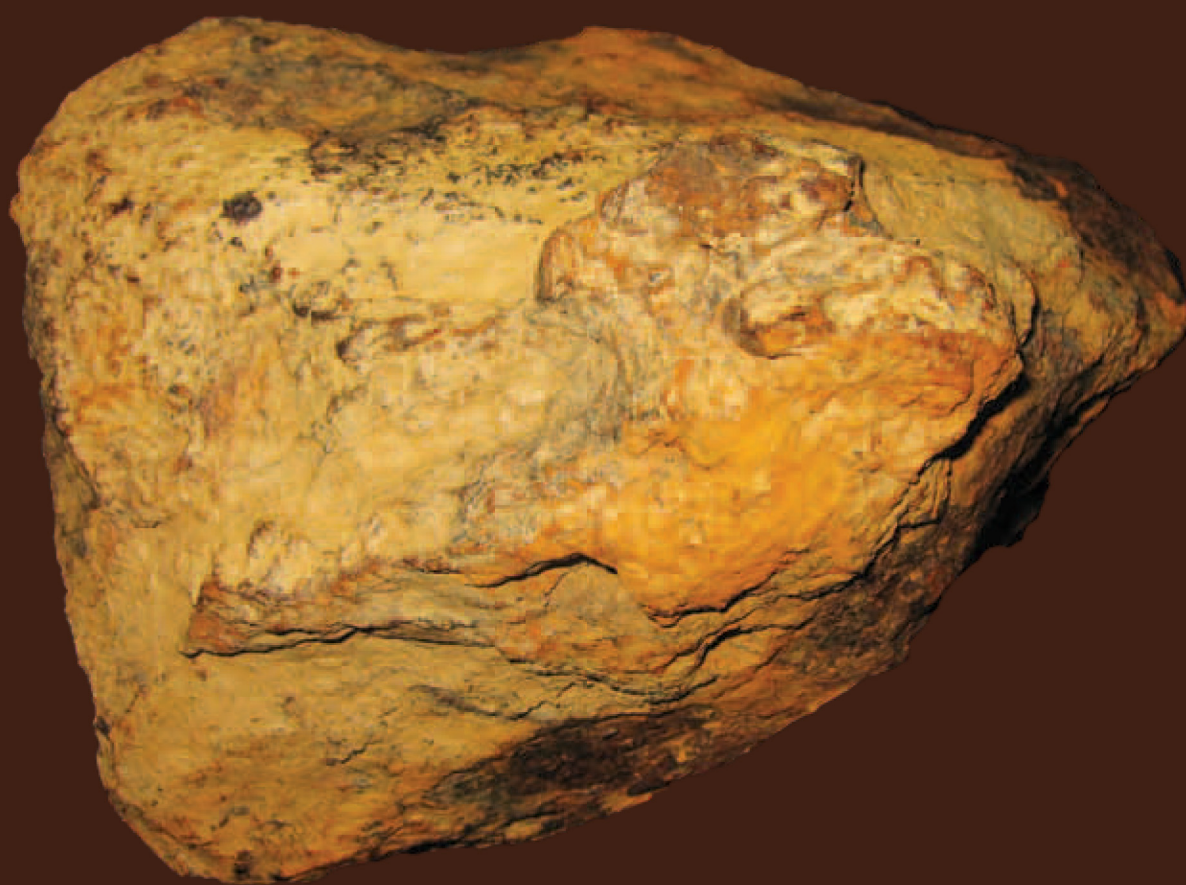


# GEOLOGIJA

2012 | št.: **55/1**



Geološki zavod Slovenije  
Geological Survey of Slovenia

ISSN 0016-7789  
ISSN 1854-620X

# **GEOLOGIJA**

**55/1 – 2012**



<b>GEOLOGIJA</b>	<b>2012</b>	<b>55/1</b>	<b>1-156</b>	<b>Ljubljana</b>
------------------	-------------	-------------	--------------	------------------

## **GEOLOGIJA**

ISSN 0016-7789

© Geološki zavod Slovenije

Izdajatelj: Geološki zavod Slovenije, zanj direktor MARKO KOMAC  
Publisher: Geological Survey of Slovenia, represented by Director MARKO KOMAC  
Financirata Javna agencija za knjigo Republike Slovenije in Geološki zavod Slovenije  
Financed by the Slovenian Book Agency and the Geological Survey of Slovenia

Vsebina številke 55/1 je bila sprejeta na seji Uredniškega odbora, dne 18. 6. 2012.  
Manuscripts of the Volume 55/1 accepted by Editorial and Scientific Advisory Board on June 18, 2012.

Glavna in odgovorna urednica / Editor-in-Chief: MATEJA GOSAR

### **Uredniški in recenzijski odbor / Scientific Advisory Board:**

DUNJA ALJINOVIĆ, Rudarsko-geološki naftni fakultet, Zagreb  
MIHAEL BRENČIČ, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani  
GIOVANNI BATTISTA CARULLI, Dip. di Sci. Geol., Ambientali e Marine, Università di Trieste  
KATICA DROBNE, Znanstveno Raziskovalni Center SAZU, Ljubljana  
MATIJA DROVENIK, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana  
JADRAN FAGANELI, Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja Piran  
JANOS HAAS, Etvös Lorand University, Budapest  
BOGDAN JURKOVŠEK, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana  
ROMAN KOCH, Institut für Paläontologie, Universität Erlangen-Nürnberg  
MARKO KOMAC, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana  
HARALD LOBITZER, Geologische Bundesanstalt, Wien  
RINALDO NICOLICH, D.I.N.M.A., Sezione Georisorse e Ambiente, Università di Trieste  
BOJAN OGORELEC, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana  
SIMON PIRC, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani  
MARIO PLENIČAR, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana  
DANILO RAVNIK, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani  
MIHAEL RIBIČIČ, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani  
MILAN SUDAR, Faculty of Mining and Geology, Belgrade  
MARKO ŠPARICA, Institut za geološka istraživanja, Zagreb  
SAŠO ŠTURM, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana  
DRAGICA TURNŠEK, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana  
MIRAN VESELIČ, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani

Tehnična urednica / Technical Editor: BERNARDA BOLE

Naslov uredništva / Editorial Office: GEOLOGIJA Geološki zavod Slovenije / Geological Survey of Slovenia

Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Tel.: +386 (01) 2809-700, Fax: +386 (01) 2809-753, e-mail: urednik@geologija-revija.si

URL: <http://www.geologija-revija.si/>

GEOLOGIJA izhaja dvakrat letno / GEOLOGIJA is published two times a year

GEOLOGIJA je na voljo tudi preko medknjižnične izmenjave publikacij / GEOLOGIJA is available also on exchange basis

Baze, v katerih je Geologija indeksirana / Indexation bases of Geologija: Directory of Open Access Journals, GeoRef, Zoological Record, Geoscience e- Journals

Cena / Price

Posamezni izvod / Single Issue

Posameznik / Individual: 15 €

Institucija / Institutional: 25 €

Letna naročnina / Annual Subscription

Posameznik / Individual: 25 €

Institucija / Institutional: 40 €

Tisk / Printed by: Tiskarna Formatisk d.o.o.

---

**Slika na naslovni strani:** Meteorit Javorje, prekrit z debelo skorjo produktov oksidacije. (MILER & GOSAR, članek v tej številki, foto: M. Gosar)

**Cover page:** Meteorite Javorje, covered with a thick crust of oxidation products. (MILER & GOSAR, paper in this issue, photo: M. Gosar)

## VSEBINA – CONTENTS

<i>Miler, M. &amp; Gosar, M.</i>	
Dve leti raziskav meteorita Javorje .....	5
Two years of the Javorje meteorite investigations	
<i>Gale, L.</i>	
Rhaetian foraminiferal assemblage from the Dachstein Limestone of Mt. Begunjščica (Košuta Unit, eastern Southern Alps) .....	17
Retijska foraminiferna združba dachsteinskega apnenca Begunjščice (enota Košuta, vzhodne Južne Alpe)	
<i>Oprčkal, P., Gale, L., Kolar-Jurkovšek, T. &amp; Rožič, B.</i>	
Dokaz za norijsko-retijsko natezno tektoniko v Slovenskem bazenu (Južne Alpe) .....	45
Outcrop-scale evidence for the Norian-Rhaetian extensional tectonics in the Slovenian Basin (Southern Alps) .....	51
<i>Mikuž, V., Škedelj - Petrič, A. &amp; Bartol, M.</i>	
Anelidi v miocenskem litotamnjskem apnencu iz Zgornje Pohance .....	57
Annelids in the Miocene lithothamnion limestone from Zgornja Pohanca, Slovenia .....	60
<i>Mikuž, V., Gašparič, R., Bartol, M., Horvat, A. &amp; Pavšič, J.</i>	
Miocenski pteropodi s Poličkega Vrha v Slovenskih goricah .....	67
Miocene pteropods from Polički Vrh in Slovenske gorice, northeast Slovenia .....	71
<i>Dozet, S., Kanduč, T. &amp; Markič, M.</i>	
A contribution to petrology of dark grey to black interbeds within Upper Permian and Triassic carbonate rocks in the area between Ljubljana and Bloke, Central Slovenia .....	77
Prispevek k petrologiji temno sivih do črnih plasti v zgornjepermskih in triasnih karbonatnih kamninah na območju med Ljubljano in Blokami	
<i>Ali, M.A.</i>	
Mineral chemistry of monazite-(Nd), xenotime-(Y), apatite, fluorite and zircon hosting in lamprophyre dyke in Abu Rusheid area, South Eastern Desert, Egypt .....	93
<i>Šram, D., Brenčič, M., Lapanje, A. &amp; Janža, M.</i>	
Prostorski model visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju .....	107
Perched aquifers spatial model: a case study for Ljubljansko polje (central Slovenia)	
<i>Rajver, D., Lapanje, A. &amp; Rman, N.</i>	
Možnosti proizvodnje elektrike iz geotermalne energije v Sloveniji v naslednjem desetletju .....	117
Possibilities for electricity production from geothermal energy in Slovenia in the next decade	
<i>Štibelj, K.</i>	
Uporaba različnih preiskovalnih metod tal za forenzični namen .....	141
Use of different investigation methods of soil for forensic purpose	
Nova knjiga	
<i>Ozima, M., Korenaga, J. &amp; Yin, Q.Z.:</i> The Earth – Its Birth and Growth .....	151
Poročilo	
<i>Verbovšek, T.:</i> Predstavitev Slovenskega geološkega društva in letno poročilo za leto 2011 .....	152



Nekrolog

*Kralj, P.*

V spomin Antonu Nosanu ..... 154

Navodila avtorjem..... 155

Instructions to authors ..... 156

## Dve leti raziskav meteorita Javorje

### Two years of the Javorje meteorite investigations

Miloš MILER & Mateja GOSAR

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, Ljubljana, Slovenija;  
e-mail: milos.miler@geo-zs.si; mateja.gosar@geo-zs.si

Prejeto / Received 14. 3. 2012; Sprejeto / Accepted 30. 3. 2012; Dostopno na internetu / Available online 8. 5. 2012

*Ključne besede:* železov meteorit Javorje, srednji oktaedrit IIIAB, SEM/EDS analiza, mineralna in kemijska sestava, hitrost ohlajanja, Poljanska dolina, Slovenija

*Key words:* iron meteorite Javorje, medium octahedrite IIIAB, SEM/EDS analysis, mineral and chemical composition, cooling rate, Poljane Valley, Slovenia

#### Izvleček

Meteorit Javorje je železov meteorit, natančneje srednji oktaedrit iz kemijske skupine železovih meteoritov z oznako IIIAB s 7,83-odstotno vsebnostjo niklja. Najden je bil novembra 2009 blizu Javorij v Poljanski dolini. S skoraj petimi kilogrami predstavlja največji in najtežji meteorit, kar so jih doslej našli na ozemlju Slovenije. Namen članka je predstaviti glavne značilnosti meteorita Javorje tudi slovenski geološki javnosti. V članku so povzeti rezultati že objavljene raziskave tega meteorita, dodane pa so nekatere novejšje ugotovitve in podrobnosti o glavnih, akcesornih in sekundarnih mineralih ter o hitrosti ohlajanja.

#### Abstract

Meteorite Javorje is a IIIAB medium octahedrite iron meteorite with 7.83 wt% Ni content. It was found in November 2009 near village Javorje in the Poljane Valley. With nearly five kilograms it represents the largest and heaviest meteorite found so far in the territory of Slovenia. The purpose of this paper is to present general characteristics of meteorite Javorje to the slovenian geological community. This paper reviews results of already published research of this meteorite and provides some newer findings and details about major, accessory and secondary minerals, and also its cooling rate.

#### Uvod

Meteorit Javorje je s skoraj petimi kilogrami največji in najtežji meteorit izmed doslej najdenih na ozemlju Slovenije, in prav je, da o izsledkih raziskav tega zanimivega predmeta seznanjamo tudi bralce Geologije, osrednje slovenske geološke znanstvene revije. Pred dobrima dvema letoma je v bližini Javorij nad Poljansko dolino, zahodno od Škofje Loke, Vladimir Štibelj povsem po naključju odkril meteorit, ki poleg železovega meteorita Avče in kamnitega meteorita Jesenice, predstavlja tretji meteorit najden na ozemlju Slovenije. Pri gradnji gozdne ceste je pozornost najditelja v novo skopanem cestnem useku na globini 65–70 cm pritegnila nenavadna gmota, ki se je po svojem videzu razlikovala od kamnine in tal v kateri je ležala. Ko jo je vzel v roke, je ugotovil, da je nenavadno težka. V trenutku je bil prepričan, da je našel izjemno najdbo in domneval, da je najdeni predmet meteorit. Domnevni meteorit je skrbno shranil ter o najdbi obvestil v Poljanski dolini dobro znanega geologa, nek-

danjega sodelavca Rudnika urana Žirovski vrh, Pavla A. Florjančiča. Skupaj sta ugotovila, da je kos kovinski in da močno privlači magnet. Seveda pa tudi Pavle A. Florjančič ni mogel brez analiz potrditi, da je najdba res meteorit. Zato sta za pomoč prosila raziskovalce Geološkega zavoda Slovenije. Raziskave domnevnega meteorita so nam predstavljale velik raziskovalni izziv, saj se do takrat z materialom iz vesolja še nismo srečali. Ko so preliminarne analize z vrstičnim elektronskim mikroskopom v kombinaciji z energijsko disperzijskim spektrometrom (SEM/EDS) pokazale, da gre res za železov meteorit, smo se poglobljeno lotili raziskav. Sledile so natančne kemijske analize glavnih in slednih prvin ter določitev mineralne sestave in strukture. Vse te analize so namreč potrebne za natančno opredelitev in potrditev meteorita. Zbrane podatke smo januarja 2011 posredovali mednarodnemu Meteoritskemu društvu (The Meteoritical Society; <http://www.meteoriticalsociety.org/>), ki ureja podatkovno zbirko meteoritov in izdaja Meteoritski bilten (Meteoritical Bulletin, <http://www.lpi.usra>).

edu/meteor/metbull.php). Obravnavani predmet je bil kot meteorit Javorje uvrščen v meteoritsko podatkovno zbirko že 22. februarja 2011. V tej zbirki (<http://www.lpi.usra.edu/meteor/>), ki ima prost dostop, si je mogoče ogledati osnovne podatke o vseh preiskanih meteoritih. Podrobneje pa so značilnosti meteorita Javorje opisane v članku »Mineral and chemical composition of the new iron meteorite Javorje from Slovenia« (MILER & GOSAR, 2011), ki je bil objavljen decembra 2011 v reviji *Meteoritics & Planetary Science*.

V pričujočem prispevku bralce uvodoma seznanjamo z osnovnimi podatki o meteoritih s poudarkom na železovih meteoritih. Sledi predstavitev značilnosti meteorita Javorje, tem pa so dodani še podrobnejši in bolj specifični rezultati mineraloških raziskav, ki smo jih opravili s SEM/EDS na Geološkem zavodu Slovenije. Na koncu pa sledi poglavje o hitrosti ohlajanja železovih meteoritov, v katerem je podana ocena hitrosti ohlajanja meteorita Javorje na podlagi vsebnosti Ni v sredini letvic taenita.

## Meteoriti

Meteoriti so predmeti, ki padejo na Zemljino površje iz vesolja (LEWIS, 2004; CARDARELLI, 2008). Večina meteoritov, ki pade na Zemljo, prihaja iz glavnega asteroidnega pasu med orbitama Marsa in Jupitra, kjer je gostota asteroidov relativno velika (LEWIS, 2004). Večinoma so to fragmenti asteroidov, ki so zaradi močnih medsebojnih trkov v asteroidnem pasu razpadli. Ti delci krožijo okoli Sonca tudi več milijonov let, nato pa zaradi sprememb v njihovih orbitah, ki jih povzročijo orbitalne resonance z večjimi planeti, kot je Jupiter, lahko pristanejo na različnih planetih (LEWIS, 2004; ATANACKOV et al., 2010). Izmed vseh na Zemljo padlih meteoritov pa so med najredkejšimi tisti, ki izvirajo z Lune in Marsa (LEWIS, 2004).

Po kemijski in mineralni sestavi ter načinu nastanka se meteoriti delijo na tri večje skupine, **kamnite**, ki jih gradijo večinoma kamnintvorni silikatni minerali, **železove**, ki jih sestavljajo železovo-nikljevi minerali ter **kamnito-železove** meteorite, ki so mešanica silikatov in železovo-nikljevih mineralov (NORTON, 2002; MAURETTE, 2006; CARDARELLI, 2008). Med vsemi doslej znanimi in preiskanimi meteoriti ločimo tiste, katerih padec je bil opazovan in so bili takoj zatem tudi najdeni, to so t.i. padci (ang. falls), ter tiste, katerih čas padca ni znan in so bili najdeni po naključju, t.i. najdbe (ang. finds) (NORTON, 2002).

Kamniti meteoriti so najštevilčnejša skupina med vsemi padci in najdbami skupaj, saj predstavljajo kar 69 % vseh preiskanih meteoritov. Med kamnite meteorite, ki jih v tem prispevku ne bomo podrobneje obravnavali, sodi tudi slovenski meteorit Jesenice (navaden hondrit, tip L6), katerega padec so opazovali 9. aprila 2009. Na območju Mežakle so kasneje našli tri fragmente tega meteorita: prvega 17. maja 2009 (2290 g, najditelja Jožef Pretnar in Bojana Krajnc), drugega 21. julija (361 g, najditelja Ralph Sporn in Mar-

tin Neuhofer) in tretjega 27. avgusta 2009 (956 g, najditelj Danijel Repe) (BISCHOFF et al., 2011). Kamnitim meteoritom po pogostosti sledijo železovi meteoriti z 28 % ter kamnito-železovi meteoriti, ki jih je le okoli 3 % med vsemi znanimi meteoriti (NORTON, 2002). Večina meteoritov je na Zemljinem površju razmeroma neobstoje in zaradi izpostavljenosti mehanskim, kemičnim in biološkim vplivom relativno hitro preperevajo (NORTON, 2002).

Večina železovih meteoritov predstavlja fragmente kovinskih jeder večjih gravitacijsko diferenciranih matičnih teles, asteroidov, ki so se zaradi svoje velikosti dovolj segrela, da so težji elementi pod vplivom gravitacije potonili proti jedru, lažji pa so ostali v plašču (NORTON, 2002). Nekateri železovi meteoriti pa so nastali iz delno diferencirane taline, ki se je tvorila pri trkih nederenciranih matičnih teles (HAACK & MCCOY, 2004). Železovi meteoriti so tako sestavljeni pretežno iz zlitin železa in niklja, ki tvorijo dva glavna minerala: **kamacit** z nižjo vsebnostjo niklja (5,4–7,5 mas%) in **taenit** z višjo vsebnostjo niklja (25–65 mas%) (BUCHWALD, 1977). Kristali teh mineralov gradijo v notranjosti meteorita posebne strukture, ki so značilne za železove meteorite. Na osnovi teh notranjih struktur oziroma urejenosti kristalov železovo-nikljevih mineralov in glede na njihovo kemijsko sestavo železove meteorite razvrščamo v skupine. Po notranji strukturi ločimo heksaedrite, oktaedrite in ataksite (ANDERS, 1964; NORTON, 2002; GOLDSTEIN et al., 2009).

Heksaedriti imajo nizko vsebnost niklja (4,5–6,5 mas%), zato jih večinoma gradi samo kamacit, ki kristali v obliki kocke oziroma heksaedra, po katerem se skupina tudi imenuje (NORTON, 2002; NORTON & CHITWOOD, 2008). Običajno so heksaedriti iz enega samega velikega kristala kamacita, v katerem so po jedkanju s kislino razločno opazne goste, vzporedne Neumannove črte. Te nastanejo v kamacitu zaradi strukturnih deformacij kristalov kamacita, ki so najverjetneje posledica trkov manjših ali večjih teles z matičnim telesom meteorita (NORTON, 1998). Med heksaedrite sodi tudi prvi meteorit, ki so ga našli na ozemlju Slovenije. To je 1230 g težak meteorit Avče, katerega padec so zabeležili 31. marca 1908 v bližini vasi Avče v Soški dolini. Po spodaj opisani kemijski klasifikaciji sodi meteorit Avče v skupino IIAB (Božič, 2008).

Oktaedriti so najštevilčnejši strukturni razred železovih meteoritov. Imajo višjo vsebnost niklja (6,5–12,7 mas%) kot heksaedriti, zato jih gradi ta oba minerala, kamacit in taenit (LEWIS, 2004; NORTON & CHITWOOD, 2008). Nastopata v obliki izmeničnih pasov ploščičastih kristalov kamacita, ki so prostorsko urejeni v obliki oktaedra, in tankih letvic taenita (NORTON, 2002). Vmesne prostore med kristali zapolnjuje drobnozrnata osnova oziroma mešanica kamacita in taenita imenovana plezit (GOLDSTEIN et al., 2009). Kristali kamacita lahko nastanejo le pri izjemno počasnem ohlajanju (nekaj sto stopinj Celzija na milijon let) iz trdne raztopine železa in niklja, večinoma v je-

drih matičnih asteroidov. Na polirani in s kisli-  
no jedkani površini oktaedrita pasovi kamacita  
in taenita tvorijo t.i. Widmanstättenove vzorce,  
ki nastanejo zaradi izbirnega raztapljanja manj  
odpornega kamacita. Glede na širino teh pasov  
se oktaedriti nadalje delijo v pet podrazredov od  
najbolj debelozrnatih do najbolj drobnozrnatih  
oktaedritov. Debelozrnati oktaedriti so se v pri-  
merjavi z drobnozrnatimi oktaedriti ohlajali pre-  
cej počasneje, zato so pasovi kamacita in taenita  
v njih širši od pasov pri drobnozrnatih oktaedri-  
tih (NORTON, 2002). Med srednjezrnate oktaedrite  
sodi tudi v tem prispevku obravnavani meteorit  
Javorje, o katerem bomo več napisali v nadalje-  
vanju.

Ataksiti so najredkejša strukturna skupi-  
na železovih meteoritov. Vsebujejo največ niklja  
( $> 16$  mas%) med vsemi železovimi meteoriti in  
so sestavljeni skoraj samo iz minerala taenita z  
redkimi mikroskopskimi letvicami kamacita, zato  
nimajo izražene notranje strukture (NORTON &  
CHITWOOD, 2008).

Po modernejši, kemijski klasifikaciji se žele-  
zovi meteoriti združujejo v 14 kemijskih skupin  
na podlagi vsebnosti niklja ter nekaterih lahko-  
hlapnih in siderofilnih slednih prvin, kot so gal-  
lij, germanij in iridij. Označujemo jih z rimskimi  
številkami in črkami. V splošnem velja, da imajo  
višje skupine nižjo vsebnost slednih prvin, nižje  
skupine pa višjo (LOVERING et al., 1957). Vsaka ke-  
mijska skupina naj bi odgovarjala posameznemu  
matičnemu telesu oz. asteroidu, saj železovi me-  
teoriti s podobno kemijsko sestavo najverjetneje  
izvirajo iz istega matičnega asteroida (BUCHWALD,  
1975; SCOTT & WASSON, 1975; HAACK & MCCOY,  
2004; GOLDSTEIN et al., 2009). Ker so trendi v vseb-  
nostih slednih prvin znotraj posameznih skupin  
lahko zelo različni, se skupine nadalje delijo v  
dva različna tipa; magmatski in ne-magmatski  
(WASSON, 1985). Železovi meteoriti magmatske-  
ga tipa so meteoriti, katerih nihanja vsebnosti  
slednih prvin so posledica kemijske frakcionacije  
slednih prvin pri frakcionirani kristalizaciji kov-  
inske taline v jedrih diferenciranih asteroidov  
(SCOTT, 1972). Meteoriti magmatskega tipa tako  
večinoma vsebujejo le kovinsko fazo. Železovi  
meteoriti ne-magmatskega tipa pa najverjetneje  
izvirajo iz nediferenciranih matičnih teles, brez  
kovinskega jedra (HAACK & MCCOY, 2004), pri  
katerih je zaradi delnega nataljevanja ob trkih  
prišlo le do delne diferenciacije in nastanka posa-  
meznih železovih meteoritov (MITTLEFEHLDT et al.,  
1998; BENEDIX et al., 2000; WASSON & KALLEMEYN,  
2002). Posledično vsebujejo poleg kovinske tudi  
silikatno fazo (TAGLE et al., 2003).

