nd Edition. Porosity and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53831-4.00001-X>

Mordike, B.L. & Ebert, T. (2001): Magnesium Properties — applications — potential.— Materials Science and Engineering: A, 302/1, 37–45. [http://doi.org/10.1016/S09215093\(00\)013514Ž](http://doi.org/10.1016/S09215093(00)013514Ž)

Nakić, Z. (2010): Geologija okoliša (I. dio). Skripta za preddiplomske studije.

Papeš, J.: Osnovna geološka karta i Tumač za OGK list Livno, M 1:100 000. Geološki zavod, Sarajevo, 1962 – 1967.

Pavičić, I. (2018). *Geneza, prostorna raspodjela i kvantifikacija poroznosti žumberačkih gornjotrijskih dolomita* (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering).

Pohl, W. (1990). Genesis of magnesite deposits—models and trends. *Geologische Rundschau*, 79(2), 291-299.

Ramakrishnan, S., & Koltun, P. (2004). Global warming impact of the magnesium produced in China using the Pidgeon process. *Resources, Conservation and Recycling*,

42(1), 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.02.003>  
[research.amanote.com](https://research.amanote.com)+1

Scesi L. Gattinoni, P. (2007): *Water Circulation in Rocks*. Springer Science + Business Media B.V.

Schlanger, S.O., Douglas, R.G., Hsu, K.J., Jenkyns, H.C. (1974): The pelagic ooze-chalk-limestone transition and its implications for marine stratigraphy. *Pelagic Sediments* 117–148.

Schmoker, J.W., Halley, R.B. (1982): Carbonate porosity versus depth: a predictable relation for south Florida. *AAPG Bulletin* 66, 2561–2570.

Simandl, G. J., Schultes, H., Simandl, J. & Paradis, S. (2007): Magnesium Raw Materials, Metal Extraction and Economics Global Picture.– In: *Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting, Dublin 2007*, 827–830.

Stepišnik, U. (2014). Japage: the collapse dolines on Kupres polje, Bosnia and Herzegovina. *Dela*, 42, 5–20.

Studija utjecaja na okoliš, BH Magnezij & Minerali d.o.o. Kupres, veljača 2025.

Šestanović, S. (1993). *Osnove inženjerske geologije: primjena u graditeljstvu*. Geing.

Tan, J. & Ramakrishna, S. (2021): Applications of Magnesium and Its Alloys: A Review.– *Applied Sciences*, 11/6861, 1–16. <http://doi.org/10.3390/app11156861>

Tetzlaff, D., and C. Soulsby (2008), Sources of baseflow in larger catchments—Using tracers to develop a holistic understanding of runoff generation, *Journal of Hydrology*, 359, 287–302, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.008.

The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2025a, December 11). *Magnesium*. Encyclopaedia Britannica. [Encyclopedia Britannica](https://www.britannica.com)

The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2025b). *Magnesium processing*. Encyclopaedia Britannica. [Encyclopedia Britannica](https://www.britannica.com)

Tišljar, J. (1994): *Sedimentne stijene*.- Školska knjiga, XI+ 399 p., Zagreb

Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795–4812. Reprinted in (1983) *Physical Hydrogeology; Benchmark Papers in Geology*, ed. Freeze, R.A. and Back, W. Stroudsburg, PA: Hutchinson Ross, pp. 328–345.

Tóth, J. (2009): *Gravitational Systems of Groundwater Flow. Theory, Evaluation, Utilization.* 311 p. Cambridge University Press, New York

Tucker, M.E., Wright, V.P. (2009): *Carbonate sedimentology.* John Wiley & Sons.

U.S. Geological Survey. (2024). *Magnesium metal* (Mineral Commodity Summaries 2024).

Verbovšek, T. (2009): Extrapolation of fractal dimensions of natural fracture networks from one to two dimensions in dolomites of Slovenia. *Geosciences Journal* 13, 343–351. <https://doi.org/10.1007/s12303-009-0032-2>

Verbovšek, T., Veseliš, M. (2008): Factors influencing the hydraulic properties of wells in dolomite aquifers of Slovenia. *Hydrogeology Journal* 16, 779–795. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0250-5>

Viviroli, D., H. H. Durr, B. Messerli, M. Meybeck, and R. Weingartner (2007), Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance, *Water Resources Research*, 43, doi:10.1029/2006WR005653.

Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I., & Matičec, D. (2005). Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 220, 333–360.

Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability.*

Vujnović L. (1980): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, Tumač za list Bugojno L33-143.- Preduzeće „Geoinženjering“ OOUR Geološki institut (1980); Savezni geološki zavod, Beograd, 59 str.

Vujnović, L., Vrhovčić, J., Jovanović, R., Živanović, M., Sofilj, J., Ahac, A., Andrijašević, M., Govedarica, M., Jović, R., Veljović, R., Mitrović, P. (1975): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, list Bugojno L33-143.- Preduzeće „Geoinženjering“ OOUR Geološki institut (1975); Savezni geološki zavod, Beograd.

Warren, J. K. (2000). Evaporites, brines and base metals: Low-temperature ore emplacement controlled by evaporite diagenesis. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47(2), 179-208.

Welch, L.A. (2012): *Modelling Topographically – Driven Groundwater Flow in Mountains.* PhD Thesis, 216 p. Simon Fraser University, Canada.

Wilson, J. L., and H. Guan (2004), Mountain-block hydrology and mountain-front recharge, in *Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United*



States, Water Science and Application Series 9, edited by J. F. Hogan et al., vol. 9, pp. 113–137, AGU, Washington, D. C.

Winter, T. C., D. C. Buso, P. C. Shattuck, P. T. Harte, D. A. Vroblesky, and D. J. Goode (2008), The effect of terrace geology on ground-water movement and on the interaction of ground water and surface water on a mountainside near Mirror Lake, New Hampshire, USA, *Hydrological Processes*, 22, 21-32, doi: 10.1002/hyp.6593.

Worman, A., A. I. Packman, L. Marklund, J. W. Harvey, and S. H. Stone (2006), Exact three dimensional spectral solution to surface groundwater interactions with arbitrary surface topography, *Geophysical Research Letters*, 33, doi:10.1029/2006GL025747.

Wu, Laner; Han, Fenglan; Yang, Qixing; Guo, Shengwei: Fluoride emissions from Pidgeon process for magnesium production, *International Conference on Solid Waste Technology and Management*, 2012.

Wulandari, Winny; Brooks, Geoffrey A.; Rhamdhani, Muhammad A.; Monaghan, Brian J.: Magnesium: current and alternative production routes, Part of the Engineering Commons, 2010. <https://ro.uow.edu.au/engpapers/1254>

Xu, Jingzhong; Zhang, Tingan; Li, Xiaolong: Research on the Process, Energy Consumption and Carbon Emissions of Different Magnesium Refining Processes, *Materials* 16 (2023) 2-42, DOI: 10.3390/ma16093340

Yaowu, Wang; Jing, You; Jianping, Peng; Yuezhong, Di: Production of Magnesium by Vacuum Aluminothermic Reduction with Magnesium Aluminate Spinel as a By-Product, *JOM* 65 (2016) 1728-1736. DOI: 10.1007/s11837-016-1865-6

Zhu, J.; Currens, J.C., Dinger; J.S. (2011). Challenges of using electrical resistivity method to locate karst conduits—a field case in the Inner Bluegrass Region, Kentucky. *Journal of Applied Geophysics*, 75(3), 523-530.

Zuliani, Doug: ULTRA Clean Magnesium Aluminothermic Process, Tech Magnesium, Ottawa, Canada, 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.25763.84001