## Značilnosti meteorita Javorje

### Makroskopski opis

Meteorit z Javorij (sl. 1) je podolgovate, pri-  
bližno trikotne oblike, z zaobljenimi robovi ter  
zunanji merami  $15 \times 12,5 \times 11$  cm in maso  
4920 g. Površina meteorita je prekrita z debelo

rjavkasto skorjo produktov oksidacije železovo-  
nikljevih mineralov, še posebej na delu meteori-  
ta, ki je bil ob padcu delno zdrobljen. To kaže, da  
je bil meteorit izpostavljen različnim procesom  
preperevanja. Zaradi intenzivnega preperevanja  
so bile zabrisane tudi značilne vdolbinice oziroma  
regmaglipti in tanka žgalna skorja nataljene kov-  
ine, ki običajno nastanejo na površini meteorita  
zaradi taljenja in ablacije pri visokih temperatu-  
rah med njegovo potjo skozi atmosfero. Na podla-  
gi visoke stopnje preperelosti lahko sklepamo, da  
je bil meteorit na Zemlji že dalj časa, vendar bodo  
njegovo zemeljsko starost predvidoma določile  
nadaljnje raziskave. Mestoma je možno že na pre-  
pereli površini meteorita prepoznati oktaedrično  
strukturo kristalov kamacita oziroma Widman-  
stättenove vzorce (MILER & GOSAR, 2011).

### Kemijska sestava

Kemijska analiza 11 g svežega vzorca je bila  
opravljena v kemijskem laboratoriju ActLabs  
v Kanadi. Meteorit Javorje vsebuje 7,83 mas%  
Ni, 25  $\mu\text{g/g}$  Ga, 47  $\mu\text{g/g}$  Ge in 7,6  $\mu\text{g/g}$  Ir (MI-  
LER & GOSAR, 2011). Kemijska sestava ostalih  
pomembnejših elementov v meteoritu Javorje je  
podana v članku MILERJA in GOSARJEVE (2011). Po  
kemijski klasifikaciji, podani v literaturi (HUTCHI-  
SON, 2004; MITTLEFEHLDT, 2008), lahko na podlagi  
prej navedenih vsebnosti Ni, Ga, Ge in Ir uvrsti-  
mo meteorit Javorje med železove meteorite ma-  
gmatskega tipa iz kemijske skupine IIIAB. Visoke  
vsebnosti Ga in Ge ter relativno nizka vsebnost  
Ni nakazujejo, da meteorit pripada IIIA delu  
omenjene kemijske skupine glede na podatke v  
literaturi (SCOTT & WASSON, 1975).



Sl. 1. Meteorit Javorje, prekrit z debelo skorjo produktov oksidacije. Merilo na sliki znaša 1 cm.

Fig. 1. Meteorite Javorje, covered with a thick crust of oxidation products. Scale bar is 1 cm.

### Mineralna sestava

Za mineraloške analize smo od celotne mase  
meteorita odrezali 120,8 g težak trikotno obli-  
kovani kos dimenzij  $6,7 \times 4,1 \times 0,9$  cm. Površini  
obeh strani odrezanega kosa smo v zaporednih



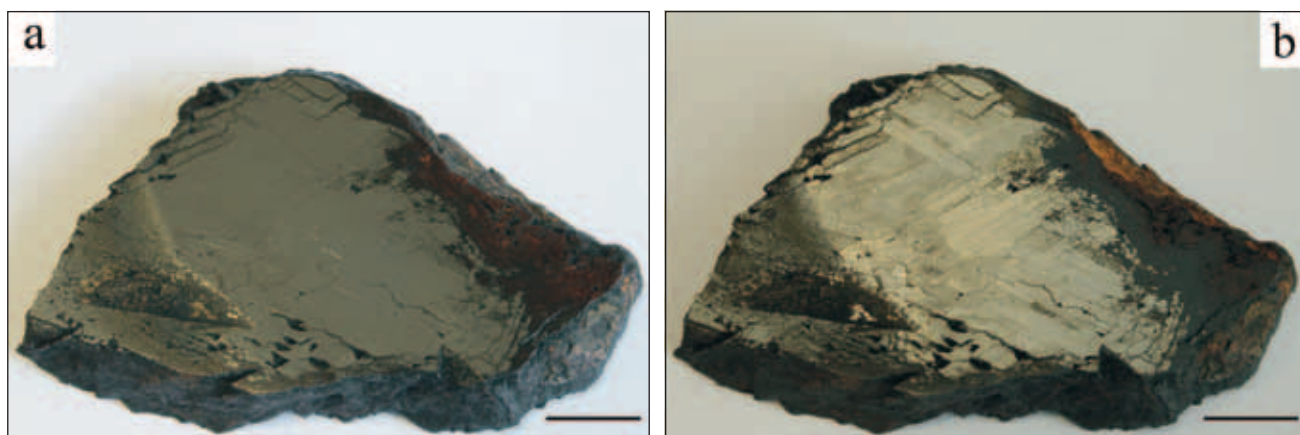
korakih zbrusili s karborundom frakcij 220, 600, 800 in 1000, nato pa ročno spolirali do zrcalnega sijaja z diamantno polirno suspenzijo frakcij 6 in 3  $\mu\text{m}$ . Polirano površino na eni strani vzorca smo jedkali s 5 % raztopino nital (5 ml koncentrirane dušikove kisline in 95 ml brezvodnega etanola) po delno modificiranem postopku po NORTONU (2002).

Poliran obrus smo pregledali z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) JEOL JSM 6490LV v kombinaciji z energijsko disperzijskim spektrometrom (EDS) Oxford INCA Energy v laboratoriju Geološkega zavoda Slovenije. Vzorec je bil naparjen s tanko plastjo ogljika in pregledan v visokem vakuumu v načinu povratno sipanih elektronov (BSE). Kemijska sestava je bila izmerjena s semi-kvantitativno točkovno EDS analizo pri pospeševalni napetosti 20 kV, delovni razdalji 10 mm in časom zajema spektra 60 s. Mineralna sestava je bila ocenjena na podlagi atomskih razmerij sestavnih elementov. Sistem je bil optimiziran za kvantifikacijo s Co standardom, korekcije EDS podatkov pa so bile opravljene s standardno ZAF korekcijo, ki je vključena v programski opremi INCA Energy (OXFORD INSTRUMENTS, 2006).

SEM/EDS analiza poliranega vzorca je pokazala, da je meteorit pretežno sestavljen iz zlitin železa in niklja, ki tvorijo dva glavna minerala: kamacit in taenit. Nastopata v obliki izmeničnih pasov dolgih kristalov kamacita, prostorsko urejenih v obliki oktaedra, in tankih letvic taenita, ki so jasno vidni na polirani in s kislino jedkani površini kot t.i. Widmanstättenovi vzorci. Na slikah 2a, b je prikazana polirana površina pred in po jedkanju. Po jedkanju so Widmanstättenovi vzorci zelo jasno izraženi. Izmerjena povprečna širina pasov kamacita je  $0,99 \pm 0,3$  mm ( $N = 50$ ). Po uporabi popravka po metodi FROSTA (1965), je bila prava širina pasov kamacita ocenjena na  $0,85 \pm 0,26$  mm (MILER & GOSAR, 2011). Glede na širino pasov kamacita uvrščamo meteorit Javorje med srednje oktaedrite. Pasovi kamacita imajo povprečno vsebnost niklja  $7,1 \pm 0,4$  mas% ( $N = 24$ ). Kamacit se ponekod v vzorcu pojavlja tudi v obliki homogenih polj okrog večjih vključkov drugih mineralnih zrn, kot je troilit, ki po BRETTU in HEN-

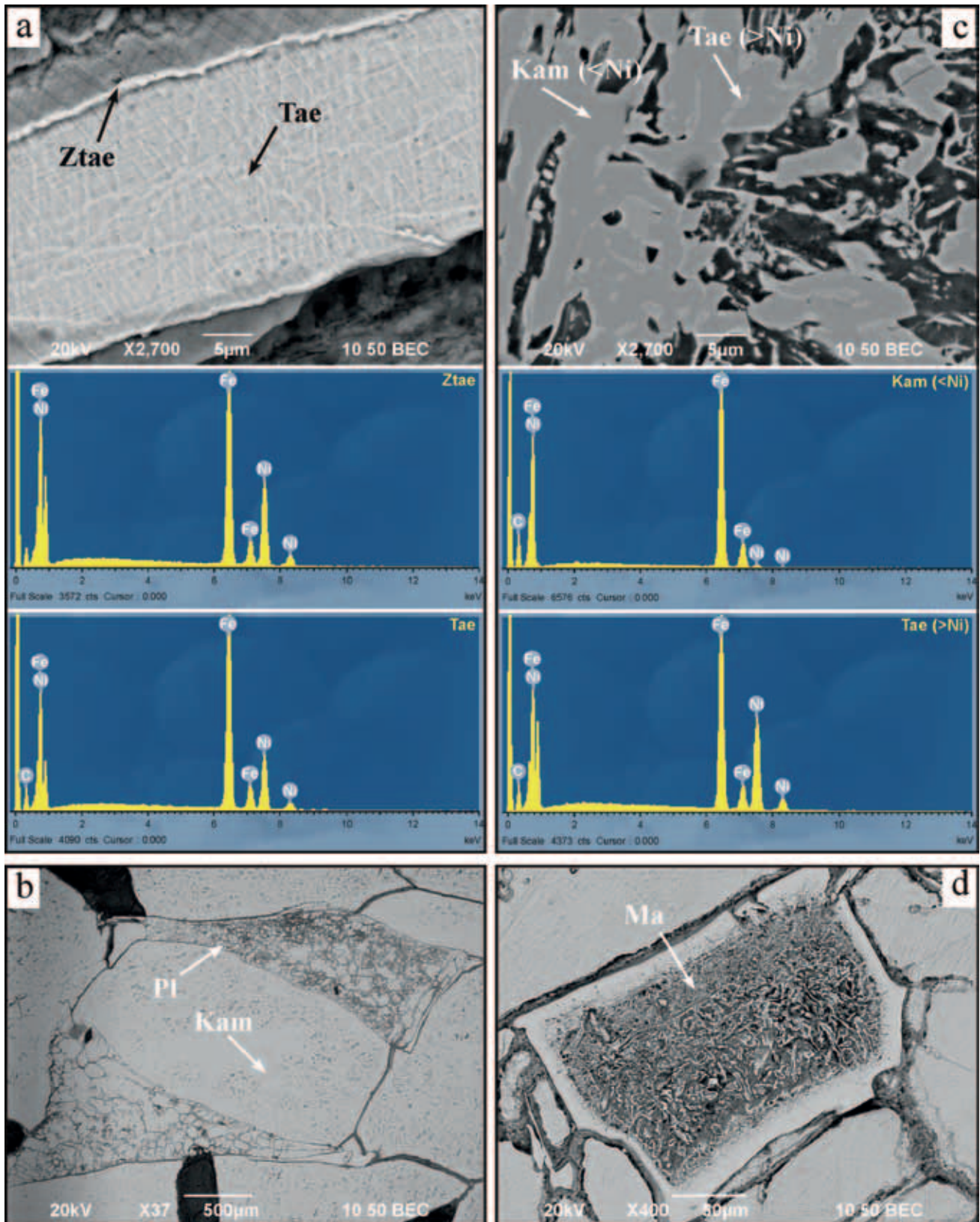
DERSONU (1967) običajno služijo kot kristalizacijska jedra za rast obdajajočega kamacita. Letvice taenita so široke povprečno 23  $\mu\text{m}$ . Povprečna vsebnost Ni v srednjem delu teh letvic je  $30,1 \pm 2,8$  mas% ( $N = 12$ ). Po jedkanju so se na zunanjih robovih letvic taenita, na meji s kamacitom, pokazale okrog 0,6  $\mu\text{m}$  debele prevleke t.i. zunanjih taenitnih obrob (sl. 3a), ki vsebujejo povprečno  $43,9 \pm 1,4$  mas% Ni. Vmesne prostore med kristali kamacita zapolnjuje drobnozrnata osnova oziroma mešanica kamacita in taenita imenovana plezit (sl. 3b). Plezit med kamacitnimi pasovi tvori relativno velika polja in se pojavlja v štirih teksturnih različicah, med katerimi sta najpogostejši satasta (sl. 3b) in mrežasta, medtem ko sta martenzitni plezit, sestavljen iz nizko-Ni kamacita in visoko-Ni taenita (sl. 3c, 3d), ter celični plezit manj pogosta (MILER & GOSAR, 2011).

V meteoritu Javorje smo določili še naslednje akcesorne in značilne minerale: železovo nikljev fosfid (schreibersit in njegov morfološki različek rhabdit), železovo kromov sulfid (daubréelit), železov sulfid (troilit), kromov nitrid (carlsbergit) in kromit (MILER & GOSAR, 2011). Rhabdit se pojavlja v obliki dolgih prizmatičnih in igličastih kristalov, ki so pravokotni eden na drugega in tvorijo mrežasto teksturo v kamacitu (sl. 4a). Schreibersit običajno nastopa v združbi z ostalimi akcesornimi minerali, kot sta daubréelit (sl. 4b) in troilit, na mejah med taenitom in kamacitom (sl. 4c) ter redko kot masivna posamezna zrna. Glede na podatke podane v literaturi (CLARKE & GOLDSTEIN, 1978; YANG & GOLDSTEIN, 2005) lahko sklepamo, da se je večina železovo nikljevih fosfidov v meteoritu Javorje najverjetneje izločila pri ohlajanju med 500 in 400  $^{\circ}\text{C}$ , po nastanku Widmanstättenovih vzorcev, zaradi nasičenja kamacita ali taenita s P. Daubréelit nastopa kot posamezna masivna evhedralna zrna, obdana s tanko obrobo carlsbergita (sl. 4d), kot progasti daubréelit s tankimi letvicami troilita (sl. 5a) ter kot nepravilne letvice in žilice v zrnih troilita (sl. 5b), ki so se izločile pri razpadu trdne raztopine FeS in CrS. Masivni in progasti daubréelit sta pogosto v združbi s schreibersitom (sl. 4b). Nekatera zrna daubréelita so obrobljena tudi s kovinskim



Sl. 2. Površina polirane ploščice meteorita Javorje a) pred jedkanjem in b) po jedkanju. Po jedkanju so Widmanstättenovi vzorci zelo jasno izraženi. Merilo na sliki znaša 1 cm.

Fig. 2. Surface of polished slab of meteorite Javorje a) before etching and b) after etching. After etching, the Widmanstätten patterns are very distinct. Scale bar is 1 cm.



Sl. 3. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri glavnih mineralov in tekstur v meteoritu Javorje. a) Zunanje robove taenitnih letvic (Tae) sestavljajo t.i. zunanje taenitne obrobe (Ztae), ki so se pokazale po jedkanju. Iz spektrov, posnetih v točkah Ztae in Tae, je razvidno, da zunanje taenitne obrobe (Ztae) vsebujejo več Ni kot osrednji del taenitne letvice (Tae). b) Prostori med kristali kamacita (Kam) so zapolnjeni večinoma s satastim plezitom (Pl). c) Martenzitni plezit je sestavljen iz nizko-Ni kamacita (Kam (<Ni)) in visoko-Ni taenita (Tae (>Ni)), kot je razvidno tudi iz spektrov pod SEM sliko. d) Martenzitni plezit (Ma) po jedkanju. Vzorec je neparjen z ogljikom.

Fig. 3. SEM (BSE) images and EDS spectra of major minerals and structures in meteorite Javorje. a) Outer edges of taenite lamellae (Tae) are composed of outer taenite rims (Ztae), revealed after etching. Spectra taken at points Ztae and Tae show that outer taenite rims (Ztae) contain more Ni than the central part of taenite lamella (Tae). b) Spaces between kamacite crystals (Kam) are filled mostly by comb plesitite (Pl). c) Martensitic plesitite consists of low-Ni kamacite (Kam (<Ni)) and high-Ni taenite (Tae (>Ni)), as evident from the spectra below the SEM image. d) Martensitic plesitite (Ma) after etching. Sample is coated with carbon.



Cu (sl. 5c), ki se je najverjetneje izločil po nastanku carlsbergita, ter z majhnimi subhedralnimi kristali dimenzij  $3,1 \times 0,8 \mu\text{m}$  (sl. 5d). Ti kristali vsebujejo Co in relativno visoke vsebnosti Ni in S glede (sl. 5d) na sosednje minerale, ki so daubrélit in Fe-oksihidroksidi. Ker so kristali zelo majhni, najverjetneje večina Fe in O v spektru izvira iz Fe-oksihidroksidov, del Fe, S in Cr pa iz daubrélita kot posledica prekrivanja snopa elektronov. Kristali s Co, Ni in S so verjetno nastali pri procesih preperevanja kamacita, daubrélita in železovo nikljevih fosfidov. Glede na njihovo sestavo bi morda lahko šlo za sulfida siegenit ali willamaninit. Troilit je redek in se pojavlja kot veliki zaobljeni, podolgovati vključki (sl. 5b), obdani s homogenim kamacitom, kot posamezna zrna na mejah med pasovi kamacita in kot zelo tanke letvice v progastem daubrélitu (sl. 5a). Zrna troilita vsebujejo tudi manjše vsebnosti Cr kot posledica nepopolnega izločanja daubrélita iz trdne raztopine ali prisotnosti zelo tankih letvic daubrélita izločenih v troilitu (MILER & GOSAR, 2011). Carlsbergit v meteoritu Javorje nastopa kot submikronski evhedralni kristali (sl. 6a), ki obdajajo zrna masivnega daubrélita (sl. 4d). Na jedkani strani vzorca meteorita je bilo prepoznano subhedralno zrno dimenzij  $12,7 \times 7,2 \mu\text{m}$  z relativno visokimi vsebnostmi Fe, Cr in N ter nizko vsebnostjo Ni (sl. 6b). Atomska razmerja sestavnih elementov, izmerjenih s semi-kvantitativno EDS analizo, so pokazala, da ima zrno sestavo (Fe,Cr)N, ki bi po ANTHONYJU in sodelavcih (2009) lahko odgovarjala carlsbergitu z manjšo vsebnostjo Fe. Faze s podobno sestavo nastajajo tudi v jeklih z visoko vsebnostjo N in so posledica raztapljanja dela Fe v kubičnem kromovem nitridu, medtem ko je topnost Ni zanemarljiva (GAVRI-LJUK & BERNS, 1999). Kromit se pojavlja v združbi s troilitom in daubrélitom v enem samem velikem vključku, ki je sestavljen iz treh vzporednih plasti troilita, kromita in daubrélita. Ta združba mineralov je, upoštevajoč literaturne podatke (KRACHER, 1983; OLSEN et al., 1999), najverjetneje posledica oksidacije daubrélita med kristalizacijo jedra, pri čemer sta nastala kromit in troilit z ostanki prvotnega daubrélita

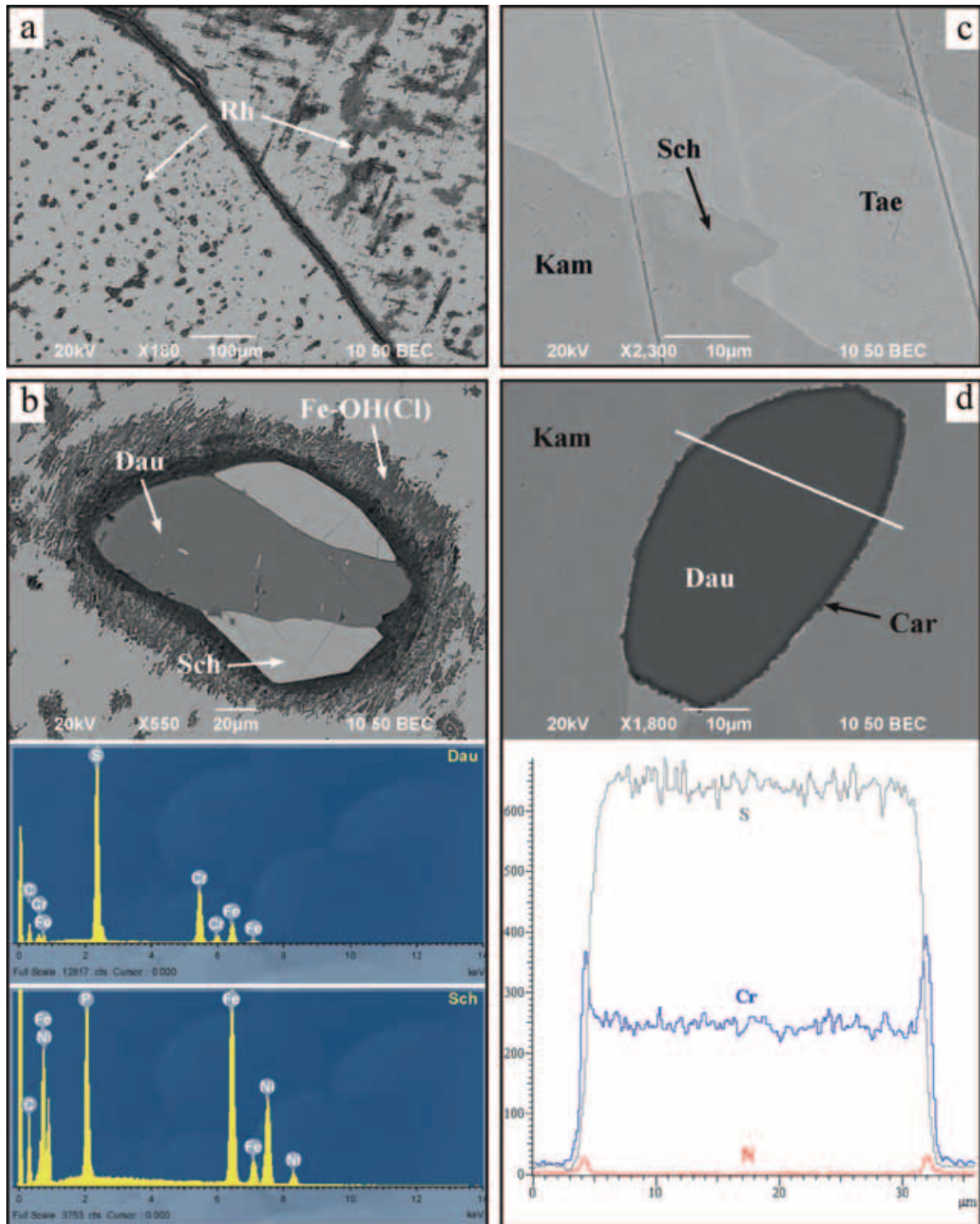
Kot posledica preperevanja v atmosferskih pogojih sta kamacit in taenit na površini ter vzdolž razpok in zrn mineralov v notranjosti meteorita, približno 2 do 3 cm pod površino, oksidirala v sekundarne Fe-oksihidrokside z manjšimi vsebnosti Ni (MILER & GOSAR, 2011). To so predvsem goethit in/ali lepidokrokite ter s Cl bogat Fe-oksihidroksid akaganéit (sl. 7a). Akaganéit je prvi produkt oksidacije Fe-Ni mineralov (BUCHWALD & CLARKE, 1989) zato se pojavlja v razpokah ter okrog rhabdita (sl. 7b) in zrn daubrélita (sl. 4b) globoko v notranjosti meteorita, predvsem pa na čelu korozije v neposrednem stiku s svežim kamacitom (sl. 7c). Cl izvira iz talne vode in vstopa v proces oksidacije kamacita zaradi elektrokemijske narave procesa pri čemer se Cl veže na anionska izmenjalna mesta Fe-oksihidroksidov (BUCHWALD & CLARKE, 1989). Z oddaljenostjo od čela korozije akaganéit postopoma prehaja v

goethit in/ali lepidokrokite (sl. 7a). Z napredujočo oksidacijo se namreč ioni Cl v akaganéitu popolnoma nadomestijo z  $(\text{OH})^{-1}$  ioni zaradi česar akaganéit v celoti preide v čiste Fe-oksihidrokside (BUCHWALD & CLARKE, 1989). Prisotnost S v spektru čistih Fe-oksihidroksidov (sl. 7a) je verjetno posledica oksidacije sulfidnih mineralov.

### **Hitrost ohlajanja meteorita Javorje**

Hitrost ohlajanja železovih meteoritov daje informacije o njihovi termični zgodovini, ki so pomembne za določitev izvora meteoritov in za interpretacijo nastanka njihovega matičnega telesa. Prav tako omogoča oceno velikosti (NORTON, 2002) in zgradbe matičnega telesa; debeline silikatnega plašča in velikosti kovinskega jedra (YANG & GOLDSTEIN, 2006; GOLDSTEIN et al., 2009). Hitrost ohlajanja je značilna za vsako kemijsko skupino železovih meteoritov in se praviloma spreminja obratno sorazmerno z vsebnostjo Ni (YANG & GOLDSTEIN, 2006). Poleg značilnih razlik v hitrosti ohlajanja med kemijskimi skupinami so tudi znotraj posameznih skupin razponi v hitrosti ohlajanja precej veliki. Zelo veliki razponi so lahko posledica trkov velikih diferenciranih matičnih teles z drugimi večjimi telesi, pri čemer so prvotna matična telesa razpadla na več manjših, ki so se različno hitro ohlajala (YANG et al., 2008; GOLDSTEIN et al., 2009; YANG et al., 2010). Na podlagi hitrosti ohlajanja posameznega meteorita je možno oceniti, v katerem delu jedra matičnega telesa je le-ta nastal. Zunanji deli kovinskih jeder se namreč praviloma ohlajajo hitreje kot notranji deli jeder (MOSKOVITZ & WALKER, 2011). Izračunane hitrosti ohlajanja železovih meteoritov skupine IIIAB se gibljejo v razponu med  $56\text{--}338 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mio let}$  (YANG & GOLDSTEIN, 2006). Na podlagi teh podatkov so sklepali, da meteoriti skupine IIIAB najverjetneje izvirajo iz enega samega matičnega telesa s premerom med 40 in 60 km (HAACK et al., 1990), čeprav niso nastali v enem samem jedru. To pomeni, da je diferencirano matično telo pred razpadom verjetno doživelo več trkov z večjimi telesi, pri čemer se mu je na nekaterih delih velikost povečala zaradi dodajanja novega materiala na površini, na drugih delih pa je bil odstranjen večji del plašča in skorje.

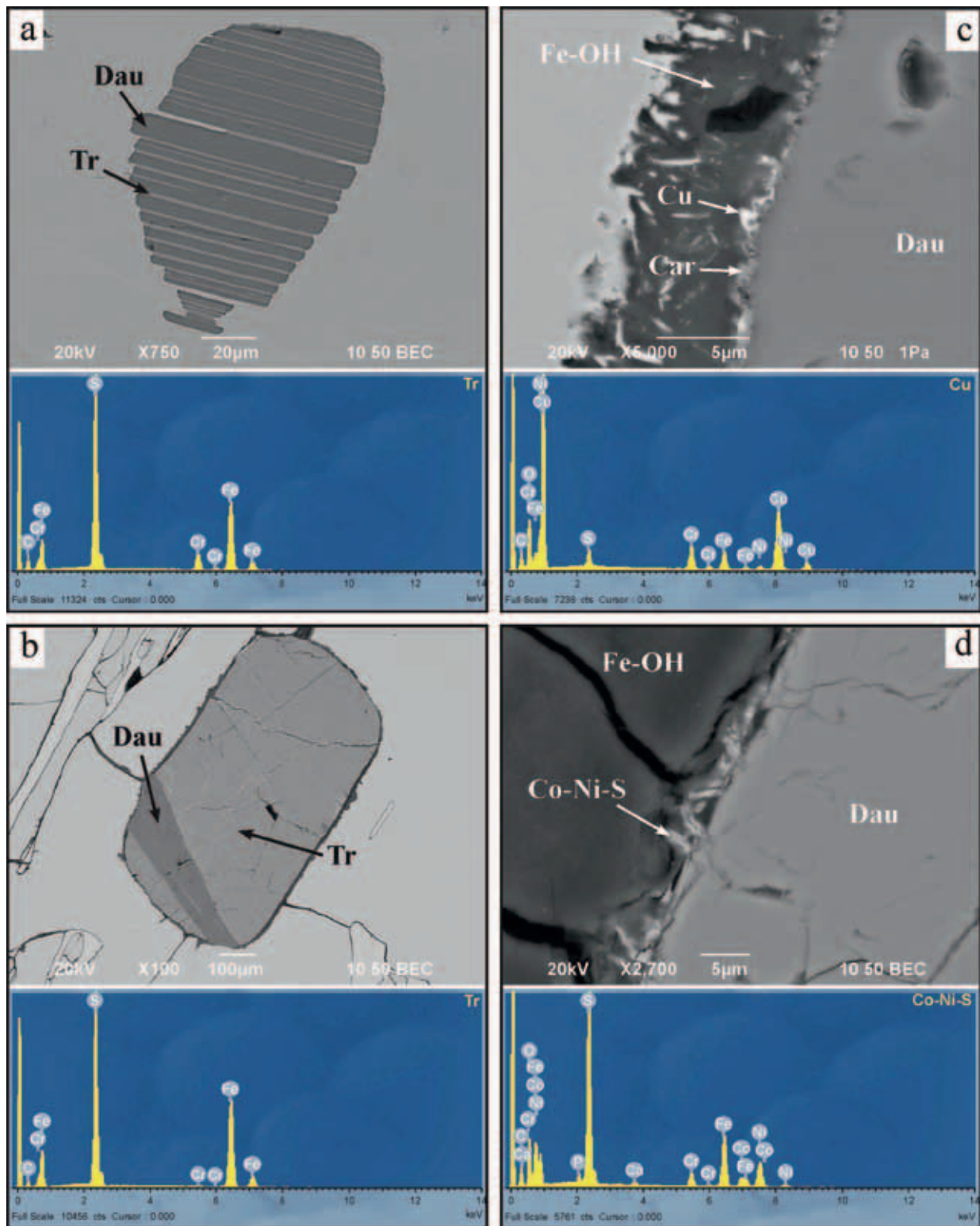
Hitrost ohlajanja železovega meteorita Javorje je bila ocenjena iz korelacije med vsebnostjo Ni, izmerjene v sredini letvice taenita, in polovično širino letvice, pri kateri je bila upoštevana korekcija zaradi orientacije preseka. Povprečna centralna vsebnost Ni v petih izmerjenih letvicah taenita znaša 29,4 mas% in povprečna polovična širina letvice znaša  $9,8 \mu\text{m}$ . Pri oceni hitrosti ohlajanja sta bili upoštevani tudi celokupni vsebnosti Ni (7,83 mas%) in P (0,12 mas%) v meteoritu. Na podlagi primerjave z rezultati meritev in izračuna hitrosti ohlajanja v meteoritih skupine IIIAB s podobnimi vsebnostmi Ni in P, ki sta jih dobila YANG in GOLDSTEIN (2006), je bila tako ocenjena hitrost ohlajanja meteorita Javorje med 50 in  $180 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mio let}$ . Ocenjena hitrost ohlajanja meteorita Javorje je znotraj razpona značilnega za skupino IIIAB



Sl. 4. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri akcesornih mineralov v meteoritu Javorje. a) Dolgi prizmatični in igličasti kristali rhabdita (Rh) so pravokotni eden na drugega in tvorijo mrežasto teksturo v kamacitu. b) Zrno daubrélita (Dau) v združbi s schreibersitom (Sch). Kemijska sestava obeh mineralov je razvidna iz spektrov pod SEM sliko. Ob zrnu je kamacit oksidiral v sekundarni s Cl bogat Fe-oksihidroksid akaganéit ( $\text{Fe-OH(Cl)}$ ). c) Schreibersit (Sch) na meji med kamacitom (Kam) in taenitom (Tae). d) Zrno daubrélita (Dau) v kamacitu (Kam) obdano s tanko plastjo carlsbergita (Car). Črta preko zrna označuje območje linijske EDS analize, ki je prikazana v grafu pod SEM sliko. Graf prikazuje spreminjanje relativne vsebnosti Cr, S in N preko analiziranega zrna. Vsebnosti Cr in N sta višji na robovih zrna, kar nakazuje prisotnost carlsbergita. Vzorec je neparjen z ogljikom.

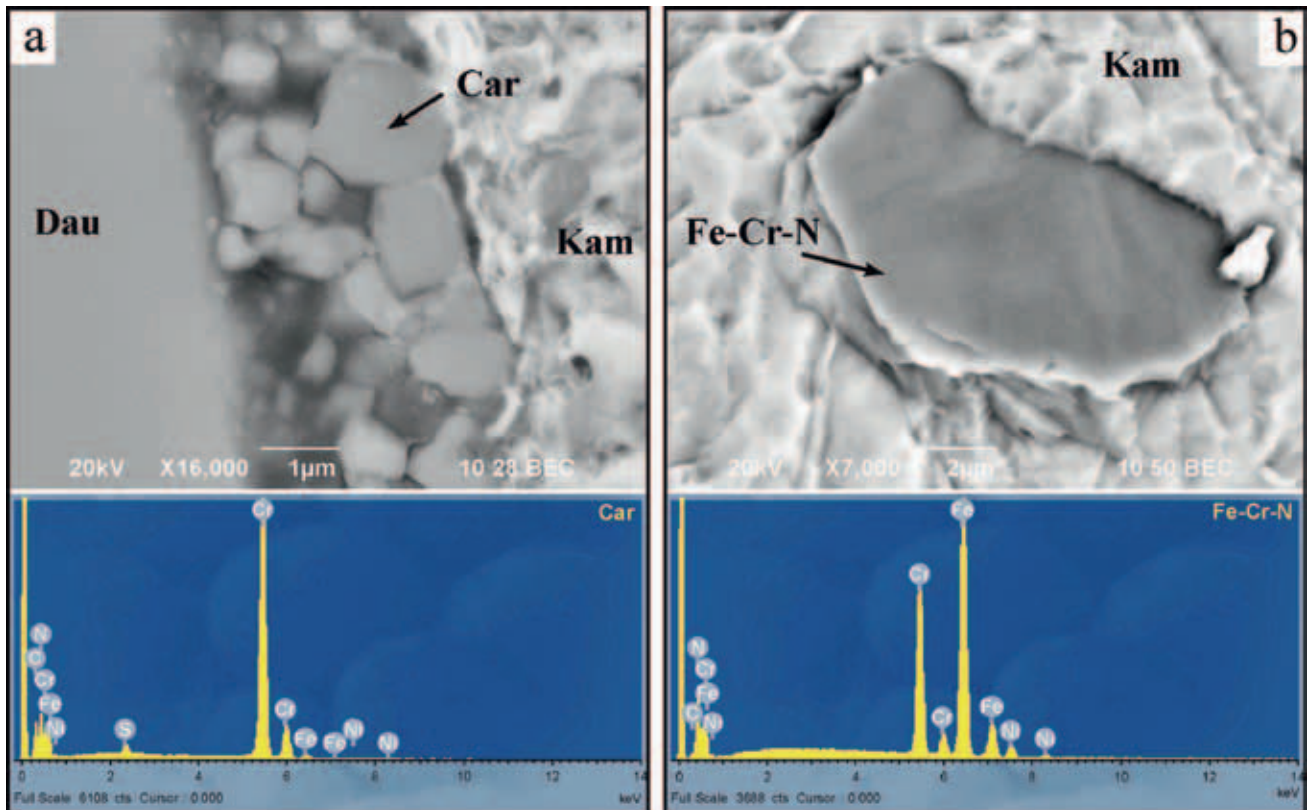
Fig. 4. SEM (BSE) images and EDS spectra of accessory minerals in meteorite Javorje. a) Long prismatic and acicular rhabdite crystals (Rh) are perpendicular to each other and form net-like inclusions in kamacite. b) Daubréelite grain (Dau) associated with schreibersite (Sch). Chemical composition of both minerals is shown in spectra below the SEM image. Kamacite around daubréelite oxidised into secondary Cl-rich Fe-oxyhydroxide akaganéite ( $\text{Fe-OH(Cl)}$ ). c) Schreibersite (Sch) at the boundary between kamacite (Kam) and taenite (Tae). d) Daubréelite grain (Dau) in kamacite (Kam) rimmed with a thin layer of carlsbergite (Car). Line on the image marks the area of EDS line analysis, which is shown in graph below the SEM image. Graph shows variations in relative contents of Cr, S and N across the analysed grain. Cr and N contents are much higher at the edges of daubréelite, which indicates presence of carlsbergite. Sample is coated with carbon.





Sl. 5. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri akcesornih mineralov v meteoritu Javorje. a) Progasti daubréelit (Dau) s tankimi letvicami troilita (Tr). Cr v spektru troilita (Tr) pod SEM sliko izvira iz okoliškega daubréelita. b) Troilit (Tr) z nepravilnimi letvicami in žilicami daubréelita (Dau). Cr v spektru troilita (Tr) pod SEM sliko je najverjetneje posledica nepopolnega izločanja daubréelita iz trdne raztopine FeS-CrS. c) Zrno daubréelita (Dau) obdano s carlsbergitom (Car), na katerem se je izločil kovinski Cu (Cu), ter Fe-oksihidroksidi (Fe-OH). Cr, Fe, Ni in S v spektru kovinskega Cu (Cu) izvirajo iz sosednjega daubréelita in Fe-oksihidroksidov. d) Zrno daubréelita (Dau) obdano s kristali, ki vsebujejo Co, Ni in S (Co-Ni-S) in Fe-oksihidroksidi (Fe-OH). Fe, Cr in O v spektru zrn s Co, Ni in S (Co-Ni-S) izvirajo iz sosednjega daubréelita in Fe-oksihidroksidov. Vzorec je neparjen z ogljikom.

Fig. 5. SEM (BSE) images and EDS spectra of accessory minerals in meteorite Javorje. a) Barred daubréelite (Dau) with thin troilite lamellae (Tr). Cr in the spectrum of troilite (Tr) below the SEM image originates from surrounding daubréelite. b) Troilite (Tr) with irregular lamellae and veinlets of daubréelite (Dau). Cr in the spectrum of troilite (Tr) below the SEM image results from incomplete exsolution of daubréelite from the FeS-CrS solid solution. c) Daubréelite grain (Dau) rimmed with carlsbergite (Car), onto which native Cu (Cu) precipitated, and Fe-oxyhydroxides (Fe-OH). Cr, Fe, Ni and S in the spectrum of native Cu (Cu) originate from the adjacent daubréelite and Fe-oxyhydroxides. d) Daubréelite grain (Dau) rimmed with crystals containing Co, Ni and S (Co-Ni-S) and Fe-oxyhydroxides (Fe-OH). Fe, Cr and O in the spectrum of Co-, Ni- and S-bearing grains originate from the adjacent daubréelite and Fe-oxyhydroxides. Sample is coated with carbon.



Sl. 6. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri akcesornih mineralov v jedkanem vzorcu meteorita Javorje. a) Detajl evhedralnih kristalov carlsbergita (Car) okrog daubrélita (Dau). Pod SEM sliko je spekter carlsbergita (Car), v katerem Fe, Ni in S najverjetneje izvirajo iz sosednjega daubrélita in kamacita (Kam). b) Zrno, ki vsebuje Fe, Cr in N (Fe-Cr-N), se je pokazalo v kamacitu (Kam) po jedkanju. Najverjetneje gre za carlsbergit z manjšo vsebnostjo Fe. Ni v spektru tega zrna (Fe-Cr-N) izvira iz okoliškega kamacita. Vzorec je neparjen z ogljikom.

Fig. 6. SEM (BSE) images and EDS spectra of accessory minerals in etched sample of meteorite Javorje. a) Detail of euhedral carlsbergite crystals (Car) around daubréelite (Dau). Spectrum of carlsbergite (Car) below the SEM image contains Fe, Ni and S, which probably originate from the adjacent daubréelite and kamacite (Kam). b) Grain, consisting of Fe, Cr and N (Fe-Cr-N), revealed in kamacite (Kam) after etching. It is most probably carlsbergite with lower content of Fe. Ni in the spectrum of this grain (Fe-Cr-N) results from the surrounding kamacite. Sample is coated with carbon.

(YANG & GOLDSTEIN, 2006). V diagramu vsebnosti Ni v odvisnosti od razdalje (sl. 8a, b), izmerjene s semi-kvantitativno EDS analizo 30 točk v razmiku 1,08 µm preko letvice taenita, so opazne razlike v vsebnosti Ni med robovi in centralnim delom letvic taenita. Hitrost ohlajanja oz. kristalizacije namreč vpliva na difuzijo Ni v kamacitu in taenitu, kar se odraža v nehomogeni porazdelitvi Ni v letvicah taenita (NORTON, 2002). Glede na dano širino merjene letvice taenita je razlika v vsebnosti Ni relativno majhna in je v skladu z visoko stopnjo difuzije Ni v taenitu. Meteorit Javorje ima v primerjavi z drugimi meteoriti iz skupine IIIAB relativno visoke vsebnosti siderofilnih elementov z višjim tališčem od Fe, kot je Ir, in nizke vsebnosti elementov z nižjim tališčem od Fe, kot je Ni. Glede na vsebnosti Ir in Ni ter ocenjeno hitrost ohlajanja je meteorit Javorje najverjetneje nastal v zunanjem delu jedra matičnega telesa zgodaj v procesu njegove kristalizacije.

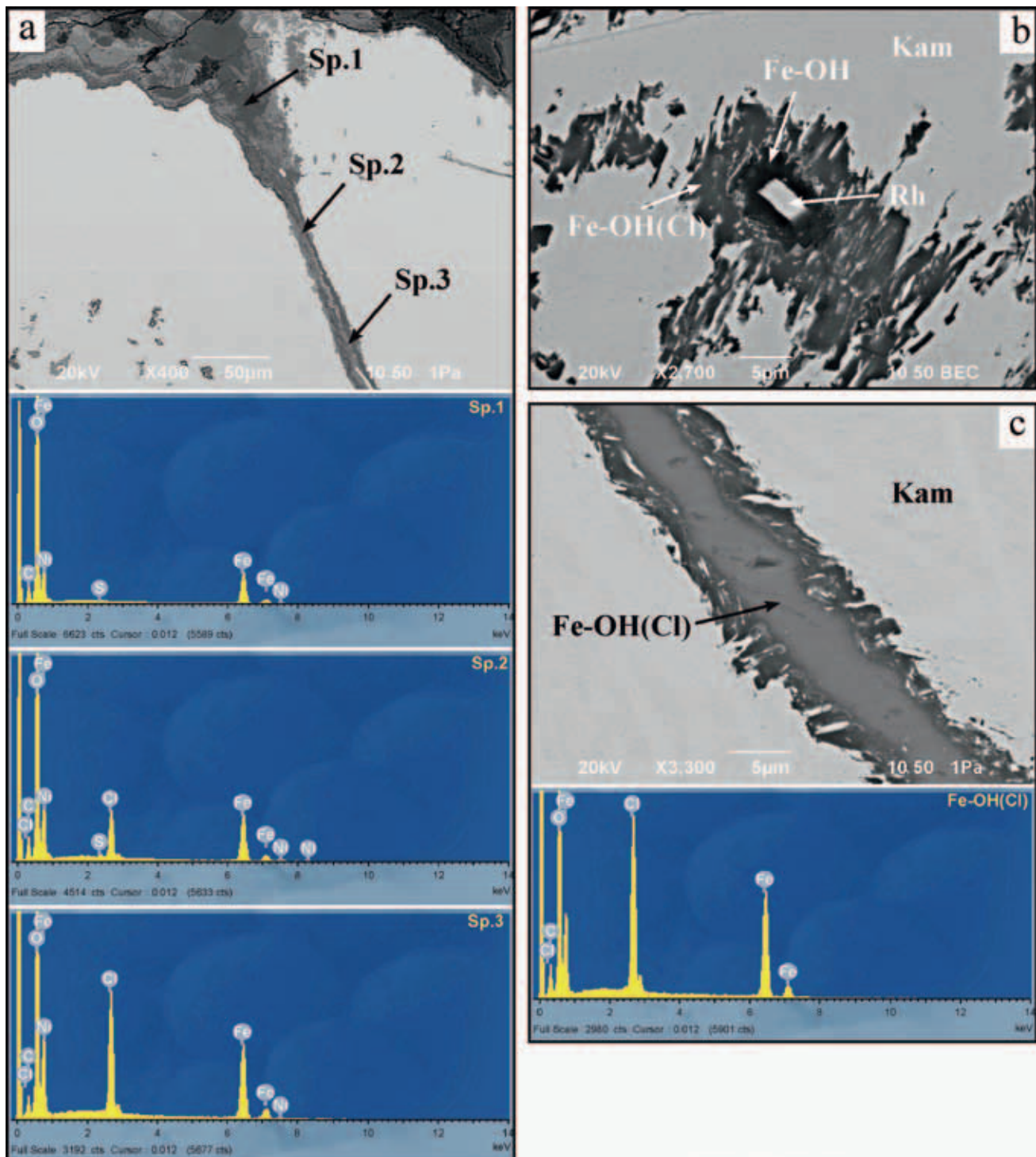
Po YANGU in GOLDSTEINU (2005) so Widmanstättenovi vzorci in pleziti v meteoritih skupine IIIAB, ki vsebujejo pod 8 mas% Ni in pod 0,3 mas% P, med katere sodi tudi meteorit Javorje, nastali z ohlajanjem s pretvorbo prvotnega visokotemperaturnega taenita preko vmesne faze z metastabilnim martenzitom in visoko-Ni taenitom v kamacit, nizekotemperaturni taenit in fos-

fide. Pri tem naj bi imel nizekotemperaturni taenit centralno vsebnost Ni podobno celokupni vsebnosti Ni v meteoritu, kamacit pa le nekoliko nižjo od celokupne vsebnosti Ni. Vendar pa so EDS meritve centralne vsebnosti Ni v letvicah taenita (sl. 8a, b) v meteoritu Javorje pokazale, da so le-te precej višje od vsebnosti Ni v sosednjem kamacitu in tudi višje od celokupne vsebnosti Ni v meteoritu. To pa nakazuje, da so strukture v meteoritu Javorje najverjetneje nastale s pretvorbo prvotnega visokotemperaturnega taenita preko metastabilne faze z martenzitno strukturo v kamacit, nizekotemperaturni taenit in fosfide. Tak način nastanka struktur potrjuje tudi povprečna vsebnost Ni v martenzitnih plezilih, ki je precej višja od celokupne vsebnosti v meteoritu (YANG & GOLDSTEIN, 2005).

#### Zahvala

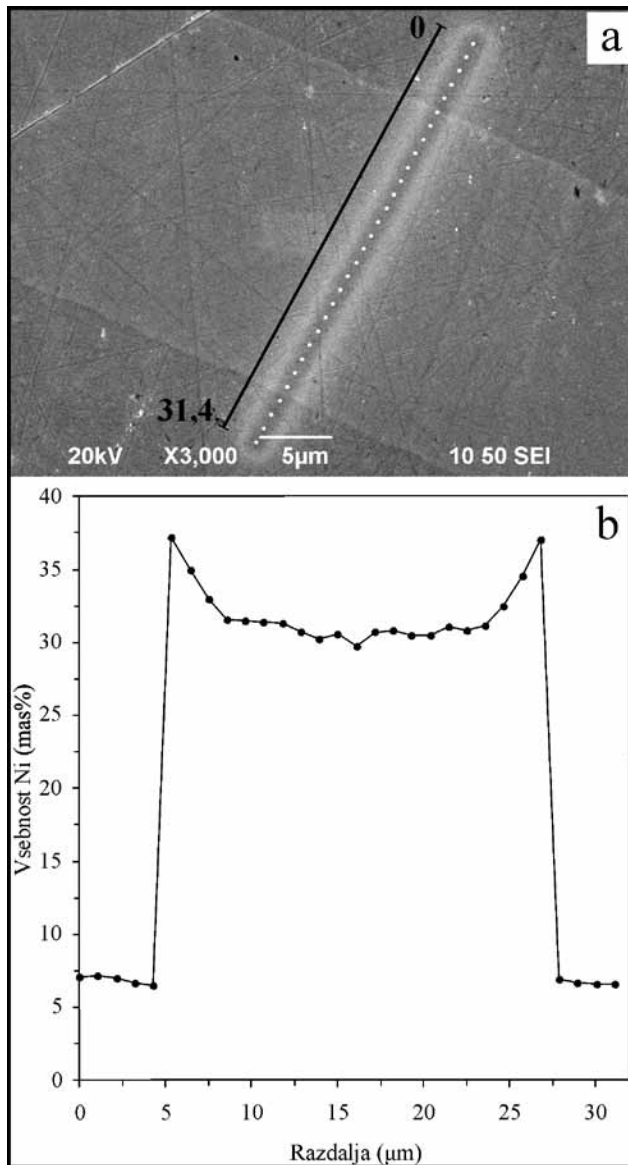
Raziskava je bila izvedena v okviru raziskovalnega programa Podzemne vode in geokemija (P1-0020), ki ga financira Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Avtorja se zahvaljujeta dr. Hassanu Neinavaiu za koristne nasvete in tehničnemu sodelavcu GeoZS Mladenu Štumergarju za pomoč pri izdelavi poliranega obrusa.





Sl. 7. SEM (BSE) posnetki in EDS spektri sekundarnih produktov preperevanja v meteoritu Javorje. a) Oksidacija je ob razpokah prodrla globoko v notranjost meteorita. Akaganéit (sp.3) z oddaljenostjo od čela korozije postopoma prehaja v Fe-oksihidrokside (sp.1). Prisotnost Ni in S v spektrih pod SEM sliko je posledica oksidacije sulfidov in Fe-Ni mineralov. b) Kamacit (Kam) okrog evhedralnega zrna prizmatičnega rhabdita (Rh) je oksidiral v akaganéit (Fe-OH(Cl)) ter Fe-oksihidrokside (Fe-OH). c) Detajl razpoke na čelu korozije. Razpoko zapolnjuje akaganéit (Fe-OH(Cl)), katerega kemijska sestava je prikazana v spektru pod SEM sliko. Vzorec je neparjen z ogljikom.

Fig. 7. SEM (BSE) images and EDS spectra of secondary weathering products in meteorite Javorje. a) Oxidation penetrated along the cracks deep into the interior of meteorite. Akaganéite (sp.3) gradually passes into Fe-oxyhydroxides (sp.1) with increasing distance from the corrosion front. Presence of Ni and S in spectra below the SEM image is a consequence of oxidation of sulphides and Fe-Ni minerals. b) Kamacite (Kam) around euhedral grain of prismatic rhabdite (Rh) oxidised into akaganéite (Fe-OH(Cl)) and Fe-oxyhydroxides (Fe-OH). c) Detail of a crack at the corrosion front. The crack is filled by akaganéite (Fe-OH(Cl)), whose chemical composition is shown in the spectrum below the SEM image. Sample is coated with carbon.



Sl. 8. a) SEM (SE) posnetek letvice taenita po opravljenih 30 točkovnih EDS meritvah preko letvice v dolžini 31,4 μm. b) V diagramu vsebnosti Ni v odvisnosti od razdalje so opazne razlike v vsebnosti Ni med robovi in centralnim delom letvice taenita. Centralna vsebnost Ni v letvici taenita je precej višja od vsebnosti Ni v sosednjem kamacitu.

Fig. 8. a) SEM (SE) image of taenite lamella after 30 point EDS analyses across the lamella, 31.4 μm in length. b) Graph of Ni content vs. distance shows distinct differences in Ni content between edges and central part of the taenite lamella. Central Ni content in taenite lamella is much higher than the Ni content in adjacent kamacite.

## Literatura

- ANDERS, E. 1964: Origin, age, and composition of meteorites. *Space Science Reviews*, 3: 583-714.
- ANTHONY, J. W., BIDEAUX, R. A., BLADH, K. W. & NICHOLS, M. C. 2009: The Handbook of Mineralogy [online]. Mineralogical Society of America. Internet: <http://www.handbookofmineralogy.org/> (10. 3. 2012).
- ATANACKOV, J., JERŠEK, M., KAC, J., KLADNIK, G. & MIRTič, B. 2010: Meteorit z Mežakle. V: KONOBE LJ, T. (ur.): Meteorit z Mežakle. Ministrstvo RS za kulturo, Ljubljana; Občina Jesenice; Občina Gorje: 7-14.
- BENEDIX, G. K., MCCOY, T. J., KEIL, K. & LOVE, S. G. 2000: A petrologic study of the IAB iron meteorites: Constraints on the formation of the IAB-widonaite parent body. *Meteoritics & Planetary Science*, 35: 1127-1141.
- BISCHOFF, A., JERŠEK, M., GRAU, T., MIRTič, B., OTT, U., KUČERA, J., HORSTMANN, M., LAUBENSTEIN, M., HERRMANN, S., RANDA, Z., WEBER, M. & HEUSSER, G. 2011: Jesenice-A new meteorite fall from Slovenia. *Meteoritics & Planetary Science*, 46/6: 793-804, doi:10.1111/j.1945-5100.2011.01191.x.
- BOŽIČ, D. 2008: Meteorit iz Avč. V: Božič, D. (ur.): Meteorit iz Avč v dolini Soče: 1908-2008. Prirodoslovni muzej Slovenije, Ljubljana; Športno-kulturno-turistično društvo, Avče: 17-19.
- BRETT, R. & HENDERSON, E. P. 1967: The occurrence of lamellar troilite in iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31/5: 721-724.
- BUCHWALD, V. F. 1975: Handbook of iron meteorites, I-III. University of California Press, Berkeley: 1418 p.
- BUCHWALD, V. F. 1977: The mineralogy of iron meteorites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 286: 453-491.
- BUCHWALD, V. F. & CLARKE, R. S. Jr. 1989: Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganeite (FeO(OH,Cl)): The Antarctic meteorite case. *American Mineralogist*, 74: 656-667.
- CARDARELLI, F. 2008: Materials handbook: a concise desktop reference, 2. izdaja. Springer, London: 1340 p.
- CLARKE, R. S. Jr. & GOLDSTEIN, J. I. 1978: Schreibersite growth and its influence on the metallography of coarse-structured iron meteorites. *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences*, 21. Smithsonian Institution Press, Washington: 79 p.
- FROST, M. T. 1965: Kamacite plate width estimation in octahedrites. *Mineralogical Magazine*, 35: 640-642.
- GAVRILJUK, V. G. & BERNS, H. 1999: High nitrogen steels: structure, properties, manufacture, applications. Springer, Berlin-Heidelberg: 378 p.
- GOLDSTEIN, J. I., SCOTT, E. R. D. & CHABOT, N. L. 2009: Iron meteorites: Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin. *Chemie der Erde*, 69: 293-325, doi:10.1016/j.chemer.2009.01.002.
- HAACK, H., RASMUSSEN, K. L. & WARREN, P. H. 1990: Effects of regolith/megaregolith insulation on the cooling histories of differentiated asteroids. *Journal of Geophysical Research*, 95: 5111-5124.
- HAACK, H. & MCCOY, T. J. 2004: Iron and stony-iron meteorites. V: DAVIS, A. M., HOLLAND, H. D. & TUREKIAN, K. I. (ur.): Meteorites, Comets, and Planets, Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1: 325-345.
- HUTCHISON, R. 2004: Meteorites: A petrologic, chemical and isotopic synthesis. Cambridge University Press, Cambridge: 520 p.



- KRACHER, A. 1983: Notes on the evolution of the IIIAB/pallasite parent body (abstract). *Lunar and Planetary Science XIV*: 405-406.
- LEWIS, J. S. 2004: *Physics and chemistry of the Solar system, 2. izdaja*. Elsevier Academic Press, San Diego: 655 p.
- LOVERING, J. F., NICHIPORUK, W., CHODOS, A. & BROWN, H. 1957: The distribution of gallium, germanium, cobalt, chromium, and copper in iron and stony-iron meteorites in relation to nickel content and structure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 11: 263-278.
- MAURETTE, M. 2006: *Micrometeorites and the Mysteries of Our Origins*. Springer, Berlin-Heidelberg: 330 p.
- MILER, M. & GOSAR, M. 2011: Mineral and chemical composition of the new iron meteorite Javorje from Slovenia. *Meteoritics & Planetary Science*, 46/12: 1939-1946, doi:10.1111/j.1945-5100.2011.01291.x.
- MITTFELDELDT, D. W. 2008: Appendix: Meteorites-A brief tutorial. V: MACPHERSON, G. J., MITTFELDELDT, D. W., & JONES, J. H. (ur.): *Oxygen in the solar system*. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 68. Mineralogical Society of America, Chantilly: 571-590.
- MITTFELDELDT, D. W., MCCOY, T. J., GOODRICH, C. A. & KRACHER, A. 1998: Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies. V: PAPIKE, J. J. (ur.): *Planetary Materials*. *Reviews in Mineralogy*, vol. 36. Mineralogical Society of America, Washington: 4-195.
- MOSKOVITZ, N. A. & WALKER, R. J. 2011: Size of the group IVA iron meteorite core: Constraints from the age and composition of Muonionalusta. *Earth and Planetary Science Letters*, 308: 410-416, doi:10.1016/j.epsl.2011.06.010.
- NORTON, O. R. 1998: *Rocks from space: Meteorites and meteorite hunters*. Mountain Press Publishing, Missoula: 447 p.
- NORTON O. R. 2002: *The Cambridge encyclopedia of meteorites*. Cambridge University Press, Cambridge: 354 p.
- NORTON, O. R. & CHITWOOD, L. A. 2008: *Field guide to meteors and meteorites*. Springer, London: 287 p.
- OLSEN, E. J., KRACHER, A., DAVIS, A. M., STEELE, I. M., HUTCHEON, I. D. & BUNCH, T. E. 1999: The phosphates of IIIAB iron meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 34: 285-300.
- OXFORD INSTRUMENTS 2006: *INCA energy operator manual*. Oxford Instruments Analytical Ltd., High Wycombe: 85 p.
- SCOTT, E. R. D. 1972: Chemical fractionation in iron meteorites and its interpretation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36: 1205-1236.
- SCOTT, E. R. D. & WASSON, J. T. 1975: Classification and properties of iron meteorites. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 13: 527-546.
- TAGLE, R., STOEFFLER, D., CLAEYS, P. & ERZINGER, J. 2003: A non-magmatic iron meteorite as impactor for the Rochechouart crater. *Lunar and Planetary Science XXXIV*: 1835.pdf.
- WASSON, J. T. 1985: *Meteorites: Their Record of Early Solar-System History*. W. H. Freeman and company, New York: 267 p.
- WASSON, J. T. & KALLEMEYN, G. W. 2002: The IAB iron-meteorite complex: A group, five subgroups, numerous grouplets, closely related, mainly formed by crystal segregation in rapidly cooling melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 2445-2473.
- YANG, J. & GOLDSTEIN, J. I. 2005: The formation of the Widmanstätten structure in meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 40: 239-253.
- YANG, J. & GOLDSTEIN, J. I. 2006: Metallographic cooling rates of the IIIAB iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 3197-3215, doi:10.1016/j.gca.2006.04.007.
- YANG, J., GOLDSTEIN, J. I. & SCOTT, E. R. D. 2008: Metallographic cooling rates and origin of IVA iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 3043-3061, doi:10.1016/j.gca.2008.04.009.
- YANG, J., GOLDSTEIN, J. I. & SCOTT, E. R. D. 2010: Main-group pallasites: Thermal history, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 4471-4492, doi:10.1016/j.gca.2010.04.016.

# Rhaetian foraminiferal assemblage from the Dachstein Limestone of Mt. Begunjščica (Košuta Unit, eastern Southern Alps)

## Retijska foraminiferna združba dachsteinskega apnenca Begunjščice (enota Košuta, vzhodne Južne Alpe)

Luka GALE

Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia;  
e-mail: luka.gale@geo-zs.si

Prejeto / Received 14. 3. 2012; Sprejeto / Accepted 30. 3 2012

*Key words:* Karavanke Mts., Late Triassic, reef, Julian Carbonate Platform, foraminifera, palaeoecology

*Ključne besede:* Karavanke, pozni trias, greben, Julijska karbonatna platforma, foraminifere, paleoekologija

### Abstract

Mt. Begunjščica (Karavanke Mts., northern Slovenia) structurally belongs to the Košuta Unit (eastern Southern Alps). The Dachstein Limestone, building the northern side of the mountain and its main ridge, was deposited on the Julian Carbonate Platform, while grey and red nodular Jurassic limestones of the southern slope represent sedimentation on the Julian High. The massive Dachstein Limestone contains a rich assemblage of benthic foraminifera. Typical representatives of the reef and back-reef area were recognized. The age of the assemblage is dated as Rhaetian, based on the co-presence of species with a Norian and Rhaetian time span, such as *Galeanella tollmanni*, "*Sigmoilina*" *schaeferae*, *Alpinophragmium perforatum*, *Aulotortus tumidus*, *Variostoma catilliforme*, *Variostoma cochlea* and *Variostoma helicta*, together with the Rhaetian to Lower Jurassic *Involutina turgida*.

### Izvleček

Begunjščica (Karavanke, severna Slovenija) strukturno pripada tektonski enoti Košuta (vzhodne Južne Alpe). Dachsteinski apnenec, ki gradi severno stran gore in njen vršni greben, se je odlagal na Julijski karbonatni platformi, medtem ko sivi plastnati in rdeči gomoljasti jurski apneneci predstavljajo sedimentacijo na Julijskem platoju. Masivni del dachsteinskega apnenca vsebuje številne bentoške foraminifere, tipične za grebensko in zagrebensko okolje. Na podlagi prisotnosti vrst z norijsko-retijskim razponom kot so *Galeanella tollmanni*, "*Sigmoilina*" *schaeferae*, *Alpinophragmium perforatum*, *Aulotortus tumidus*, *Variostoma catilliforme*, *Variostoma cochlea* in *Variostoma helicta* z retijsko do zgodnjejursko vrsto *Involutina turgida* je združba retijske starosti.

### Introduction

The Late Carnian sea-level rise (BUDAI & HAAS, 1997; GAWLICK & BÖHM, 2000; HALLAM, 2001; GIANNOLA et al., 2003; BERRA et al., 2010) and a warm climate (SATTLER & SCHLAF, 1999; FLÜGEL, 2004; BERRA et al., 2010; PRETO et al., 2010; STEFANI et al., 2010) together with a suitable palaeogeographic position near the palaeoequator (STAMPFLI & BOREL, 2002, 2004; STAMPFLI & KOZUR, 2006; GOLONKA, 2007) created favourable conditions for the development of extensive epeiric carbonate platforms along the Neotethys Ocean (HAAS, 2004; VLAHOVIĆ et al., 2002, 2005; BERNECKER, 2005; HAAS et al., 2007; GOLONKA, 2007) and a co-temporal bloom of scleractinian coral reefs (TURNŠEK, 1997; STANLEY JR., 2003; FLÜGEL, 2004; BERNECKER, 2005; RUSSO, 2005). Extremely thick carbonate platforms

developed during Norian and Rhaetian also in the NE corner of the Adria microplate: the Julian Carbonate Platform is now structurally mostly incorporated in the Julian Nappe of the Eastern Southern Alps, whereas the Dinaric Carbonate Platform belongs to the External Dinarides (BUSER, 1986; PLACER, 1999, 2008). The distinction between the two platforms is based on their position with respect to the intermediate deep-water Slovenian Basin, i.e. the Julian Carbonate Platform was situated to the north of the basin (in the present orientation), while the Dinaric Carbonate Platform bordered the Slovenian Basin to the south (BUSER, 1986, 1989; OGORELEC & ROTHE, 1993; BUSER, 1996). The distinction between the platforms is also justified by their different stratigraphic developments: while the Dachstein Limestone constitutes the Julian Carbonate Plat-

form (e.g. BUSER, 1986, 1989; CIARAPICA & PASSERI, 1990; BUSER, 1996; SATTLER & SCHLAF, 1999), early dolomitization resulted in a strong predominance of the Main Dolomite on the Dinaric Carbonate Platform, with the exception of its northern margin (e.g. BUSER, 1989; OGORELEC & ROTHE, 1993; BUSER, 1996). Furthermore, several coral reefs are known from the Julian Carbonate Platform (Fig. 1), while none have been recorded south of the Slovenian Basin (TURNŠEK et al., 1984; TURNŠEK, 1997). Coral reefs from the southern brim of the Julian Carbonate Platform bordered the Slovenian Basin and are preserved in the southern Julian Alps (BUSER et al., 1982; TURNŠEK & BUSER, 1991; TURNŠEK, 1997). Reefs are known also from the northern Julian Alps (BUSER et al., 1982; TURNŠEK & RAMOVŠ, 1987; RAMOVŠ & TURNŠEK, 1991; TURNŠEK, 1997) and from Mt. Begunjščica in the Karavanke Mts. (FLÜGEL & RAMOVŠ, 1961; TURNŠEK, 1997), bordering basins which are not preserved due to younger tectonic displacements (PLACER, 1999). While reef-constructors from these reefs received considerable attention in the past studies, no such research has focused on associated organisms. Although benthic foraminifera are abundant in the Norian-Rhaetian reefs and can provide important additional information in recognizing peri-reef subenvironments (SENOWBARI-DARYAN, 1980; SADATI, 1981; FLÜGEL, 1981; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1981; SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; KRISTAN-TOLLMANN, 1986, 1990; ZAMPARELLI et al., 1995; MARTINI et al., 1997, 2004; CHABLAIS et al., 2010b), only few were mentioned by FLÜGEL and RAMOVŠ (1961), TURNŠEK and RAMOVŠ (1987), RAMOVŠ and TURNŠEK (1991) and TURNŠEK and BUSER (1991).

The scope of this paper is to give a more complete list of foraminifera found in the reef

and back-reef massive Dachstein Limestone of Mt. Begunjščica, after a new research was initiated in 2010. Several taxa are described and the Rhaetian age for the youngest part of the reef confirmed.

### Previous Research

The systematic geological research of Mt. Begunjščica (Karavanke Mts., northern Slovenia; Fig. 2) began with the geological mapping performed by the Geological Survey of Vienna in the second half of the 19<sup>th</sup> century (Lipold 1855-1859 - cf. RAMOVŠ, 2001; PETERS, 1855, 1856; TELLER, 1899; see also VETTERS, 1933a, 1933b). Its structure was later shown on the Celovec sheet of the Basic Geological Map of Yugoslavia (BUSER & CAJHEN, 1977) and by BRENCIČ and POLTNIČ (2008).

Two stratigraphic units dominate Mt. Begunjščica: red and grey nodular Jurassic limestones build large parts of its southern flank, while bedded and massive Dachstein Limestone outcrops on top and on the northern side of the mountain. Jurassic beds were investigated for their ammonoid assemblage by MIHAJLOVIĆ and RAMOVŠ (1965), and are of economical significance due to manganese content (HERLEC & VIDRIH, 2006; OGORELEC et al., 2006).

The massive reef Dachstein Limestone was studied already by FLÜGEL and RAMOVŠ (1961) and TURNŠEK (1997). Numerous corals, sponges, selenoporaceans and hydrozoans were determined, some of them characteristic for the Rhaetian age (FLÜGEL & RAMOVŠ, 1961; TURNŠEK, 1997). FLÜGEL and RAMOVŠ (1961) reported on few foraminifera, namely *Aulotortus* cf. *A. communis* Kristan, 1957, members of the family Ophthalmidiidae and la-

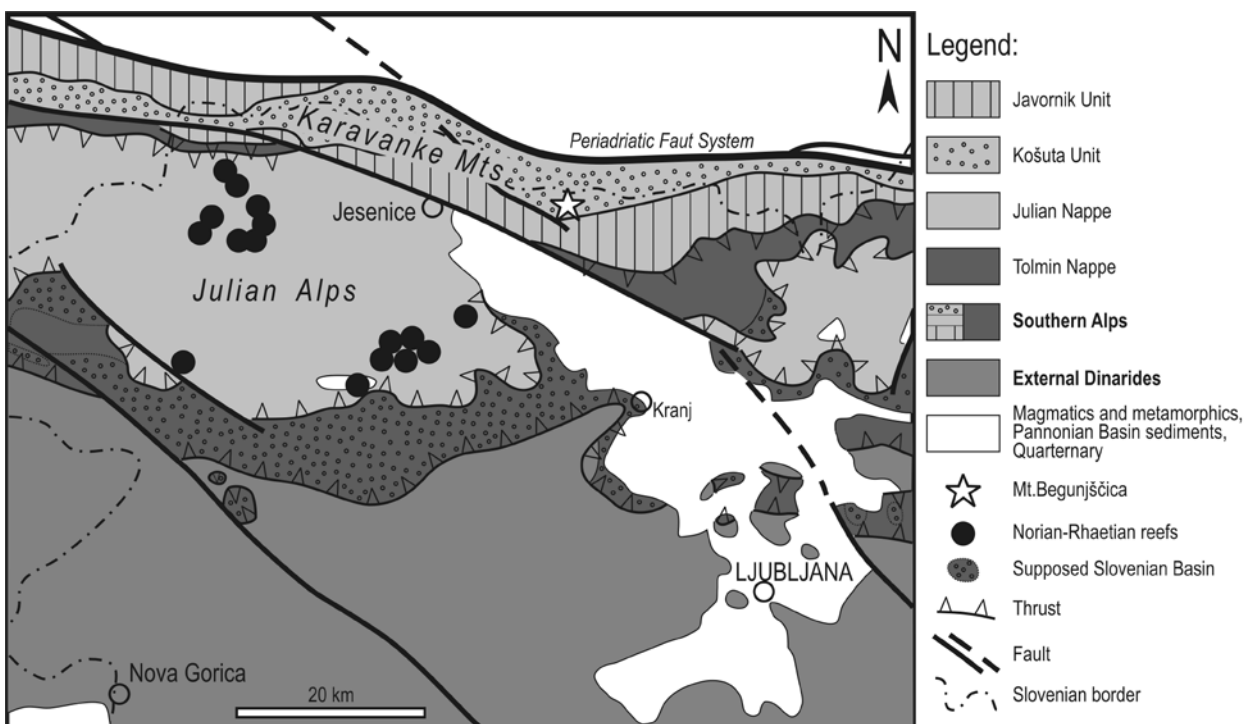


Fig. 1. Structural map of the Slovenian territory (simplified after PLACER, 1999), with distributions of Norian and/or Rhaetian reefs (after TURNŠEK, 1997). The position of Mt. Begunjščica is marked with a star symbol.



Fig. 2. Geographic position of Mt. Begunjščica

genids. BUSER (1980) added *Variostoma coniforme* Kristan-Tollmann, 1964, *Diplostroma* cf. *D. subangulata* Kristan-Tollmann, 1964, *Galeanella tollmanni* (Kristan, 1957), *Aulotortus sinuosus* Weynschenk, 1956, *Aulotortus tenuis* (Kristan, 1957) and "*Agerella martana* (Farinacci, 1959)" to the list.

**Geological setting**

Mt. Begunjščica structurally belongs to the Košuta Unit (BUSER, 1980; BRENČIČ & POLTING, 2008), a subunit of the Southern Alps (PLACER, 1999, 2008). As such, it can be viewed as a northernmost preserved part of the Julian Carbonate Platform (TURNŠEK et al., 1984; PLACER, 1999), severed from the Julian Nappe during younger tectonic movements and incorporated into the Periadriatic fault zone (PLACER, 1999). The Norian-Rhaetian Dachstein Limestone outcrops in the northern part of Mt. Begunjščica, and is separated from gray bedded and red nodular Lower Jurassic limestones by a non-conformity surface (MIHAJLOVIĆ & RAMOVŠ, 1965; BUSER, 1980; OGORELEC et al., 2006; BRENČIČ & POLTNIČ, 2008) or by a reverse fault (Gale et al., submitted).

**Material and methods**

Samples were collected along the mountain crest, from bedded to massive Dachstein Limestone. Fifty-eight thin sections of size 47 × 28 mm and 75 × 49 mm were made and investigated with an optical microscope. Thin sections are stored at the Geological Survey of Slovenia (Department for Paleontology and Stratigraphy).

**Foraminiferal assemblage**

The total foraminiferal assemblage contains the following species (Plates 1–3):

*Gandinella falsofriedli* (Salaj, Borza & Samuel, 1983), *Glomospirella* sp., *Tolypammina* sp., *Kaeveria fluegeli* (Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret, 1982), *Ammobaculites pulcher* Kristan-Tollmann, 1964; *Ammobaculites* spp., *Reophax rudis* Kristan-Tollmann, 1964, *Reophax* spp., *Gaudryinella clavuliniformis* Trifonova, 1967, "*Trochammina*" *almtalensis* Koehn-Zaninetti, 1969, "*Trochammina*" *jaunensis* Brönnimann & Page, 1966, *Duotaxis metula* Kristan, 1957, *Duotaxis birmanica* Zaninetti & Brönnimann in Brönnimann et al., 1975, *Alpinophragmium perforatum* Flügel, 1967, "*Tetrataxis*" *humilis* Kristan, 1957, *Endotriada* sp., *Aulotortus sinuosus* Weynschenk, 1956, *Aulotortus tenuis* (Kristan, 1957), *Aulotortus friedli* (Kristan-Tollmann, 1962), *Aulotortus tumidus* (Kristan-Tollmann, 1964) emend. Piller, 1978, *Auloconus permodisoides* (Oberhauser, 1964), *Trocholina umbo* Frentzen, 1941, ?*Trocholina crassa* Kristan, 1957, *Trocholina*? *parva* Blau, 1987a, *Trocholina* sp., *Involutina turgida* Kristan, 1957, ?*Triasina hantkeni* Majzon, 1954, *Turrspirillina minima* Pantić, 1967, *Hoyenella* sp., *Agathammina*

	Carnian	Norian	Rhaetian	Hettang.
<i>Gandinella falsofriedli</i>		—	—	
<i>Reophax rudis</i>	←	—	—	
<i>Alpinophragmium perforatum</i>		—	—	
<i>Duotaxis metula</i>		—	—	→
? <i>Gaudryinella clavuliniformis</i>	←	—	—	
<i>Kaeveria fluegeli</i>	←	—	—	
" <i>Trochammina</i> " <i>jaunensis</i>	←	—	—	
" <i>Trochammina</i> " <i>almtalensis</i>	←	—	—	
" <i>Tetrataxis</i> " <i>humilis</i>		—	—	
<i>Involutina turgida</i>			—	→
<i>Trocholina umbo</i>			—	→
<i>Trocholina crassa</i>			—	
<i>Aulotortus sinuosus</i>	←	—	—	
<i>Aulotortus tumidus</i>		—	—	
<i>Aulotortus tenuis</i>		—	—	
<i>Aulotortus friedli</i> (sen. Piller, 1978)	←	—	—	
<i>Auloconus permodisoides</i>		—	—	
<i>Turrspirillina minima</i>		—	—	
<i>Planiinvoluta carinata</i>	←	—	—	→
<i>Ophthalmidium leischneri</i>	←	—	—	→
<i>Paraophthalmidium carpaticum</i>	←	—	—	
<i>Galeanella tollmanni</i>		—	—	
" <i>Sigmollina</i> " <i>schaeferae</i>		—	—	
<i>Miliolochina stellata</i>		—	—	

Fig. 3. Stratigraphic ranges of described species from the reef limestone of Mt. Begunjščica



*australpina* Kristan-Tollmann & Tollmann, 1964, *Paraophthalmidium carpaticum* Samuel & Borza, 1981, *Ophthalmidium leischneri* (Kristan-Tollmann, 1962), *Ophthalmidium* sp., *Planinivolva carinata* Leischner, 1961, *Miliolechina stellata* Zaninetti, Ciarapica, Cirilli & Cadet, 1985, *Galeanella tollmanni* (Kristan, 1957), “*Sigmoilina*” *schaeferae* Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret, 1982, *Miliolipora cuvillieri* Brönnimann & Zaninetti in Brönnimann et al., 1971, *Miliolipora* sp., “*Orthotrinacria expansa* Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret, 1982” auct., *Duostomina turboidea* Kristan-Tollmann, 1960, *Duostomina biconvexa* Kristan-Tollmann, 1960, ?*Duostomina astrofimbriata* Kristan-Tollmann, 1960, *Diplo-tremina placklesiana* Kristan-Tollmann, 1960, *Diplo-tremina subangulata* Kristan-Tollmann, 1960; *Variostoma coniforme* Kristan-Tollmann, 1960, *Variostoma catilliforme* Kristan-Tollmann, 1960, *Variostoma cochlea* Kristan-Tollmann, 1960, *Variostoma helicta* (Tappan, 1951), “*Frondicularia woodwardii* Howchin, 1895” auct., *Lenticulina* sp.

Only a portion of species is described in detail in the systematic part of the paper. The focus lies on palaeoecologically and stratigraphically important taxa, and the species rarely or poorly described in the literature, especially when remarks on their systematics are needed.

### Systematic palaeontology

Suprageneric classification used in this paper follows LOEBLICH and TAPPAN (1987, 1992). The synonymy list consists of selected references only, while other reports are cited in the *Geographic distribution and stratigraphic range* paragraphs.

Class Foraminifera J. J. Lee, 1990

Order Lituolida Lankester, 1885

Superfamily Ammodiscidea Reuss, 1862

Family Ammodiscidae Reuss, 1862

Subfamily Ammovertellininae Saidova, 1981

Genus *Gandinella* Ciarapica & Zaninetti, 1985

(type species: *Gandinella apenninica* Ciarapica & Zaninetti, 1985)

*Gandinella falsofriedli* (Salaj, Borza & Samuel, 1983)

Pl. 1, figs. 1, 2

\*p.p. 1983 *Pilaminella falsofriedli* n. sp. – SALAJ et al., p. 67–68, pl. 15, figs. 7, 8, 10, 11 [non pl. 15, figs. 9, 12].

• 1985 *Gandinella apenninica* Ciarapica et Zaninetti, n. gen., n. sp. – CIARAPICA and ZANINETTI, p. 307–308, pl. 1, figs. 1–14.

1994 *Gandinella falsofriedli* (Salaj, Borza & Samuel, 1983) – KAMOUN et al., p. 372–374, pl. 1, figs. 1–8; pl. 2, figs. 1–3.

**Material:** Thin sections 181, 184, 185, 186C, 186D, 187A, 188A, 188B, 191B, 195A, 236, 249.

**Description:** The test is free, roughly elliptical in outline. Globular proloculus is followed by an undivided second chamber. The initial mode of coiling is not distinguishable. It is followed by three to four coils in a sigmoidal arrangement. The next one or two coils are perpendicular to the preceding coiling axis. The second sigmoidal stage (two to five coils) forms the last ontogenetic stage. The test wall is thin and dark, probably finely agglutinated.

The test diameter is 0.18–0.36 mm.

**Remarks:** *Gandinella apenninica* Ciarapica & Zaninetti, 1985 was initially distinguished from *G. falsofriedli* on the basis of smaller size (0.25–0.35 mm) and in the absence of the final, second sigmoidal stage. KAMOUN et al. (1994) established the synonymy between the two species.

*Gandinella falsofriedli* was first marked as typical for the lagoon environment (SALAJ et al., 1983), later as a lagoon and shelf-to-basin species (PEYBERNES et al., 1991; KAMOUN et al., 1994). VACHARD et al. (1990) found specimens also in a more turbulent environment.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Undivided Late Triassic of Taurus, Turkey (BRÖNNIMANN et al., 1970; POISSON et al., 1985); Norian of China (HE, 1982); Norian of Transdanubian Range, Hungary (ORAVECZ-SCHEFFER, 1987); Norian of Bulgaria (TRIFONOVA, 1992); Norian and Rhaetian of Apennines, Italy (CIARAPICA & ZANINETTI, 1985; CIARAPICA et al., 1987; CHIOCCINI et al., 1994; ZAMPARELLI et al., 1995; MANCINELLI et al., 2005); Norian and/or Rhaetian of Carpathians (SALAJ et al., 1983); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (SENOWBARI-DARYAN, 1980; KUSS, 1983); Rhaetian of Pyrenees (VACHARD et al., 1990); Rhaetian of Wombat Plateau, Australia (ZANINETTI et al., 1992); Rhaetian of Corsica, France (PEYBERNES et al., 1991).

Superfamily Hormosinidea Haeckel, 1894

Family Reophacidae Cushman, 1927

Genus *Reophax* de Montfort, 1808

(type species: *Reophax scorpiurus* de Montfort, 1808)

*Reophax rudis* Kristan-Tollmann, 1964 (non *Reophax rudis* Brady, 1881 [nomen nudum])

Pl. 1, figs. 9–11

\*1964a *Reophax rudis* n. sp. – KRISTAN-TOLLMANN, p. 39–30, pl. 2, fig. 1.

• 1982 *Reophax tauricus*, n. sp. – ZANINETTI et al., p. 106–107, pl. 8, figs. 7, 8, 10, 11.

**Material:** Thin sections 244A, 245A, 246.

**Description:** The test is elongated, large, with three to four chambers in an irregular uniserial arrangement. Chambers are wider than high, the last one markedly larger, of equal width and height, distally tapered. Chamber sutures are well pronounced. The test wall is thick, coarsely

agglutinated, sometimes including tests of smaller foraminifera.

Tests are 0.76-1.63 mm long.

**Remarks:** *Reophax rudis* was described on the basis of isolated material (KRISTAN-TOLLMANN, 1964a). Because determinations of Late Triassic foraminifera mostly base on material from thin sections, this species was almost never recognized at other localities. ZANINETTI et al. (1982) later described a new species, *R. tauricus*, on the basis of specimens found in thin sections, thus making its identification much easier. This species was often found in a reef facies (ZANINETTI et al., 1982; HE, 1984; BERNECKER, 1996; CHABLAIS et al., 2011). *Reophax tauricus* is here treated as a junior synonym of *R. rudis*.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Anisian of Dinarides, Bosnia and Herzegovina (BRÖNNIMANN et al., 1973a); Anisian of China (HE, 1984; HE & CAI, 1991); Ladinian of Bulgaria (TRIFONOVA, 1992); Ladinian of Apennines, Italy (CIARAPICA et al., 1990); Carnian of Oman (BERNECKER, 1996); Carnian and/or Norian of Greece (COURTIN et al., 1982); Norian and/or Rhaetian of Taurus, Turkey (ZANINETTI et al., 1982); Norian and/or Rhaetian of Sambosan Accretionary Complex, Japan (CHABLAIS et al., 2011); Rhaetian of Northern Calcareous Alps (KRISTAN-TOLLMANN, 1964a).

Superfamily Coscinophragmatidea Thalmann, 1951

Family Coscinophragmatidae Thalmann, 1951  
Genus *Alpinophragmium* Flügel, 1967  
(type species: *Alpinophragmium perforatum* Flügel, 1967)

***Alpinophragmium perforatum*** Flügel, 1967  
Pl. 1, figs. 5, 6

\*1967 *Alpinophragmium perforatum* n. sp. –  
FLÜGEL, p. 383-395, pls. 1, 2; text-figs. 2-8.

**Material:** Thin sections 189A, 191B, 242A, 243A, 243B, 244A, 244B, 245B, 284, 291B.

**Description:** Numerous large, well preserved specimens, fragmented or still attached to the substrate. The basal part of the test is attached, the second part of the test raised above the substrate and elongated. Chambers of the second part are in a rectilinear arrangement, wider than high. The aperture is multiple. The test wall is thick, agglutinated.

The largest specimen measures 3 mm in height.

**Remarks:** *Alpinophragmium perforatum* is typical for the central reef area (e.g. HOHENEGGER & LOBITZER, 1971; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; SENOWBARI-DARYAN, 1980; SADATI, 1981; SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; WURM, 1982; ZANINETTI et al., 1982; KUSS, 1983; MATZNER, 1986; KRISTAN-TOLLMANN, 1990; BERNECKER, 2005; CHABLAIS et al., 2010b).

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Undivided Late Triassic of Rhodopes, Macedonia (UROŠEVIĆ & DUMURĐANOV, 1976); Norian and/or Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (FLÜGEL, 1967; HOHENEGGER & LOBITZER, 1971; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; SENOWBARI-DARYAN, 1980; SENOWBARI-DARYAN et al., 1982); Norian and/or Rhaetian of Oman (BERNECKER, 1996); Norian and Rhaetian of Sambosan Accretionary Complex, Japan (KRISTAN-TOLLMANN, 1990; CHABLAIS et al., 2010b); Rhaetian of Carpathians (GAŹDZICKI, 1974); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (GAŹDZICKI et al., 1979; SCHÄFER, 1979; MATZNER, 1986). VACHARD and FONTAINE (1988) report this species from Upper Ladinian and/or Carnian beds, but their determination is here considered erroneous.

Superfamily Verneuulinidea Cushman, 1911

Family Verneuulinidae Cushman, 1911

Subfamily Verneuulinoidinae Suleymanov, 1973

Genus *Duotaxis* Kristan, 1957

(type species: *Duotaxis metula* Kristan, 1957)

***Duotaxis metula*** Kristan, 1957

Pl. 1, figs. 16, ?17

\*1957 *Duotaxis metula* nov. gen. nov. spec. –  
KRISTAN, p. 295, pl. 27, figs. 5a-5d, 6.

**Material:** Thin sections 185, 243A.

**Description:** The test is highly conical, with up to six trochospiral whorls. The apical end is only slightly rounded, the umbilical side flat, with a very short umbilical opening. Chambers are wider than high, gradually increasing in size. The last chamber is more inflated. The aperture is interiomarginal. The test wall is thick, agglutinated.

The test height is 0.61-0.94 mm, the maximum test width 0.64-0.94 mm. The ratio height/width is 0.95-1.00 mm.

**Remarks:** *Duotaxis metula* differs from “*Tetrataxis*” *nanus* Kristan-Tollmann, 1964a, which has a similar height/width ratio, in having a larger test. Other Triassic species of genera *Duotaxis* Kristan, 1957 and “*Tetrataxis*” Ehrenberg, 1854 have flatter tests.

Both genera, *Duotaxis* and “*Tetrataxis*”, are most abundant in the wider platform area (HOHENEGGER & LOBITZER, 1971; MARTINI et al., 2004). They were found also in an oncoid facies and in the central reef area (SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; WURM, 1982), preferentially on a sandy substrate (SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978).

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Norian and/or Rhaetian of Taurus, Turkey (TUZCU et al., 1982); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (KRISTAN, 1957; KRISTAN-TOLLMANN, 1964b; MATZNER, 1986); Rhaetian of Papua New Guinea (KRISTAN-TOLLMANN, 1990);



Early Jurassic of Venetian Prealps, Italy (FUGAGNOLI, 1996) and Apennines, Italy (MANCINELLI et al., 2005).

?Genus *Gaudryinella* Plummer, 1931

(type species: *Gaudryinella delrioensis* Plummer, 1931)

?*Gaudryinella clavuliniformis* Trifonova, 1967  
Pl. 1, fig. 7

\*1967 *Gaudryinella clavuliniformis* sp. nov. – TRIFONOVA, p. 3-4, pl. 1, figs. 11, 12.

**Material:** Thin section 187A.

**Description:** A single specimen is in a longitudinal section. The test is elongated, chambers in a rectilinear arrangement. The proloculus is followed by a flaring triserial part (three chambers' length), at the end of which the greatest width of the test is achieved. This part extends along one-third of the test's length. It is followed by a biserial part (three chambers' length), followed finally by a short uniserial part (one chambers' length). Chambers are rounded, sutures slightly depressed. The test wall is agglutinated.

The test is 0.38 mm long and 0.13 mm wide.

**Remarks:** *Gaudryinella clavuliniformis* differs from *Gaudryinella elegantissima* Kristan-Tollmann, 1964a in a better developed triserial part of the test, which is more than one-third of the test's length long. *Aaptotoichus valis* (Trifonova, 1962) has flatter chambers and better developed three- and biserial parts of the test; the test of *A. valis* also constantly increases in width, so there is no marked difference in the width of the biserial and uniserial parts. *Gaudryinella kotlensis* Trifonova, 1967 has a very short uniserial part and better developed three- and biserial parts.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Anisian and Carnian of Carpathians (SALAJ et al., 1983, 1988); Carnian of Bulgaria (TRIFONOVA, 1967); Carnian of Transdanubian Range, Hungary (ORAVECZ-SCHEFFER, 1987); Norian and/or Rhaetian of Sambosan Accretionary Complex, Japan (CHABLAIS et al., 2011); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (cf. SALAJ et al., 1983).

Superfamily Ataxophragmiidea Schwager, 1877  
Family Ataxophragmiidae Schwager, 1877  
Subfamily Pernerininae Loeblich & Tappan, 1964

Genus *Kaeveria* Senowbari-Daryan, 1984  
(type species: *Palaeolituonella fuegeli* Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret, 1982)

*Kaeveria fuegeli* (Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret, 1982)  
Pl. 1, figs. 3, 4

\*1982 *Palaeolituonella fuegeli*, n. sp. – ZANINETTI et al., p. 107-108, pl. 8, figs. 1, 2, 4, 5.

1984 *Kaeveria fuegeli* (Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret 1981) – SENOWBARI-DARYAN, p. 87-89, pl. 1, figs. 1, 2, 5-7, 9-11; pl. 2, fig. 9.

2009 *Kaeveria fuegeli* (Zaninetti, Altiner, Dager et Ducret, 1982) – KORCHAGIN, p. 66-67, fig. 3d.

**Material:** Thin sections 184, 243A, 244A, 245, 245A, 249.

**Description:** The test is conical, initially coiled in a low trochospire, consisting of at least seven chambers. Three chambers in a rectilinear arrangement form the last part of the test. The height of these chambers remains virtually constant, while they gradually increase in size. Chamber sutures are pronounced, chambers slightly flaring distally, giving the outline of the test a ragged appearance. Chambers are subdivided into chamberlets by irregularly distributed septulae. These are distally thickened, appearing triangular in cross-section. The aperture is simple, central. The central part of the apertural face is slightly bent inwards. The test wall is thick, agglutinated.

The height of the test is 0.39-0.43 mm and it is 0.43 mm wide in the final part.

**Remarks:** *Kaeveria fuegeli* is the only species of the genus *Kaeveria*. It is distinguished from the genus *Palaeolituonella* Bérczi-Makk, 1981 by the presence of septulae. The genus *Agglutisolena* Senowbari-Daryan, 1984 differs from the two in the presence of entosolenian tube.

*Kaeveria fuegeli* was a typical reef-dwelling foraminifera (ZANINETTI et al., 1982; SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; SENOWBARI-DARYAN, 1984; BERNECKER, 1996; SENOWBARI-DARYAN & FLÜGEL, 1996), mostly found in intra-reef cavities (SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; SENOWBARI-DARYAN, 1980). In contrast to *Galeanella*, "*Sigmoilina*" and large species of *Ophthalmidium*, it required arenaceous substrate (SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978). KORCHAGIN (2009) instead as a typical facies states clastic slopes of reefs and platforms.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Undivided Late Ladinian? to Late Triassic of Dinarides, Albania (PIRDENI, 1988); Late Carnian or Norian? to Rhaetian of Cyprus (MARTINI et al., 2009); Norian of Northern Calcareous Alps, Austria (WURM, 1982; SENOWBARI-DARYAN & FLÜGEL, 1996); Norian of Palermo Mts., Sicily (SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; SENOWBARI-DARYAN, 1984); Norian of Pamir, Turkey (KORCHAGIN, 2009); Norian and/or Rhaetian of Greece (TSAILA-MONOPOLIS, 1988); Norian and/or Rhaetian of Oman (BERNECKER, 1996); Norian and/or Rhaetian of Taurus, Turkey (ZANINETTI et al., 1982).

KRISTAN-TOLLMANN (1990) illustrates washed-out specimens from the Rhaetian strata of Papua New Guinea, but the initial coiled part is not vi-

sible, nor is it possible to see the inner structure of the test. SENOWBARI-DARYAN and FLÜGEL (1996) cite a Ladinian to Norian (to Rhaetian?) age, while KORCHAGIN (2009) excludes its occurrence before the Norian.

Order Trochamminida Saidova, 1981  
 Superfamily Trochamminidea Schwager, 1877  
 Family Trochamminidae Schwager, 1877  
 Subfamily Trochammininae Schwager, 1877  
 Genus *Trochammina* Parker & Jones, 1859  
 (type species: *Nautilus inflatus* Montagu, 1808)

“*Trochammina*” *jaunensis* Brönnimann & Page,  
 1966  
 Pl. 1, fig. 13

1976 *Trochammina jaunensis* Brönnimann &  
 Page, 1966 – ZANINETTI, p. 115, pl. 23, figs. 4,  
 5 [kop. Brönnimann & Page, 1966].

**Material:** Thin sections 186A, 186B, 186C,  
 195A, 195B, 241, 249.

**Description:** The test is relatively small. Chambers are arranged in a low trochospire and strongly increase in size. They are subglobular, arranged in three whorls. The apical side is widely rounded, with an apical angle around 120°. The umbilical side opens into a wide umbilicus, which has a ragged outline. The wall is thin, presumably finely agglutinated.

Tests are 0.11–0.12 mm high and 0.27–0.33 mm wide.

**Remarks:** “*Trochammina*” *jaunensis* differs from “*Trochammina*” *alpina* and “*Trochammina*” *almtalensis* Koehn-Zaninetti, 1969 in a very flat test with a larger apical angle.

“*Trochammina*” can be found in different facies of the back-reef area (e.g. HOHENEGGER & LOBITZER, 1971; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; WURM, 1982; ABATE et al., 1984; CHIOCCHINI et al., 1994; MARTINI et al., 2004; MANCINELLI et al., 2005) and rarely in the central reef area (KRISTAN-TOLLMANN, 1986).

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Anisian of Apennines, Italy (PREMOLI-SILVA, 1971); Anisian of Pakistan (ZANINETTI & BRÖNNIMANN, 1975); Anisian (GAŹDZICKI & ZAWIDZKA, 1973) and Carnian to Rhaetian of Carpathians (SALAJ et al., 1983); Late Triassic of Switzerland (Brönnimann & Page, 1966– cf. ZANINETTI, 1976); Late Triassic of Transdanubian Range, Hungary (ORAVECZ-SCHEFFER, 1987); Carnian of Alsó Hill, Hungary (BÉRCZI-MAKK, 1996); Carnian of Bulgaria (TRIFONOVA, 1978); Carnian of Taurus, Turkey (ZANINETTI et al., 1982); Norian and/or Rhaetian of Wombat Plateau, Australia (ZANINETTI et al., 1992); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (SCHÄFER, 1979; SENOWBARI-DARYAN, 1980; MATZNER, 1986).

“*Trochammina*” *almtalensis* Koehn-Zaninetti,  
 1969  
 Pl. 1, figs. 14, 15

v\*1969 *Trochammina almtalensis*, n. sp. – KOEHN-ZANINETTI, p. 38–39, pl. 5, figs. E, F; text-figs. 6A–6P.

**Material:** Thin sections 186C, 186D, 187B,  
 195A, 241, 245B, 246.

**Description:** Chambers are arranged in a high trochospire in up to 4.5 coils. The apical part of the test is rounded, with sides diverging at 90°. Chambers are subglobular. The umbilical opening has a ragged appearance. The test wall is thin, presumably finely agglutinated.

Tests are 0.19–0.31 mm high and 0.26–0.34 mm wide at the base.

**Remarks:** The difference between “*Trochammina*” *almtalensis* and “*Trochammina*” *alpina* Kristan-Tollmann, 1964 was not established upon introduction of the former. An obvious difference between the two species is their size, i.e. the type specimens of “*T.*” *alpina* are twice as large. Unfortunately, “*T.*” *alpina* was described on the basis of only two specimens, so variation in size is not known. According to the survey of the literature, intermediate forms between “*T.*” *almtalensis* and “*T.*” *alpina* exist. The comparison between the two species is additionally rendered by the fact that the type material for “*T.*” *alpina* constitutes isolated specimens, while “*T.*” *almtalensis* was described from thin-sections. A possibility for the synonymy of the two species should be further investigated.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Anisian of Northern Calcareous Alps, Austria (KOEHN-ZANINETTI, 1969); Middle Triassic of Dinarides, Albania (PIRDENI, 1988) and Serbia (UROŠEVIĆ, 1971; SUDAR, 1986); Middle Triassic of Bulgaria (TRIFONOVA, 1977a, 1977b, 1992); Anisian to Carnian of Kocaeli Peninsula, Turkey (DAGER, 1978); Carnian of Transdanubian Range, Hungary (ORAVECZ-SCHEFFER, 1987; BÉRCZI-MAKK, 1996); Norian of Carpathians (GAŹDZICKI, 1983); Late Norian and/or Rhaetian of Sulawesi, Indonesia (MARTINI et al., 1997); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (SENOWBARI-DARYAN, 1980).

Order Fusulinida Fursenko, 1958  
 Superfamily Tetrataxidea Galloway, 1933  
 Family Tetrataxidae Galloway, 1933  
 Genus *Tetrataxis* Ehrenberg, 1854  
 (type species: *Tetrataxis conica* Ehrenberg, 1854)

“*Tetrataxis humilis* Kristan, 1957  
Pl. 1, fig. 18

\*1957 *Tetrataxis humilis* nov. spec. – KRISTAN, p. 292-293, pl. 27, figs. 1a-c, 2a-c, 3.

**Material:** Thin section 236, 237, 241, 276A.

**Description:** The test is low conical in shape, with wide chambers in a trochospiral arrangement in four whorls. The apical end of the test is well rounded. Chambers of the last whorl are slightly keeled. The umbilical side is flat. The test wall is dark, probably finely agglutinated.

Tests are 0.12-0.19 mm high and 0.33-0.51 mm wide at the base.

**Remarks:** As pointed out by ZANINETTI (1976) and LOEBLICH and TAPPAN (1987), Triassic species ascribed to the genus *Tetrataxis* lack the two-layered wall of the Palaeozoic species of this genus. A long stratigraphic gap between the two groups additionally suggests that Triassic species belong to a different genus, which should be placed among agglutinated foraminifera and is homeomorphous to the true *Tetrataxis* (see also HAIG et al., 2007).

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Norian of Carpathians (SALAJ et al., 1983); Norian of China (HE & WANG, 1990); Norian and/or Rhaetian of Transdanubian Range, Hungary (ORAVECZ-SCHEFFER, 1987); Norian and/or Rhaetian of Wombat Plateau, Australia (ZANINETTI et al., 1992); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (KRISTAN, 1957).

Order Spirillinida Gorbachik & Mantsurova,  
1980

Suborder Involutinina Hohenegger & Piller, 1977

Family Involutinidae Bütschli, 1880

Subfamily Involutininae Bütschli, 1880

Genus *Involutina* Terquem, 1862

(type species: *Involutina jonesi* Terquem & Pilette, in Terquem, 1862)

*Involutina turgida* Kristan, 1957  
Pl. 2, fig. 3

\*1957 *Involutina turgida* nov. spec. – KRISTAN, p. 275-276, pl. 22, figs. 5-10.

**Material:** Thin sections 242A, 243B.

**Description:** The test has an elliptical outline, with the second tubular chamber planispirally coiled. The last whorl is clearly evolute, in contrast with the rest of the test which is covered in secondary material, transected in poorly visible pillars. The test wall is recrystallized and was originally aragonitic.

Diameter of the test is 0.27-0.85 mm.

**Remarks:** *Involutina turgida* is similar to the stratigraphically younger, but better known spe-

cies *Involutina liassica* Jones, 1853. The difference lies in the evolute nature of the last whorl, i.e. the deuterolocus is tubular and not semi-tubular. Gušić (1975) declined the difference in size of the test and in the shape of the chamber lumen. As strongly recrystallized specimens of both species often cannot be distinguished one from another, BLAU (1987b) proposed to group such specimens under the name *Involutina* ex gr. *I. liassica*. The stratigraphic value of these specimens, however, is much lower than that of the each individual species.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (KRISTAN, 1957; KOEHN-ZANINETTI, 1969); Lower Jurassic of Karavanke Mts., Slovenia (RAMOVŠ & KRISTAN-TOLLMANN, 1967; PILLER, 1978); Lower Jurassic of Exmouth Plateau, Australia (KRISTAN-TOLLMANN & COLWELL, 1992; COLWELL et al., 1994). The First Occurrence of *Involutina turgida* in the Slovenian Basin closely coincides with the First Appearance Datum of *Misikella posthernsteini* Kozur & Mock, 1974 (GALE et al., 2011), which is considered the most probable candidate for the base of the Rhaetian (MCROBERTS et al., 2008; ROŽIČ et al., 2009; GIORDANO et al., 2010; LUCAS, 2010).

Genus *Trocholina* Paalzow, 1922  
(type species: *Involutina conica* Schlumberger,  
1898)

*Trocholina umbo* Frentzen, 1941  
Pl. 2, figs. 6, 7

- 1957 *Trocholina (Trocholina) granosa* Frentzen, 1941 – KRISTAN, p. 283-284, pl. 24, figs. 1, 2.
- ? 1957 *Trocholina (Trochonella) laevis* nov. subgen. nov. spec. – KRISTAN, p. 286-288, pl. 24, fig. 12-14.
- 1976 *Trocholina granosa* Frentzen, 1941 – ZANINETTI, p. 177, pl. 10, fig. 24.
- 1978 *Trocholina umbo* Frentzen, 1941 – PILLER, p. 81-83, pl. 20, figs. 9-11, 13, 14, 16, 17.
- 1987a *Trocholina umbo* Frentzen, 1941 – BLAU, p. 500, pl. 1, figs. 1-11.
- 1999 *Trocholina umbo* Frentzen, 1941 – BÖHM et al., p. 181, pl. 18, figs. 4-12.
- 2010 *Trocholina umbo* Frentzen, 1941 – SENOWBARI-DARYAN et al., p. 569-571, figs. 3a-j/1, k, l, 4a-f.

**Material:** Thin sections 180B, 242A, 249, 278C, 292.

**Description:** Strongly recrystallized or well preserved specimens in axial sections. The test is low conical, with a broadly rounded apical end. The umbilical side is flat or slightly convex. The circular proloculus is followed by a trochospirally coiled tubular deuterolocus in five or more whorls. Chambers of the last whorl are de-



tached from the umbilical mass, which is divided into numerous short pillars (knots). The chamber lumen is elliptical in cross-section. Sutures are not visible on the outer surface. The test wall is often recrystallized and was originally aragonitic.

Tests measure 0.44-0.64 mm in diameter and 0.21-0.36 mm in height.

**Remarks:** As pointed out by PILLER (1978), *Trocholina granosa* Frenzen, 1941 represents a junior synonym of *Tr. umbo*. *Trocholina laevis* Kristan, 1957, which is very similar to *Tr. umbo*, was instead placed under the synonymy of *Trocholina crassa* Kristan, 1957. The latter species is larger and relatively higher than *Tr. umbo*.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Norian of China (HE, 1999); Norian and/or Rhaetian of Dinarides, Croatia (GUŠIĆ, 1975); Rhaetian of Dolomites, Italy (CROS & NEUMANN, 1964); Rhaetian of Papua New Guinea (KRISTAN-TOLLMANN, 1986, 1990); Rhaetian of Pyrenees (MÁRQUEZ et al., 1994); Rhaetian of Iran (SENOWBARI-DARYAN et al., 2010); Rhaetian and Lower Jurassic of Exmouth Plateau, Australia (KRISTAN-TOLLMANN & COLWELL, 1992; KRISTAN-TOLLMANN & GRAMANN, 1992); Rhaetian and Lower Jurassic of Northern Calcareous Alps, Austria (KRISTAN, 1957; KUSS, 1983; BLAU, 1987a, b; EBLI, 1993; BÖHM et al., 1999); Lower Jurassic of Carpathians (GAŹDZICKI, 1983); Lower Jurassic of Transdanubian Range, Hungary (BLAU & HAAS, 1991).

*Trocholina crassa* Kristan, 1957  
Pl. 2, figs. 4, 5

\*1957 *Trocholina (Trochonella) crassa* nov. subgen. nov. spec. – KRISTAN, p. 285-286, pl. 24, fig. 5-11.

**Material:** Thin sections 242A, 243A, 243B, 244A.

**Description:** Strongly recrystallized tests are highly conical, with up to seven coils of tubular deuterolocus following a globular proloculus. The umbilical side is convex, knotted. The last whorl is continuous with the umbilicus. Sutures are not visible on the surface of the test and the chamber lumen is deeply buried under secondary lamellae covering the spiral side of the test.

The test diameter is 0.53-0.96 mm. Tests are 0.50-1.64 mm high.

**Remarks:** PILLER (1978) upon revision of the material by KRISTAN (1957) concluded that *Tr. laevis* is a junior synonym of *Tr. crassa*. His opinion was not followed by later authors.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Late Triassic of Dinarides, Croatia (GRGASOVIĆ, 1997); Carnian and/or Norian of Bulgaria (TRIFONOVA, 1993); Norian of China (HE, 1982); Norian and/or Rhaetian of Carpathians (GAŹDZICKI

& ZAWIDZKA, 1973; SALAJ et al., 1983); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (KRISTAN, 1957; SENOWBARI-DARYAN, 1980; MATZNER, 1986); Rhaetian of Papua New Guinea (KRISTAN-TOLLMANN, 1986, 1990); Rhaetian of Exmouth Plateau, Australia (KRISTAN-TOLLMANN & GRAMANN, 1992); Rhaetian of Pyrenees (MÁRQUEZ et al., 1994).

Subfamily Aulotortinae Zaninetti, 1984

Genus *Aulotortus* Weynschenk, 1956

(type species: *Aulotortus sinuosus* Weynschenk, 1956)

*Aulotortus sinuosus* Weynschenk, 1956

Pl. 2, figs. 8?, 14, 15

- \*1956 *Aulotortus sinuosus* Weynschenk, n. sp. – WEYNSCHENK, p. 27, pl. 6, figs. 1-3; text-figs. 1, 2.
- 1967 *Aulotortus brönnimanni* Salaj, nov. sp. – SALAJ et al., p. 127-128, pl. 4, fig. 3.
- 1967 *Arenovidalina hybensis* Salaj, nov. sp. – SALAJ et al., p. 125, pl. 4, fig. 4.
- 1967 *Rakusia oberhauseri* Salaj, nov. gen., nov. sp. – SALAJ et al., p. 129, pl. 5, fig. 3; pl. 8, fig. 4.
- 1967 *Arenovidalina ovulum* Salaj, nov. sp. – SALAJ et al., pl. 5, sl. 1 [nom. non rite public].
- 1972 *Involutina muranica* n. sp. – JENDREJÁK-OVA, p. 197-200, figs. 1-6.
- p.p. 1978 *Aulotortus sinuosus* Weynschenk, 1956 – PILLER, p. 45-51, pl. 2, figs. 1-7; pl. 3; pl. 4, figs. 1-3, 5-11, 15, 16; pl. 5, figs. 8, 10-16; text-fig. 4 [non pl. 4, figs. 13, 14; ?non pl. 5, figs. 1-7, 9; ?pl. 4, figs. 4, 12].
- 1982 *Aulotortus columnaris* He sp. nov. – HE, pl. 4, figs. 1-4.
- 1983 *Permodiscus subsphaericus* n. sp. – SALAJ et al., p. 141, pl. 105, fig. 1.
- 1994 *Aulotortus sinuosus* Weynschenk, 1956 – DI BARI & LAGHI, p. 106-108, pl. 1, figs. 1-7; pl. 2, figs. 1-2; text-fig. 8.

**Material:** Thin sections 180B, 181, 184, 185, 186A, 186B, 186C, 186D, 187A, 187B, 188A, 188B, 189A, 189B, 191B, 192, 195A, 240, 241, 245A, 276A, 278C, 279, 280, 282, 290A.

**Description:** Specimens are numerous and display various degrees of preservation. Most tests are completely recrystallized, but some display the original lamellar structure of the test (see PILLER, 1978; DI BARI & LAGHI, 1994). Preservation of the original aragonitic mineralogy, however, is not proven. Tests are oval and ranging from inflated to completely flat (Pl. 2, fig. 8). Globular proloculus is followed by an undivided tubular deuterolocus, which winds in a single plane or slightly oscillates around previous whorls in up to seven involute coils.

The test diameter is 0.30-1.64 mm.

**Remarks:** Large variations in size and shape of *A. sinuosus* reflect environmental influence

(PILLER, 1978). The degree of oscillation of the deuteroecolus, on the basis of which several species and subspecies were once distinguished, likewise represents a phenotypic character (DI BARI & LAGHI, 1994). PILLER (1978) considered *Angulodiscus communis* Kristan, 1957 a junior synonym of *A. sinuosus* and the name *An. communis* rarely appears in the literature since. DI BARI and LAGHI (1994) later expressed an opinion that *Angulodiscus* is a valid genus, but no sufficient explanation has been given. Recrystallized specimens of *Triadodiscus eomesozoicus* (Oberhauser, 1957) are also very similar to *A. sinuosus*. The *Triadodiscus* species is nevertheless usually smaller and the last whorls can be evolute.

The genus *Aulotortus* is typical for shallow water carbonate platforms (HOHENEGGER & LOBITZER, 1971; PILLER, 1978; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; SADATI, 1981; ABATE et al., 1984; KRISTAN-TOLLMANN, 1986; MARTINI et al., 2004, 2009).

**Geographic distribution and stratigraphic range:** *Aulotortus sinuosus* is common in peri-Tethyan and platform carbonates and Panthalasian sea-mounts. Its stratigraphic range is from the Anisian to the Rhaetian (cf. DI BARI & LAGHI, 1994).

***Aulotortus tumidus*** (Kristan-Tollmann, 1964)  
emend. Piller, 1978  
Pl. 2, figs. 12, 13

- \*1964b *Angulodiscus tumidus* n. sp. – KRISTAN-TOLLMANN, p. 141-142, figs. 3.1-3.7.
- p.p. 1969 *Involutina minuta*, n. sp. – KOEHN-ZANINETTI, p. 132-133, figs. 40a-k, m-n [non fig. 40f].
- p.p. 1978 *Aulotortus tumidus* (Kristan-Tollmann, 1964) – PILLER, p. 51-55, pl. 6, figs. 1-7; pl. 7, figs. 1, 2, 4-10 [non pl. 6, fig. 8; ?pl. 7, figs. 3, 11, 12].
- p.p. 1983 *Permodiscus praetenuis* n. sp. – SALAJ et al., pl. 93, figs. 2-10, 13-18 [?pl. 93, figs. 11, 19].
- ? 1983 *Permodiscus praecommunis* n. sp. – SALAJ et al., p. 139, pl. 85, figs. 1-6; pl. 86, figs. 1-6.
- 1983 *Angulodiscus falsotumidus* n. sp. – SALAJ et al., p. 144, pl. 121, figs. 8, 10-12; pl. 122, figs. 1-2.

**Material:** Thin sections 186A, 187A, 188B, 195A, 236, 237, 241, 243A.

**Description:** Strongly recrystallized specimens are elliptical, with bulging last whorls (presumably evolute).

Tests measure 0.43-1.01 mm in diameter.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Late Triassic of Taurus, Turkey (BRÖNNIMANN et al., 1970); Late Triassic of Seram, Indonesia (AL-SHAIBANI et al., 1983) and Burma

(BRÖNNIMANN et al., 1975); Norian of Lienz Dolomites, Austria (BLAU & SCHMIDT, 1990); Norian of Iran (ZANINETTI & BRÖNNIMANN, 1974); Norian of China (HE, 1982; HE & WANG, 1990); Norian of Dinarides, Croatia (GUŠIĆ, 1975); Norian of Wombat Plateau, Australia (ZANINETTI et al., 1992); Norian of Sambosan Chichibu Zone, Japan (KRISTAN-TOLLMANN, 1990); Norian and/or Rhaetian of Exmouth Plateau, Australia (COLWELL et al., 1994); Norian and/or Rhaetian of Oman (BERNECKER, 1996); Norian and Rhaetian of Apennines, Italy (CIARAPICA et al., 1987; CHIOCCINI et al., 1994; ZAMPARELLI et al., 1995; MANCINELLI et al., 2005); Norian and Rhaetian of Carpathians (GAŹDZICKI, 1974, 1983; SALAJ et al., 1983); Norian and Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (KRISTAN-TOLLMANN, 1964b; KOEHN-ZANINETTI, 1969; MATZNER, 1986); Rhaetian of Dolomites, Italy (BOSELLINI & BROGLIO-LORIGA, 1965); Rhaetian of Pyrenees (MÁRQUEZ et al., 1994).

***Aulotortus tenuis*** Kristan, 1957  
Pl. 2, fig. 9

- \*1957 *Angulodiscus tenuis* nov. gen. nov. spec. – KRISTAN, p. 280, pl. 22, fig. 18.
- 1978 *Aulotortus tenuis* (Kristan, 1957) – PILLER, p. 62-64, pl. 12, figs. 1-12.

**Material:** Thin section 181A.

**Description:** A single specimen in a longitudinal section displays a well developed inner part of the test with an irregularly coiled tubular deuteroecolus and an outer stage with four planispiral whorls. The globular central part of the test is wider than the planispiral part. The last of the planispiral whorls again increases in width. The test margin is broadly rounded. The chamber lumen is flat, crescent-shaped. The test wall is recrystallized into spar.

The test diameter is 0.98 mm; the test thickness is 0.36 mm.

**Remarks:** The irregularly coiled initial part of the test is diagnostic for this species. *Aulotortus tumidus* also has evolute final coils, but is planispiral throughout the ontogeny.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Carnian or Norian of North America Cordillera (Wallowa terrane), Oregon, U.S.A. (RIGAUD ET AL., 2010); Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (KRISTAN, 1957; KOEHN-ZANINETTI, 1969); Rhaetian of Apennines, Italy (CIARAPICA ET AL., 1987); Rhaetian of Dinarides, Croatia (GRGA-SOVIĆ, 1997).

***Aulotortus friedli*** (Kristan-Tollmann, 1962)  
emend. Chablais, 2010a, sensu Piller (1978)  
(jun. syn. *Aulotortus praegaschei* (KoeHN-Zaninetti, 1969) emend. Ciarapica & Zaninetti, 1984)  
Pl. 2, figs. 10, 11

- \*1978 *Aulotortus friedli* (Kristan-Tollmann, 1962) – PILLER, p. 55-60, pl. 8, figs. 1-8; pl. 9, figs. 1-16; pl. 10, figs. 1-15.
- 1983 *Rakusia ploechingeri* nov. sp. – SALAJ et al., p. 143, pl. 104, fig. 5; pl. 105, fig. 4; pl. 114, fig. 3b.
- 1984a *Aulotortus praegaschei* (Koehn-Zaninetti, 1968) – CIARAPICA & ZANINETTI, p. 126-128, pl. 1, figs. 5-7.
- 1984b *Aulotortus praegaschei* (Koehn-Zaninetti, 1968) – CIARAPICA & ZANINETTI, p. 53-54, pl. 1, figs. 1-8; pl. 2, figs. 1-15.
- 1985 *Aulotortus friedli* (Kristan-Tollmann, 1962) – CIARAPICA & ZANINETTI, p. 71-86, pl. 1, figs. 1-9; pl. 2, figs. 1-8; pl. 3, figs. 1-9; tex-figs. 1A-F.
- 1990 *Aulotortus friedli* (Kristan-Tollmann, 1962) emend. Ciarapica & Zaninetti, 1985a – VACHARD et al., p. 525-526. pl. 1, fig. 5; pl. 2, fig. 12; pl. 3, figs. 3-5, 7-9.
- 2010 *Aulotortus friedli* (Kristan-Tollmann, 1962) – SENOWBARI-DARYAN et al., p. 578-580, figs. 12a-d, 13.
- 2010a *Aulotortus friedli* Kristan-Tollmann (1962) – CHABLAIS et al., p. 141-145, figs. 6.4.1-6.4.9; figs. 6.5.1-6.5.11; fig. 6.6.

**Material:** Thin sections 184, 186B, 186C, 187A, 189B, 237, 248, 278C, 282.

**Description:** The test has an irregular elliptical outline, with the coiling of the undivided deuterolocus in various plains, partly in a sigmoidal arrangement (see CHABLAIS et al., 2010a). The mineralogy of the test wall is difficult to distinguish. It is here interpreted as still aragonitic or recrystallized (in contrast to finely agglutinated of glomospiroid taxa).

The test size is very variable, ranging in diameter from 0.33 to 0.78 mm.

**Remarks:** The synonymy between *Glomospirella friedli* Kristan-Tollmann, 1962 and *Involutina gaschei* Koehn-Zaninetti & Brönnimann, 1968 was finally established after a long period of debate concerning the original nature of the wall in both species (CIARAPICA & ZANINETTI, 1985) – a problem also concerning here illustrated specimens. Another problem related to the species *A. friedli* is its relation to *Aulotortus praegaschei* (Koehn-Zaninetti, 1969). Although CIARAPICA and ZANINETTI (1984b, 1985) distinguished between both species, the opinion of PILLER (1978), which treated the later for a junior synonym of *A. friedli*, is followed in this paper. CHABLAIS et al. (2010a) gave a very detailed description of *A. friedli* on the basis of well preserved material from Japan, but did not discuss its relation with *A. praegaschei*.

*Aulotortus praegaschei* was at first considered a subspecies of *Involutina gaschei*, the absence of the final planispiral phase being a diagnostic character (KOEHN-ZANINETTI, 1969). According to PILLER (1978), the presence/absence of the planispiral phase depends on the environment. In con-

trast, CIARAPICA and ZANINETTI (1984b) separated the species on the basis of size (0.25-0.40 mm for *A. praegaschei* and 0.20-1 mm or larger for *A. friedli*), number of coils (10 for *A. praegaschei*, 10-15 for *A. friedli*), the absence/presence of the planispiral phase and their stratigraphic ranges (Ladinian to Carnian for *A. praegaschei*, Norian to Rhaetian for *A. gaschei*). Based on the survey of the literature, the size is also not a diagnostic character. The size, the number of coils and the presence of the planispiral phase can all be viewed as phenotypic characters. Despite these objections, most authors follow the opinion of CIARAPICA and ZANINETTI (1984b, 1985), with the exception of VELLEDDITS and BLAU (2003).

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Both species have a Tethys-wide occurrence. *Aulotortus friedli* is known also from the Panthalassan Ocean (CHABLAIS et al., 2010a, 2011; RIGAUD et al., 2010). KOEHN-ZANINETTI (1969) and later CIARAPICA and ZANINETTI (1984b, 1985), which treat both species valid, cite the Ladinian to Carnian range for *A. praegaschei* and Norian to Rhaetian range for *A. friedli*. COLWELL et al. (1994) gave *A. praegaschei* the range from the Ladinian to the Norian. PILLER (1978), with the concept of one species, cites the Ladinian to Rhaetian age for *A. friedli*. The same range is cited by SENOWBARI-DARYAN et al. (2010), although they did not include *A. praegaschei* into its synonymy. CHABLAIS et al. (2010a) consider *A. friedli* as Carnian to Rhaetian in age.

Genus *Auloconus* Piller, 1978  
(type species: *Trocholina permodiscoides*  
(Oberhauser, 1964)

***Auloconus permodiscoides*** (Oberhauser, 1964)  
Pl. 2, fig. 16

\*1964 *Trocholina permodiscoides* nov. sp. – OBERHAUSER, p. 207-208, pl. 2, figs. 13-15, 18, 20, 22; pl. 3, fig. 1.

1978 *Auloconus permodiscoides* (Oberhauser, 1964) – PILLER, p. 74-76, pl. 20, figs. 1-8.

**Material:** Thin sections 187A, 187B.

**Description:** The test is moderately conical, with a broadly rounded apical side. The umbilical side is convex, the umbilicus filled and smoothly rounded. A globular proloculus is followed by a second, tubular chamber which winds in five trochospiral coils. The last whorl is divided from the umbilical mass. The test wall is recrystallized or well preserved, originally aragonitic.

The test diameter is 0.82 mm; the test height is 0.47 mm.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Upper Triassic of Iran (ZANINETTI & BRÖNNIMANN, 1974); Norian of Hellenides, Greece (ZANINETTI & THIEBAULT, 1975); Norian of China (HE, 1982); Norian and/or Rhaetian of Búdöskút



Olistolith, Bükk Mts., Hungary (VELLEDITS & BLAU, 2003); Norian and Rhaetian of Exmouth Plateau, Australia (ZANINETTI et al., 1992; COLWELL et al., 1994); Norian and Rhaetian of Dinarides, Croatia (GUŠIĆ, 1975; GRGASOVIĆ, 1997); Norian and Rhaetian of Carpathians (GAŹDZICKI & ZAWIDZKA, 1973; GAŹDZICKI, 1974; GAŹDZICKI, 1983; SALAJ et al., 1983); Norian and Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (KOEHN-ZANINETTI, 1969; KUSS, 1983; MATZNER, 1986); Rhaetian of Dolomites, Italy (CROS & NEUMANN, 1964); Rhaetian of Apennines, Italy (CIARAPICA et al., 1987; CHIOCCINI et al., 1994); Rhaetian of Alsó Hill, Hungary (BÉRCZI-MAKK, 1980).

Suborder Spirillinina Hohenegger & Piller, 1975  
Family Spirilliniadae Reuss & Fritsch, 1861  
Genus *Turrspirillina* Cushman, 1927  
(type species: *Spirillina conoidea* Paalzow, 1917)

*Turrspirillina minima* Pantić, 1967  
Pl. 2, fig. 18

\*1967 *Turrspirillina minima* n. sp. – PANTIĆ, p. 255-256, pl. 1, figs. 1-8; pl. 2, figs. 1, 2.

**Material:** Thin sections 195A, 243B.

**Description:** The test is small, highly conical. Proloculus is followed by an undivided tubular chamber in five trochospiral coils. The umbilical side is hollow, with a large umbilical opening. The spiral angle measures 30°, the umbilical angle 130°. The test wall is thin, recrystallized.

The test height is 0.18-0.21 mm, the test diameter 0.28-0.32 mm.

**Remarks:** Important criteria for distinguishing between species of the genus *Turrspirillina* are the size of the test, the spiral angle (the openness of the umbilicus), the apical angle and the number of chambers. *Turrspirillina minima* has a relatively small number of coils (5-6) and a large umbilical angle compared to its spiral angle. In this features, it is similar to *Turrspirillina? licia licia*, from which it differs in smaller size.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Norian of Dinarides, Monte Negro (PANTIĆ, 1967) and Serbia (PANTIĆ, 1967); Norian of Transdanubian Range, Hungary (BÉRCZI-MAKK et al., 1993). Other specimens figured in the literature are in inappropriate sections (e.g. in PILLER, 1978; SALAJ et al., 1983; BLAU & SCHMIDT, 1990). Although VELLEDDITS and BLAU (2003) cite this species as limited to the Norian, GAŹDZICKI and MICHALIK (1980) mention this species in association with typically Rhaetian fossils. HE and NORLING (1991) also give the species range from the Norian to the Rhaetian.

Order Miliolida Lankester, 1885 (nom. corr.  
Calkins, 1909)

Suborder Miliolina Delage & Herouard, 1896  
Superfamily Cornuspiridea Schultze, 1854

Family Cornuspiracea Schultze, 1854  
Subfamily Calcivertellinae Loeblich & Tappan,  
1964

Genus *Planiinvoluta* Leischner, 1961  
(type species: *Planiinvoluta carinata* Leischner,  
1961)

*Planiinvoluta carinata* Leischner, 1961  
Pl. 3, fig. 1

- \*1961 *Planiinvoluta carinata* n. g. n. sp. – LEISCHNER, p. 11, pl. 10, figs. 1-14; pl. 12, figs. 6, 7a, 8a.
- 1971 *Planiinvoluta carinata* Leischner, 1971 – WERNLI, p. 222-225, pl. 1, figs. 1-7; pl. 2, figs. 1-6; pl. 3, figs. 1-8.
- 1971 *Planiinvoluta? mesotriasica*, n. sp. – BAUD et al., pp. 86-87, pl. 4, figs. 1, 2, 4.
- 1990 *Planiinvoluta multitalulata* n. sp. – KRISTAN-TOLLMANN, p. 232, fig. 11.4; pl. 4, figs. 3-6.
- 1999 *Planiinvoluta carinata* Leischner, 1961 – BÖHM et al., p. 182, pl. 5, fig. 5; pl. 22, figs. 1-15.

**Material:** Thin sections 245A, 288C, 289.

**Description:** Tests were originally attached to the substrate (see Pl. 3, fig. 1). The globular proloculus is followed by a planispirally coiled deuteroecolus, which follows the surface of the substrate in up to four coils. The test wall is dark, originally probably porcelaneous.

The test diameter 0.57 mm.

**Remarks:** As *Planiinvoluta* needed a firm substrate for attachment, it is most abundant in the reef area (e.g. WURM, 1982; KRISTAN-TOLLMANN, 1986; MARTINI et al., 2004; CHABLAIS et al., 2011). However, it is expected in other facies units as well.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Middle Triassic of Pakistan (ZANINETTI & BRÖNNIMANN, 1975); Anisian of Germany (MARTINI et al., 1996); Ladinian (?) and Carnian of Transdanubian Range, Hungary (ORAVECZ-SCHEFFER, 1987; GÓCZÁN & ORAVECZ-SCHEFFER, 1996); Ladinian and/or Norian of Bulgaria (TRIFONOVA, 1993); Norian and Rhaetian of Carpathians (GAŹDZICKI & ZAWIDZKA, 1973; GAŹDZICKI, 1974, 1983; SALAJ et al., 1983); Norian and Rhaetian of Exmouth Plateau, Australia (ZANINETTI et al., 1992); Rhaetian of Seram, Indonesia (AL-SHAIBANI et al., 1983; MARTINI et al., 2004); Rhaetian of Papua New Guinea (KRISTAN-TOLLMANN, 1986, 1990); Norian, Rhaetian and Lower Jurassic of Northern Calcareous Alps, Austria (LEISCHNER, 1961; KRISTAN-TOLLMANN, 1964a; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; KUSS, 1983; MATZNER, 1986; EBLI, 1993; BÖHM et al., 1999). *Planiinvoluta? mesotriasica* was described from the Anisian beds of Switzerland (BAUD et al., 1971).

Superfamily Nubeculariidea Jones, 1875  
(nom. transl. Mikhalevich, 1988)

Family Ophthalmitidae Wiesner, 1920  
Genus *Ophthalmitium* Kübler & Zwingli, 1870  
(type species: *Oculina liassica* Kübler & Zwingli, 1866)

*Ophthalmitium leischneri* (Kristan-Tollmann, 1962)  
Pl. 3, fig. 2

1976 *Ophthalmitium leischneri* (Kristan-Tollmann, 1962) – ZANINETTI, p. 144-145, pl. 7, figs. 14-16 [kop. Kristan-Tollmann, 1962].

**Material:** Thin section 242A.

**Description:** The test is in axial section biconcave, with a well rounded margin. Chambers are in a planispiral arrangement, slightly deviating from the coiling axis in around three coils. The test wall is dark, micritic, originally porcelaneous.

The specimen measures 0.3 mm in diameter and is 0.12 mm thick.

**Remarks:** In the opinion of GUŠIĆ (1975), *O. leischneri* and *Ophthalmitium carinatum* (Leischner, 1961) represent different axial sections of the same species. To solve this issue, oriented sections of the type material are needed (BÖHM et al., 1999). *Ophthalmitium carinatum* is currently distinguished from *O. leischneri* on the basis of a keeled test margin.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Norian of China (HE & WANG, 1990); Norian and Rhaetian of Exmouth Plateau, Australia (KRISTAN-TOLLMANN & GRAMANN, 1992); Rhaetian of Carpathians (GAŹDZICKI, 1983); Rhaetian of Papua New Guinea (KRISTAN-TOLLMANN, 1990); Late Triassic to Lower Jurassic of Transdanubian Range, Hungary (ORAVECZ-SCHEFFER, 1987); Norian and Lower Jurassic of Northern Calcareous Alps, Austria (WURM, 1982; EBLI, 1993); Norian and/or Rhaetian and Lower Jurassic of Taurus, Turkey (BRÖNNIMANN ET AL., 1970; ZANINETTI ET AL., 1982). BÉRCZI-MAKK (1996) illustrates specimens corresponding to *O. leischneri* from (undivided) Anisian to Carnian of Alsó Hill, Hungary. HE and WANG (1990) show some questionable specimens from the Norian of China and TRIFONOVA (1993) from the Ladinian of Bulgaria. TRIFONOVA (1993) at the same time cites stratigraphic range from the Norian to the Lower Jurassic.

Genus *Paraophthalmitium* Samuel & Borza, 1981  
(type species: *Paraophthalmitium carpaticum* Samuel & Borza, 1981)

*Paraophthalmitium carpaticum* Samuel & Borza, 1981 auct.  
Pl. 3, fig. 3

\*1981 *Paraophthalmitium carpaticum* nov. sp. – SAMUEL & BORZA, p. 68, pl. 19, fig. 4.

1982 *Paraophthalmitium carpaticum* [sic] Samuel & Borza, 1981 – ZANINETTI et al., p. 110, pl. 6, figs. 4?, 5?, 6, 7.

**Material:** Thin sections 243B, 245A, 247, 283, 288C.

**Description:** An excellent, almost complete specimen is presented in Plate 3, figure 3. Chambers are in a planispiral arrangement, half-of-coil in length, separated by pronounced septa. Three whorls are visible. The aperture is situated at the end of a long neck, surrounded by a lip. The test wall is dark, micritic, porcelaneous.

The test height (neck excluded) is 0.44 mm, its width 0.16 mm. The neck is 0.13 mm long.

**Remarks:** The genus and species are in need of a further research, as they are based on one specimen in an axial section only. It has become a common practice to name every planispiral ophthalmitid form with a neck and a lip-bordered aperture *P. carpaticum* without the critical comparison with the type specimen.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Ladinian and/or Carnian of Hellenides, Greece (TSAILA-MONOPOLIS, 1988); poorly divided Late Triassic of Seram, Indonesia (MARTINI et al., 2004) and Cyprus (MARTINI et al., 2009); Carnian of Carpathians (SAMUEL & BORZA, 1981; SALAJ et al., 1983); Carnian of Bulgaria (TRIFONOVA, 1993); Carnian of North America Cordillera, Washington, U.S.A. (IGO & ADACHI, 1992); Norian and/or Rhaetian of Taurus, Turkey (ZANINETTI et al., 1982).

Superfamily Milioliporidae Brönnimann & Zaninetti, 1971

Family Milioliporidae Brönnimann & Zaninetti, 1971

Subfamily Galeanellinae Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret, 1982

Genus *Galeanella* Kristan, 1958 emend. Zaninetti & Brönnimann, 1973

(type species: *Galea tollmanni* Kristan, 1957)

**Remarks:** Despite being one of the most common genera of the Norian-Rhaetian reefs, some issues exist concerning the taxonomy of *Galeanella* (see also SENOWBARI-DARYAN et al., 2010), originating from different types of the type material (i.e. thin section studies or isolated specimens), poorly researched ontogeny, insufficient quantity of type specimens, ignorance of orientation of sections and ignorance of the diagenetic changes to the test wall when distinguishing *Galeanella* from forms such as *Cucurbita* Jablonský, 1973.

*Galeanella tollmanni* was described by KRISTAN (1957) on the basis of isolated specimens, washed-out from Zlambach marlstone. Successive sections of the test were likewise illustrated, though made in one orientation only. BRÖNNIMANN et al. (1973b) later emended the description of the genus, gave a further description of *G. tollmanni*

and introduced a new species, *Galeanella panticae* Zaninetti & Brönnimann in Brönnimann et al., 1973, on the basis of specimens found in thin sections. Especially illustrative is their three-dimensional reconstruction of the test and its possible sections in various planes. *Galeanella panticae* was supposed to differ from *G. tollmanni* in an incomplete overlapping of chambers and in age (Norian for *G. panticae* and Rhaetian for *G. tollmanni*). Both species are of the same size and it soon became known that the stratigraphic ranges of both species overlap (e.g. SCHÄFER, 1979; SALAJ et al., 1983; MATZNER, 1986; KRISTAN-TOLLMANN, 1990).

In practice, it is impossible to distinguish between the two species and they are here regarded as synonymous, an opinion already expressed by KRISTAN-TOLLMANN (1990).

ZANINETTI et al. (1982) described three new species of the genus *Galeanella*. *Galeanella expansa* Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret, 1982 was later transferred to the genus *Orthotrinacria* Zaninetti, Senowbari-Daryan, Ciarapica & Cirilli, 1985 (ZANINETTI et al., 1985; ZANINETTI & MARTINI, 1993). The other two species, *Galeanella minuta* and *Galeanella variabilis*, were distinguished from one another on the basis of a better developed foot in the latter. In my opinion, there is no difference between the two species and *Galeanella minuta* should hold the priority. Characteristic feature of this species is its small size (diameter 0.30–0.35 mm), though it must be noted, that specimens of this size form an early ontogenetic stage of *G. tollmanni* (personal research of the author)!

*Galeanella lucana* Miconneti, Ciarapica & Zaninetti, 1983 was established on a single, unsuitably oriented specimen and is here treated as a junior synonym of *G. tollmanni*.

*Galeanella laticarinata* Al-Shaibani, Carter & Zaninetti, 1983 has a small test (as in *G. minuta*) and an elongated foot (AL-SHAIBANI et al., 1983). The specimen illustrated in KRISTAN-TOLLMANN (1964a) as *G. tollmanni* corresponds to this description. SENOWBARI-DARYAN et al. (2010) believe that *G. laticarinata* is similar to *G. tollmanni*. Truly, most of the specimens described as *G. laticarinata* cannot be distinguished from *G. tollmanni* on that feature alone. The exceptions are specimens figured by MARTINI et al. (2004).

To summarize, the valid species of the genus *Galeanella* are herein considered *G. tollmanni*, *G. minuta* and (questionably) *G. laticarinata*.

***Galeanella tollmanni*** (Kristan, 1957)

Pl. 3, figs. 4, 5

- \*1957 *Galea tollmanni* nov. gen. nov. spec. – KRISTAN, p. 291–292, pl. 25, figs. 7–9; pl. 26, figs. 1–5.
- 1973b *Galeanella tollmanni* (Kristan), 1957 – BRÖNNIMANN et al., p. 416–420, pl. 1, figs. 1–6.
- 1973b *Galeanella panticae* Zaninetti & Brönnimann, n. sp. – BRÖNNIMANN et al., p. 420–426, pl. 2, figs. 1–21; pl. 3, figs. 1–13.

- 1982 *Galeanella panticae* Zaninetti et Brönnimann in Brönnimann, Cadet, Ricou et Zaninetti, 1973 – ZANINETTI et al., p. 112, pl. 1, figs. 1–3, 4?, 5–11.
- 1983 *Galeanella panticae* Zaninetti and Brönnimann in Brönnimann, Cadet, Ricou and Zaninetti, 1973– AL-SHAIBANI et al., p. 304–305, pl. 3, figs. 22–24, 25?.
- 1983 *Galeanella* sp. 1 or overgrown *Galeanella panticae* Zaninetti and Brönnimann, 1973 – AL-SHAIBANI et al., p. 305, pl. 2, figs. 5, 6, 9, 10.
- 1983 *Galeanella lucana* Miconnet, Ciarapica et aZaninetti, n.sp. – MICONNET et al., p. 136–137, pl. 1, figs. 1–3.

**Material:** Thin sections 242A, 242B, 243A, 243B, 244A, 245, 245A, 245B, 246, 283, 284, 288C, 289, 290A, 292, 293.

**Description:** Numerous specimens in different sections and with different degrees of test preservation. The test is relatively large, subglobular. Chambers are coiled closely together, with a proximally larger lumen which narrows towards the distal end and a typically thick, coarsely perforated wall. Each coil is formed by two chambers. The aperture is simple, rounded, set into a slightly depressed center of a wide apertural face (in the literature often referred to as the “foot”).

Tests are 0.38–0.65 mm long.

**Remarks:** *Galeanella* is a typical dweller of the reef area (HOHENEGGER & LOBITZER, 1971; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; SADATI, 1981; SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; ZANINETTI et al., 1982; WURM, 1982; ABATE et al., 1984; KRISTAN-TOLLMANN, 1986; ZANINETTI et al., 1992; MARTINI et al., 2004; CHABLAIS et al., 2011). Only MARTINI et al. (1997) give reports on its occurrence from the lagoon facies.

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Norian of Dinarides, and Zagros Mts., Iran (BRÖNNIMANN et al., 1973b); Norian and Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (KRISTAN, 1957; KRISTAN-TOLLMANN, 1964a; SCHÄFER, 1979; SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; WURM, 1982; MATZNER, 1986); Norian and Rhaetian of Julian Alps, Slovenia (BUSER, 1986; ROŽIČ et al., 2009); Norian and/or Rhaetian of Seram (AL-SHAIBANI et al., 1983) and Sulawesi, Indonesia (MARTINI et al., 1997); Norian and Rhaetian of Taurus, Turkey (ZANINETTI et al., 1982); Norian and Rhaetian of Apennines, Italy (MICONNET et al., 1983); Rhaetian of Papua New Guinea (KRISTAN-TOLLMANN, 1990).

Superfamily Miliolidea Ehrenberg, 1839  
 Family Hauerinidae Schwager, 1876  
 Subfamily Sigmoidinitinae Luczkowska, 1974  
 Genus *Sigmoidilina* Schlumberger, 1887  
 (type species: *Planispirina sigmoidea* Brady, 1884)



**“*Sigmoilina*” *schaeferae*** Zaninetti, Altiner,  
Dager & Ducret, 1982  
Pl. 3, fig. 11

- \* 1982 “*Sigmoilina*” *schaeferae*, n. sp. – ZANINETTI et al., p. 110–111, pl. 8, figs. 3, 6, 9, 12, 13.  
1986 *Sigmoilina* aff. *schaeferae* Zaninetti, Altiner, Dager & Ducret – MATZNER, pl. 4, fig. 3.

**Material:** Thin sections 186C, 244A, 245A, 245B, 246, 247, 249, 283, 284, 286A, 290A, 293.

**Description:** The test is oval in shape. Chambers are in a sigmoidal arrangement. The last pair bears a characteristic keel on the outer surface of the wall. The wall is porcelaneous, coarsely perforated.

Tests measure 0.28–0.78 mm in diameter.

**Remarks:** ZANINETTI et al. (1982) classified the new species as belonging to the genus *Sigmoilina* due to the characteristic chamber arrangement and its porcelaneous wall. Observations were made from thin sections, so they were unable to see the aperture of the new species (thus their uncertainty with the genus attribution). However, according to our specimens, “*Sigmoilina*” *schaeferae* possesses large perforations of its wall (see also MATZNER, 1986), which are not present in true *Sigmoilina*, and should be placed in a new genus of the superfamily Milioliporidae.

“*Sigmoilina*” *schaeferae* favoured micritic substrate (BERNECKER, 2005) of the central-reef area (HOHENEGGER & LOBITZER, 1971; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; WURM, 1982; SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; CHABLAIIS et al., 2010b) or reef flanks (MARTINI et al., 2004).

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Norian of Bulgaria (TRIFONOVA, 1993); Norian and/or Rhaetian of Taurus, Turkey (ZANINETTI et al., 1982); Norian and/or Rhaetian of Seram, Indonesia (AL-SHAIBANI et al., 1983); Norian and Rhaetian (?) of Carpathians (SALAJ et al., 1983); Rhaetian of Iran (SENOWBARI-DARYAN et al., 2010); Rhaetian of Northern Calcareous Alps (MATZNER, 1986).

Family Miliolochinidae Zaninetti, Ciarapica,  
Cirilli & Cadet, 1985

Genus *Miliolochina* Zaninetti, Ciarapica,  
Cirilli & Cadet, 1985

(type species: *Miliolochina stellata* Zaninetti,  
Ciarapica, Cirilli & Cadet, 1985)

***Miliolochina stellata*** Zaninetti, Ciarapica,  
Cirilli & Cadet, 1985  
Pl. 3, fig. 12

- \*1985 *Miliolochina stellata* Zaninetti, Ciarapica,  
Cirilli & Cadet, n. gen., n. sp. – ZANINETTI et al., p. 331–334, pl. 1, figs. 1–9; pl. 2, figs. 1–9.

**Material:** Thin section 243B.

**Description:** The test is small, with chambers in a quinqueloculine-like arrangement. Hollow spines protrude from the outer surface of chambers. The wall is dark, micritic, originally porcelaneous.

The diameter of the test is 0.21 mm.

**Remarks:** Characteristic spines of this species served for anchoring on the sea-floor (CIARAPICA et al., 1988).

**Geographic distribution and stratigraphic range:** Norian of Dinarides (ZANINETTI et al., 1985), Rhaetian of Northern Calcareous Alps, Austria (SCHÄFER, 1979).

## Discussion

### Biostratigraphy

Stratigraphic ranges of the species described above are summarized in Figure 3. Based on the overlapping Norian–Rhaetian ranges of *G. falsoriedli*, *A. perforatum*, “*T.*” *humilis*, *Au. permodiscoides*, *T. minima*, *G. tollmanni*, “*S.*” *schaeferae* and *M. stellata* with a Rhaetian–Lower Jurassic range of *I. turgida*, the upper part of the reef limestone belongs to the Rhaetian. The finding of ?*T. hantkeni* (Pl. 3, fig. 17) confirms this age, but the mentioned specimen is too poorly preserved to allow a reliable determination of age on its own.

Some discussion is needed about the previous determination of “*Agerella martana*” at the same locality (BUSER, 1980), because the latter species is often used as indicative of the Lower Jurassic age (e.g. CHIOCCHINI et al., 1994):

The original description of *Vidalina martana* by FARINACCI (1959) is not valid, firstly because no type specimen was determined and, secondly, because the proposed reconstruction of the species does not match the specimens illustrated. Furthermore, FARINACCI’S (1959) material is probably polyspecific and even polygeneric (see also WERNLI, 1972). The emendation of the species was prepared in 1991, when a new genus, *Agerina*, was established because of the difference in wall structure to the type specimen of the genus *Vidalina* Schlumberger, 1900, *Vidalina hispanica* Schlumberger, 1900 (FARINACCI, 1991). However, the equatorial sections of the specimens illustrated by FARINACCI (1991), clearly show a chambered nature of the test and should thus be regarded as *Ophthalmidium*. The correct species name is thus *Ophthalmidium martana* (Farinacci, 1991). The later replacement by TURVEY (2003) of the genus *Agerina* Farinacci with *Agerella*, is based solely on the preoccupation of the name *Agerina*, so the name *Agerella* also becomes a junior synonym of *Ophthalmidium*. The importance of the species “*Agerina martana*” (correctly *Ophthalmidium martanum*) is that it is often treated as indicative of a Lower Jurassic age (e.g. CHIOCCHINI et al., 1994). A further complication

arises, because it has been often cited from Triassic beds as well, usually under the name *Ophthalmidium martanum* (e.g. BRÖNNIMANN et al., 1970; GAŹDZICKI et al., 1979; WURM, 1982; SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; GAŹDZICKI, 1983; ORAVECZ-SCHEFFER, 1987; GÓCZAN & ORAVECZ-SCHEFFER, 1996). These determinations are all based on axial sections, which differ from the true *Ophthalmidium martana* (*sensu* this work) in the number of coils and/or the test size. *Ophthalmidium martana* (*sensu* this work) for the present remains indicative of the Lower Jurassic, but its stratigraphic range and environmental requirements should be more thoroughly researched, as monospecific associations (personal observations) indicate an opportunistic nature of this species. Because no specimens were illustrated by BUSER (1980), the presence of *O. martana* on Mt. Begunjščica cannot be confirmed. Moreover, it is very likely, that the specimens observed were wrongly assigned to this species, as many Triassic specimens before.

#### Foraminifera as facies indicators

Although the determined assemblage gives a relatively good biostratigraphic result due to the finding of *I. turgida*, Late Triassic foraminifera usually prove to be more useful as facies indicators. Constraints of some species to typical facies units of the peri-reef environments are already indicated in the systematic part of the paper. Table 1 shows the spatial distribution of individual species on Mt. Begunjščica according to the position of samples. The distinction between the central-reef area, the transitional zone and the back-reef area is based on sedimentological criteria alone (work in progress) and is extremely well supported by foraminiferal data. At the same time, spatial distributions on Mt. Begunjščica correspond to palaeoecological zonation established for reefs from the Northern Calcareous Alps (HOHENEGGER & LOBITZER 1971; HOHENEGGER & PILLER, 1975; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1978; SCHÄFER, 1979; SENOWBARI-DARYAN, 1980; FLÜGEL, 1981; PILLER, 1981; SADATI, 1981; SCHÄFER & SENOWBARI-DARYAN, 1981; KUSS, 1983), Sicily (SENOWBARI-DARYAN et al., 1982; MARTINI et al., 2007), Cyprus (MARTINI et al., 2009), Oman (BERNECKER, 2007), Seram in Indonesia (AL-SHABANI et al., 1983; MARTINI et al., 2004), Sulawesi in Indonesia (MARTINI et al., 1997), from Sambosan Accretionary Complex in Japan (CHABLAIS et al., 2010a, 2010b, 2011), and from the Palawan Block in Philippines (KIESSLING & FLÜGEL, 2000). As typical markers of the central-reef area, we note *K. fluegeli*, *A. perforatum*, *Tr. umbo*, *Tr. crassa*, *Tr.? parva*, *I. turgida*, *P. carpaticum*, *M. stellata*, *G. tollmanni*, "*S.*" *schaeferae* and *O. expansa* auct. Though some other species were found only in the central-reef area, our data alone is not enough to consider them as indicators of the central-reef area. In addition, some genera (namely *Trocholina* and *Involutina*) may be present also in the fore-reef area (see PILLER, 1978), which is

not preserved on Mt. Begunjščica. On the other hand, species such as *G. falsofriedli*, "*T.*" *almtalensis*, "*T.*" *jaunensis*, "*Te.*" *humilis*, *Aulotortus* spp., *Auloconus permodiscoides*, ?*T. hantkeni*, *A. austroalpina* and *M. cuvillieri* are good indicators for the back-reef zone.

#### Conclusions

A rich foraminiferal assemblage, consisting of 32 genera and over 41 species was determined from massive peri-reef Dachstein limestone of Mt. Begunjščica. Stratigraphically the most important species are *Galeanella tollmanni*, "*Sigmoilina*" *schaeferae*, *Alpinophragmium perforatum*, *Aulotortus tumidus*, *Variostoma catiliforme*, *Variostoma cochlea* and *Variostoma helicta* (all with the Norian to Rhaetian range), which in combination with *Involutina turgida* (Rhaetian to Lower Jurassic range) give a Rhaetian age for the topmost preserved part of the reef. The spatial distribution of species gives a clear distinction between the central reef and back-reef areas, with the transitional zone in between (Table 1), thus providing a good basis for the future palaeoenvironmental studies.

#### Acknowledgements

The study of Mt. Begunjščica is financially supported by the Slovenian Research Agency (program number P1-0011). The author wishes to express his gratitude to dr. R. Rettori (University of Perugia, Italy) and dr. B. Rožič (University of Ljubljana, Slovenia) for their careful reading of the manuscript and their suggestions, which led to the significant improvement of the paper.

#### References

- ABATE, B., CIARAPICA, G. & ZANINETTI, L. 1984: *Triasina oberhauseri* Koehn-Zaninetti et Bronnimann, 1968, dans le Trias Supérieur récifal (facies "back-reef") de la plate-forme Panormide, Sicile. Rev. Paléob., 3/1: 19-25.
- AL-SHABANI, S. K., CARTER, D. J. & ZANINETTI, L. 1983: Geological and micropaleontological investigations in the Upper Triassic (Asinepe limestone) of Seram, outer Banda arc, Indonesia. Arch. Sci. Geneve, 36/2: 297-313.
- BAUD, A., ZANINETTI, L. & BRÖNNIMANN, P. 1971: Les foraminifères de l'Anisien (Trias moyen) des Préalpes Médiannes Rigides (Préalpes Romandes, Suisse, et Préalpes du Chablais, France). Arch. Sci. Geneve, 24: 73-95.
- BÉRCZI-MAKK, A. 1980: Triassic to Jurassic microfacies of Szilvágy, southwestern Hungary. Föld. Köz., 110/1: 90-103.
- BÉRCZI-MAKK, A. 1996: Foraminifera of the Triassic formations of Alsó Hill (Northern Hungary). Part 2: Foraminifer assemblage of the Wetterstein Limestone Formation. Acta Geol. Hung., 39/3: 223-309.

Tab. 1. Spatial distribution of foraminifera in the transect from the back-reef to the central-reef area, with the transitional zone in between. The two end-members of the peri-reef area were distinguished on the basis of sedimentological criteria alone.

SPECIES	THIN SECTIONS	CENTRAL-REEF	TRANSITION	BACK-REEF
<i>Gandinella falsofriedli</i>	181; 184; 185; 186c,d; 187a; 188a,b; 191b; 195a; 236; 249			
<i>Kaeveria fluegeli</i>	184; <b>243a</b> ; <b>244a</b> ; 245a; <b>249</b>		×	×
<i>Ammobaculites pulcher</i>	<b>243a</b>			
<i>Reophax rudis</i>	<b>244a</b> ; 245a; <b>246</b>		×	
? <i>Gaudryinella clavuliniformis</i>	187a			
“ <i>Trochammina</i> ” <i>almtalensis</i>	186c,d; 187b; 195a; 241; 245b; <b>246</b>	×	×	
“ <i>Trochammina</i> ” <i>jaunensis</i>	186a,b,c; 195a, b; 241; 249			
<i>Duotaxis metula</i>	185; <b>243a</b>	×		×
<i>Duotaxis birmanica</i>	180b; 185; 186d; 187a; 188a; 195a			
<i>Alpinophragmium perforatum</i>	189a; 191b; <b>242a</b> ; <b>243a,b</b> ; <b>244a,b</b> ; 245b; 284; <b>291b</b>		×	×
“ <i>Tetrataxis</i> ” <i>humilis</i>	236; 237; 241; 276a			
<i>Aulotortus sinuosus</i>	180b; 181; 184; 185; 186a,b,c,d; 187a,b; 188a,b; 189a,b; 191b; 192; 195a; 240; 241; 245a; 276a; 278c; 279; 280; 282; <b>290a</b>	×	×	
<i>Aulotortus friedli</i>	184; 186b,c; 187a; 189b; 191b; 237; 248; 278c; 282		×	
<i>Aulotortus tumidus</i>	186a; 187a; 188b; 195a; 236; 237; 241; <b>243a</b>	×		
<i>Aulotortus tenuis</i>	181a			
<i>Auloconus permodiscoides</i>	187a,b			
<i>Trocholina umbo</i>	180b; <b>242a</b> ; 249; 278c; <b>292</b>			
? <i>Trocholina crassa</i>	<b>242a</b> ; <b>243a,b</b> ; <b>244a</b>			
<i>Trocholina?</i> <i>parva</i>	<b>291b</b>			
<i>Involutina turgida</i>	<b>242a</b> ; <b>243b</b>			
? <i>Triasina hantkeni</i>	187b; 245a		×	
<i>Turrspirillina minima</i>	195a; <b>243a</b>		×	×
<i>Agathammina austroalpina</i>	185; 186a,b,d; 191b; 195a; 240; 241; <b>242a</b> ; <b>244a</b> ; 245b; <b>246</b> ; 281; 284; <b>288c</b> ; <b>292</b>	×	×	
<i>Paraophthalmidium carpathicum</i>	<b>243b</b> ; 245a; <b>247</b> ; 283; <b>288c</b>		×	
<i>Ophthalmidium leischneri</i>	<b>242a</b>			
<i>Planiinvoluta carinata</i>	<b>245a</b> ; <b>288c</b> ; <b>289</b>			
<i>Miliolechina stellata</i>	<b>243b</b>			
<i>Galeanella tollmanni</i>	<b>242a,b</b> ; <b>243a,b</b> ; <b>244a</b> ; 245a,b; <b>246</b> ; 283; 284; <b>288c</b> ; <b>289</b> ; <b>290a</b> ; <b>292</b> ; <b>293</b>		×	
“ <i>Sigmoilina</i> ” <i>schaeferae</i>	186c; <b>244a</b> ; 245a,b; <b>246</b> ; <b>247</b> ; 249; 283; 284; <b>286a</b> ; <b>290a</b> ; <b>293</b>		×	×
<i>Miliolipora cuwillieri</i>	180b; 181; 185; 186a,c,d; 187a,b; 191b; 192; 195a,b; 240; 241; <b>244a</b> ; 245a,b; 279; 280; 281; 284; <b>290a</b>	×	×	
<i>Orthotrinacria expansa</i> auct.	<b>242b</b>			
<i>Duostomina turboidea</i>	187a			
<i>Duostomina biconvexa</i>	245			
? <i>Duostomina astrofimbriata</i>	<b>243a</b>			
<i>Diplostromina placklesiana</i>	185; 236; <b>244a</b> ; 245	×	×	
<i>Diplostromina subangulata</i>	195a; 236			
<i>Variostoma coniforme</i>	180b; 186d; <b>244a</b> ; 245a; <b>286a</b> ; <b>293</b>			
<i>Variostoma catilliforme</i>	245a,b			
<i>Variostoma cochlea</i>	245a; 283			
<i>Variostoma helicta</i>	195a			
<i>Frondicularia woodwardi</i> auct.	195b			

**Remarks:** thin sections written in normal-case numbers (e.g. 181a) are from the back-reef area; numbers written in bold (e.g. **293**) are for the central-reef area, and numbers in italics (e.g. 283) for the transition zone



- BÉRCZI-MAKK, A., HAAS, J., RÁLISCH-FELGENHAUER, E. & ORAVECZ-SCHEFFER, A. 1993: Upper Palaeozoic-Mesozoic formations of the Mid-Transdanubian Unit and their relationships. *Acta Geol. Hung.*, 36/3: 263-296.
- BERNECKER, M. 1996: Upper Triassic reefs of the Oman Mountains: data from the South Tethyan margin. *Facies*, 34: 41-76.
- BERNECKER, M. 2005: Late Triassic reefs from the Noerthwest and South Tethys: distribution, setting, and biotic composition. *Facies*, 51: 442-453.
- BERNECKER, M. 2007: Facies architecture of an isolated carbonate platform in the Hawasina Basin: The Late Triassic Jebel Kawr of Oman. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 252: 270-280, doi:10.1016/j.palaeo.2006.11.054.
- BERRA, F., JADOUL, F. & ANELLI, A. 2010. Environmental control on the end of the Dolomia Principale/Hauptdolomit depositional system in the central Alps: Coupling sea-level and climate changes. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 290: 138-150, doi:10.1016/j.palaeo.2009.06.037.
- BLAU, J. 1987a: Neue Foraminiferen aus dem Lias der Lienzer Dolomiten. Teil I: Die Foraminiferenfauna einer roten Spaltenfüllung in Oberrhätalkalken. *Jb. Geol. B.-A.*, 129/3-4: 495-523.
- BLAU, J. 1987b: Neue Foraminiferen aus dem Lias der Lienzer Dolomiten. Teil II (Schluss): Foraminiferen (Involutinina, Spirillinina) aus der Lavanter Breccie (Lienzer Dolomiten) und den Nördlichen Kalkalpen. *Jb. Geol. B.-A.*, 130/1: 5-23.
- BLAU, J. & HAAS, J. 1991: Lower Liassic involutinids (foraminifera) from the Transdanubian Central Range, Hungary. *Paläont. Z.*, 65/1-2: 7-23.
- BLAU, J. & SCHMIDT, T. 1990: Zur Stratigraphie des oberen Hauptdolomits (Nor) der Lienzer Dolomiten (Osttirol, Österreich). *Geol. Paläont. Mitt.*, 17: 1-23.
- BÖHM, F., EBLI, O., KRYSSTYN, L., LOBITZER, H., RAKÚS, M. & SIBLÍK, M. 1999: Fauna, stratigraphy and depositional environment of the Hettangian-Sinemurian (Early Jurassic) of Adnet (Salzburg, Austria). *Abh. Geol. B.-A.*, 56/2: 143-271.
- BOSELLINI, A. & BROGLIO LORIGA, C. 1965: Gli "Strati a *Triasina*" nel Gruppo di Sella (Dolomiti Occidentali). *Mem. Geopal. Univ. Ferrara*, 1/6: 159-180.
- BRENČIČ, M. & POLTNIG, W. 2008: Podzemne vode Karavank - Skrito bogastvo = Grundwasser der Karawanken - Versteckter Schatz. *Geološki zavod Slovenije (Ljubljana) & Joanneum Research Forschungsgesellschaft*: 1-143, incl. 2 geol. maps.
- BRÖNNIMANN, P., POISSON, A. & ZANINETTI, L. 1970: L'unité du Domuz Dag (Taurus Lycien-Turquie). Microfacies et foraminifères du Trias et du Lias. *Riv. Ital. Paleont.*, 76/1: 1-36.
- BRÖNNIMANN, P., CADET, J.-P. & ZANINETTI, L. 1973a: Sur la présence d'*Involutina sinuosa pragsoides* (Oberhauser) (Foraminifère) dans l'Anisien supérieur probable de Bosnie-Herzégovine Méridionale (Yougoslavie). *Riv. Ital. Paleont.*, 79/3: 301-336.
- BRÖNNIMANN, P., CADET, J.-P., RICOU, L.-E. & ZANINETTI, L. 1973b: Révision morphologique et émendation du genre triasique *Galeanella* Kristan-Tollmann (Foraminifère) et description de *Galeanella panticae*, n.sp., (Dinarides yougoslaves et Zagros, Iran). *Verh. Geol. B.-A.*, 3: 411-435.
- BRÖNNIMANN, P., WHITTAKER, J. E. & ZANINETTI, L. 1975: Triassic foraminiferal biostratigraphy of the Kyaukse-Longtawkno area, northern Shan States, Burma. *Riv. Ital. Paleont.*, 81/1: 1-30.
- BUDAI, T. & HAAS, J. 1997: Triassic sequence stratigraphy of the Balaton Highland, Hungary. *Acta Geol. Hung.*, 40: 307-335.
- BUSER, S. 1980: Tolmač lista Celovec (Klagenfurt) L 33-53. Basic geological map of SFRJ 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod, Beograd: 62 p.
- BUSER, S. 1986: Tolmač listov Tolmin in Videm (Udine) L 33-64. Basic geological map of SFRJ 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod, Beograd: 103 p.

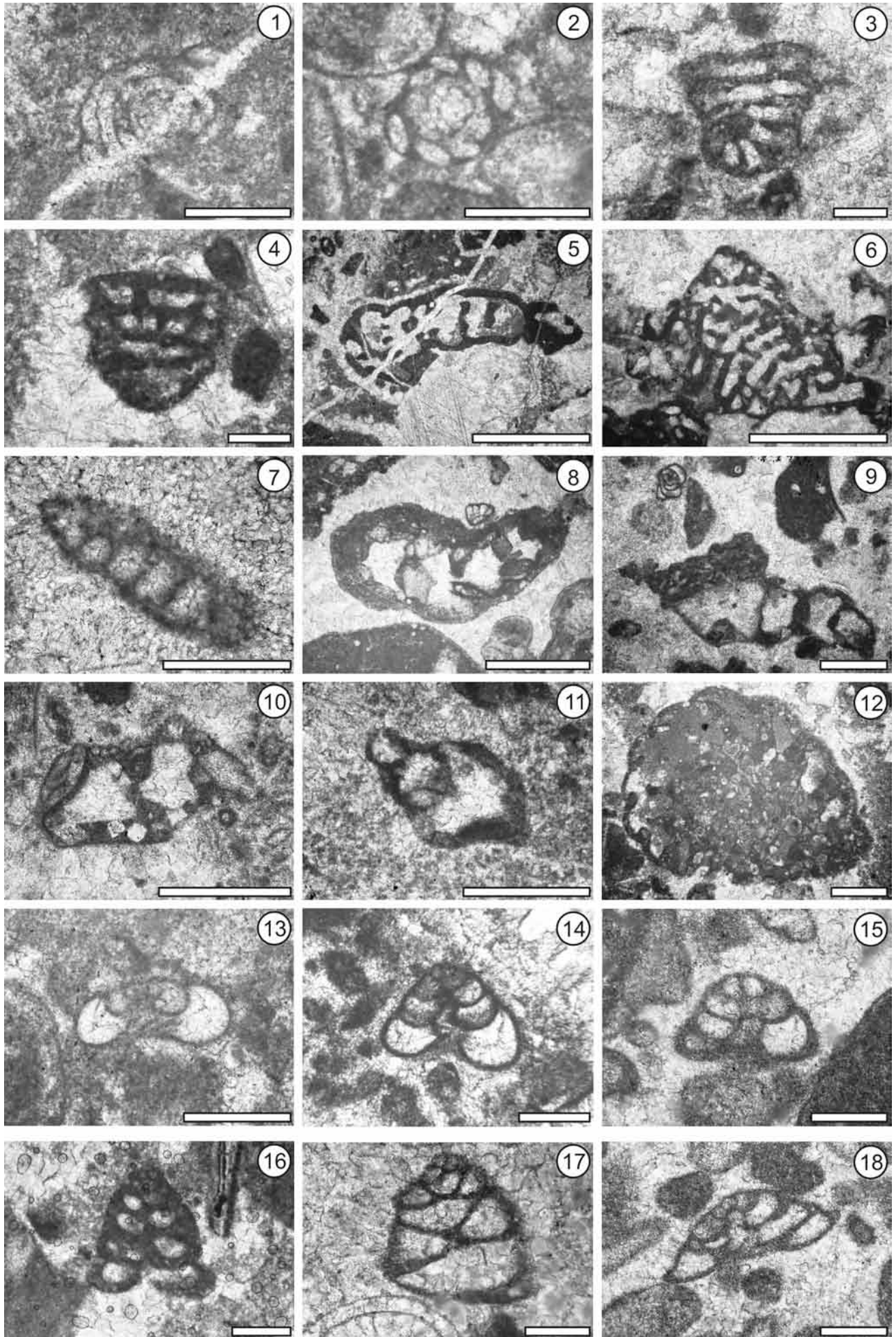
## PLATE 1

Foraminifera from the Rhaetian reef limestone of Mt. Begunjščica

- 1-2 *Gandinella falsofriedli*; 1 thin section 184; 2 thin section 186C
- 3-4 *Kaeveria fluegeli*; 3 thin section 244A; 4 thin section 243A
- 5-6 *Alpinophragmium perforatum*; 5 thin section 242A; 6 thin section 244B
- 7 ?*Gaudryinella clavuliniformis*; thin section 187A
- 8 *Reophax* sp.; thin section 251
- 9-11 *Reophax rudis*; 9 thin section 245A; 10 thin section 246; 11 thin section 244A
- 12 *Ammobaculites pulcher*; thin section 243A
- 13 "*Trochammina*" *jaunensis*; thin section 253
- 14-15 "*Trochammina*" *almtalensis*; 14 thin section 248; thin section 241
- 16-17(?) *Duotaxis metula*; 16 thin section 243A; 17 thin section 244B
- 18 "*Tetrataxis*" *humilis*; thin section 241

Figures 1-4, 7, 13-18 scale bar 200 µm; figures 9-12 scale bar 500 µm; figures 5-6, 8 scale bar 1500 µm.

PLATE 1





- BUSER, S. 1989: Development of the Dinaric and the Julian carbonate platforms and of the intermediate Slovenian Basin (NW Yugoslavia). *Boll. Soc. Geol. It.*, 40: 313-320.
- BUSER, S. 1996: Geology of Western Slovenia and its paleogeographic evolution. In: Drobne, K., Goričan, Š. & Kotnik, B. (eds.): International workshop Postojna '96: The role of impact processes and biological evolution of planet Earth. ZRC SAZU, 111-123.
- BUSER, S. & CAJHEN, J. 1978: Basic geological map SFRJ 1 : 100.000 L 33-53, Celovec. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- BUSER, S., RAMOVŠ, A. & TURNŠEK, D. 1982: Triassic reefs in Slovenia. *Facies*, 6: 15-24.
- CHABLAIS, J., MARTINI, R. & ONOUE, T. 2010a: *Aulotortus friedli* from the Upper Triassic gravitational flow deposits of the Kumagawa River (Kyushu, Southwest Japan). *Paleont. Res.*, 14/2: 151-160, doi:10.2517/1342-8144-14.2.151.
- CHABLAIS, J., MARTINI, R., SAMANKASSOU, E., ONOUE, T. & SANO, H. 2010b: Microfacies and depositional setting of the Upper Triassic mid-oceanic atoll-type carbonates of the Sambosan Accretionary Complex (southern Kyushu, Japan). *Facies*, 56: 249-278, doi:10.1007/s10347-009-0204-6.
- CHABLAIS, J., MARTINI, R., KOBAYASHI, F., STAMPFLI, G.M. & ONOUE, T. 2011: Upper Triassic foraminifers from Panthalassan carbonate buildups of Southwestern Japan and their paleobiogeographic implications. *Micropal.*, 57/2: 93-124.
- CHIOCCHINI, M., FARINACCI, A., MANCINELLI, A., MOLINARI, V. & POTETTI, M. 1994: Biostratigrafia a foraminiferi, dasicladali e calpionelle delle successioni carbonatiche Mesozoiche dell'Appennino Centrale (Italia). *Studi Geol. Camerti, "Biostratigrafia dell'Italia centrale"*: 9-130.
- CIARAPICA, G. & PASSERI, L. 1990: The Dachstein Limestone of the Mt. Canin (Julian Alps) and its paleogeographic meaning. *Boll. Soc. Geol. It.*, 109: 239-247.
- CIARAPICA, G. & ZANINETTI, L. 1984a: Foraminifères et biostratigraphie dans le Trias supérieur de la série de la Spezia (Dolomies de Coregna) et Formation de la Spezia, nouvelles formations, Apennin septentrional. *Rev. Paléob.*, 3/1: 117-134.
- CIARAPICA, G. & ZANINETTI, L. 1984b: *Aulotortus praegaschei* (Koehn-Zaninetti, 1968): révision taxonomique et stratigraphique sur la base du matériel-type. *Rev. Paléob.*, 3/1: 53-61.
- CIARAPICA, G. & ZANINETTI, L. 1985: Le cas de "*Glomospirella friedli-Angulodiscus? gaschei*" (= *Aulotortus friedli*, Aulotortinae, Involutinidae, Foraminifera, Trias): Analyse structurale et révision taxonomique. *Arch. Sci. Geneve*, 38/1: 71-86.
- CIARAPICA, G., CIRILLI, S., PASSERI, L., TRINCIANTI, E. & ZANINETTI, L. 1987: "Andriti di Burano" et "Formation du Monte Cetone" (nouvelle formation), biostratigraphie de deux séries-types du Trias Supérieur dans l'Apennin Septentrional. *Rev. Paléob.*, 6/2: 341-409.
- CIARAPICA, G., CIRILLI, S., MARTINI, R., PANZANELLI-FRATONI, R., SALVINI-BONNARD, G. & ZANINETTI, L. 1988: Spine e filamenti capillari nei foraminiferi di ambiente reefale: esempi di adattamento nel Trias superiore. *Atti del 74o Congresso della Società Geologica Italiana*, 125-131.
- CIARAPICA, G., CIRILLI, S., MARTINI, R., RETTORI, R., ZANINETTI, L. & SALVINI-BONNARD, G. 1990: Carbonate buildups and associated facies in the Monte Facito Formation (Southern Apennines). *Boll. Soc. Geol. It.*, 109: 151-164.
- COLWELL, J. B., RÖHL, U., VON RAD, U. & KRISTANTOLLMANN, E. 1994: Mesozoic sedimentary and volcanoclastic rocks dredged from the northern Exmouth Plateau and Rowley Terrace, offshore northwest Australia. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 15/1: 11-42.
- COURTIN, B., ZANINETTI, L., ALTINER, D. & DECROUEZ, D. 1982: Sur l'existence de calcaires de plate-forme à foraminifères triasiques et Othrys occidentale (Grèce continentale): Importance paleogeographiques. *Rev. Paléob.*, 1/1: 13-27.

## PLATE 2

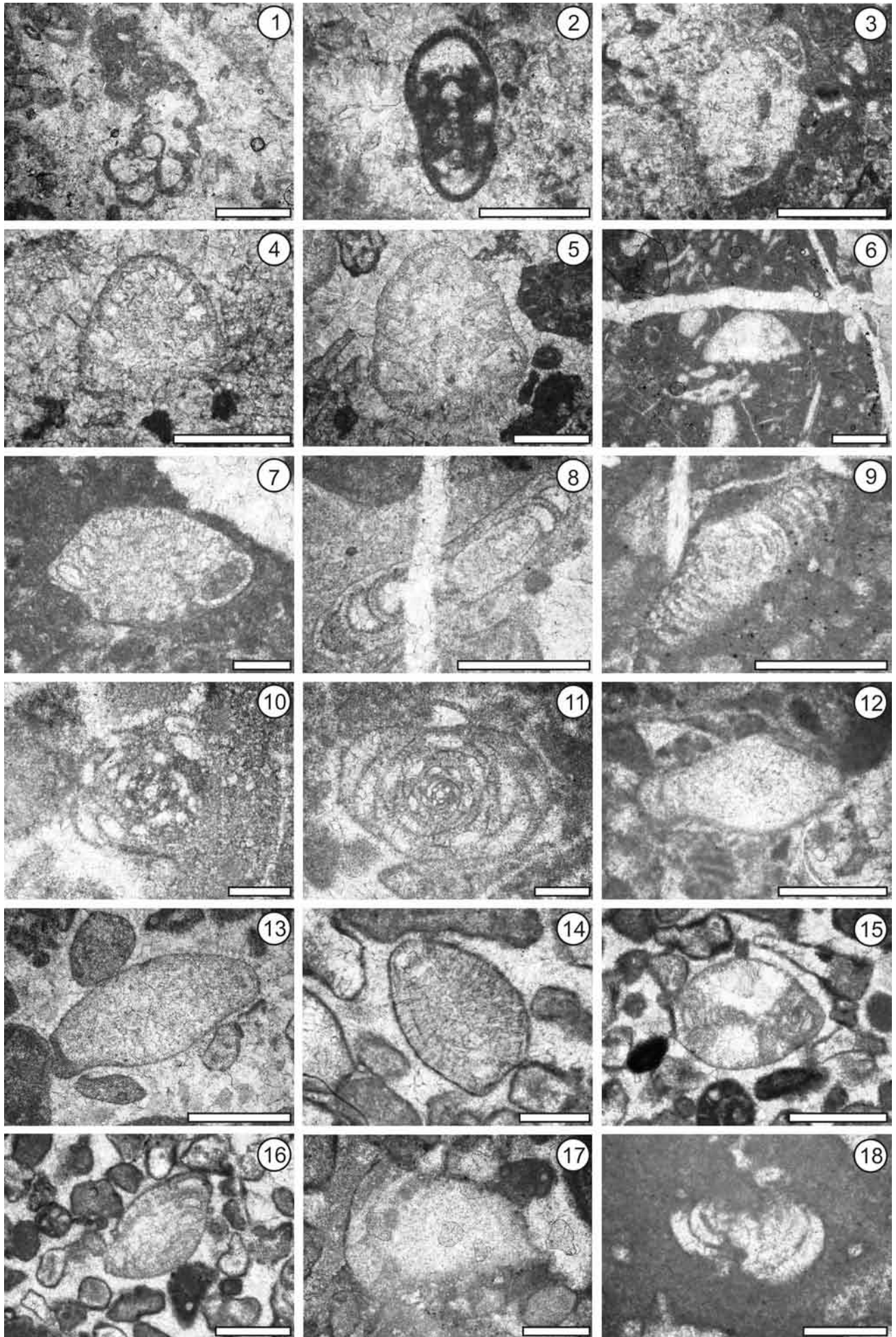
Foraminifera from the Rhaetian reef limestone of Mt. Begunjščica

- 1 *Ammobaculites* sp.; thin section 245A
- 2 *Endotriada* sp.; thin section 244B
- 3 *Involutina turgida*; thin section 243B
- 4-5 *Trocholina umbo*; thin section 244A
- 6-7 *Trocholina crassa*; 6 thin section 242A; 7 thin section 249
- 8 ?*Aulotortus sinuosus*; note the very flat test, but an involute coiling; thin section 186D
- 9 *Aulotortus tenuis*; thin section 249
- 10-11 *Aulotortus friedli*; thin section 249
- 12-13 *Aulotortus tumidus*; 12 thin section 252; 13 thin section 241
- 14-15 *Aulotortus sinuosus*; 14 thin section 187A; 15 thin section 195A
- 16 *Auloconus permodisoides*; thin section 187A
- 17 ?*Triasina hantkeni*; thin section 187B
- 18 *Turrispirillina minima*; thin section 195B

Figures 6-7, 10-11, 14, 17-18 scale bar 200 µm; figures 1-5, 8-9, 12-13, 15-16 scale bar 500 µm.



PLATE 2



- CROS, P. & NEUMANN, M. 1964: Contribution a l'étude des formations a *Triasina* Majzon des Dolomites Centrales. *Rev. Micropal.*, 7/2: 125-137.
- DAGER, Z. 1978: Les foraminifères du Trias de la Péninsule de Kocaeli – Turquie. *Notes Lab. Paleont. Univ. Geneve*, 3/4: 23-71.
- DI BARI, D. & LAGHI, G. F. 1994: Involutinidae Bütschli (Foraminiferida) in the Carnian of the northeastern Dolomites (Italy). *Mem. Sci. Geol.*, 46: 93-118.
- EBLI, O. 1993: Foraminiferen aus dem Unterlias der Nördlichen Kalkalpen. *Zitteliana*, (München) 20: 155-164.
- FARINACCI, A. 1959: Le microfacies giurassiche dei Monti Martani (Umbria). *Univ. Stud. Roma, Inst. Geol. Paleont.*, 8/41: 3-61.
- FARINACCI, A. 1991: Emendation of *Vidalina* Schlumberger and the new genus *Agerina* (Foraminifera). *Paleopelagos*, 1: 5-16.
- FLÜGEL, E. 1967: Eine neue Foraminifere aus den Riff-Kalken der nordalpinen Ober-Trias: *Alpinofragmium perforatum* n. g., n. sp. *Senck. Lethaea*, (Frankfurt am Main) 48/5: 381-402.
- FLÜGEL, E. 1981: Paleoecology and facies of Upper Triassic reefs in the Northern Calcareous Alps. *SEPM Spec. Publ.*, 30: 291-359.
- FLÜGEL, E. 2004: Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg: 976 p.
- FLÜGEL, E. & RAMOVŠ, A. 1961: Fossilinhalt und Mikrofazies des Dachsteinkalkes (Ober-Trias) im Begunjščica-Gebirge, S-Karawanken (NW-Slovenien, Jugoslawien). *N. Jb. Geol. Paläont. Mitt.*, 287-294.
- FUGAGNOLI, A. 1996: On the occurrence of *Duostaxis metula* Kristan (Foraminifera) in the Lower Jurassic (Calcari Grigi, Venetian Prealps, Italy). *Rev. Paléob.*, 15/2: 385-392.
- GALE, L., KOLAR-JURKOVŠEK, T., ŠMUC, A. & ROŽIČ, B. 2011: Integrated foraminiferal and conodont biostratigraphy from the Rhaetian strata of the Slovenian Basin (Southern Alps). In: CSIKI, Z. (eds.): *Abstr. book, 8th Romanian Symp. Paleont.*, Bucharest 29-30 September 2011 (Bucharest): 46-47.
- GAWLICK, H.-J. & BÖHM, F. 2000: Sequence and isotope stratigraphy of Late Triassic distal periplatform limestones from the Northern Calcareous Alps (Kälberstein Quarry, Berchtesgaden Hallstatt Zone). *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rund.)*, 89: 108-129.
- GAŹDZICKI, A. 1974: Rhaetian microfacies, stratigraphy and facial development in the Tatra Mts. – *Acta Geologica Polonica*, 24/1: 17-120.
- GAŹDZICKI, A. 1983: Foraminifers and biostratigraphy of Upper Triassic and Lower Jurassic of the Slovakian and Polish Carpathians. *Palaont. Pol.*, 44: 109-169.
- GAŹDZICKI, A. & MICHALIK, J. 1980: Uppermost Triassic sequences of the Choč nappe (Hronic) in the West Carpathians of Slovakia and Poland. *Acta Geol. Pol.*, 30/1: 61-76.
- GAŹDZICKI, A. & ZAWIDZKA, K. 1973: Triassic foraminifer assemblages in the Choč nappe of the Tatra Mts. *Acta Geol. Pol.*, 23/3: 483-490.
- GAŹDZICKI, A., KOZUR, H. & MOCK, R. 1979: The Norian-Rhaetian boundary in the light of micropaleontological data. *Geologija*, 22/1: 71-112.
- GIANOLLA, P., DE ZANCHE, V. & ROGLI, G. 2003: An Upper Tuvalian (Triassic) platform-basin system in the Julian Alps: the start-up of the Dolomia Principale (Southern Alps, Italy). *Facies*, 49: 125-150, doi:10.1007/s10347-003-0029-7.
- GIORDANO, N., RIGO, M., CIARAPICA, G. & BERTINELLI, A. 2010: New biostratigraphical constraints for the Norian/Rhaetian boundary: data from Lagonegro Basin, Southern Apennines, Italy. *Lethaia*, 43/4: 573-586, doi:10.1111/j.1502-3931.2010.00219.x.

### PLATE 3

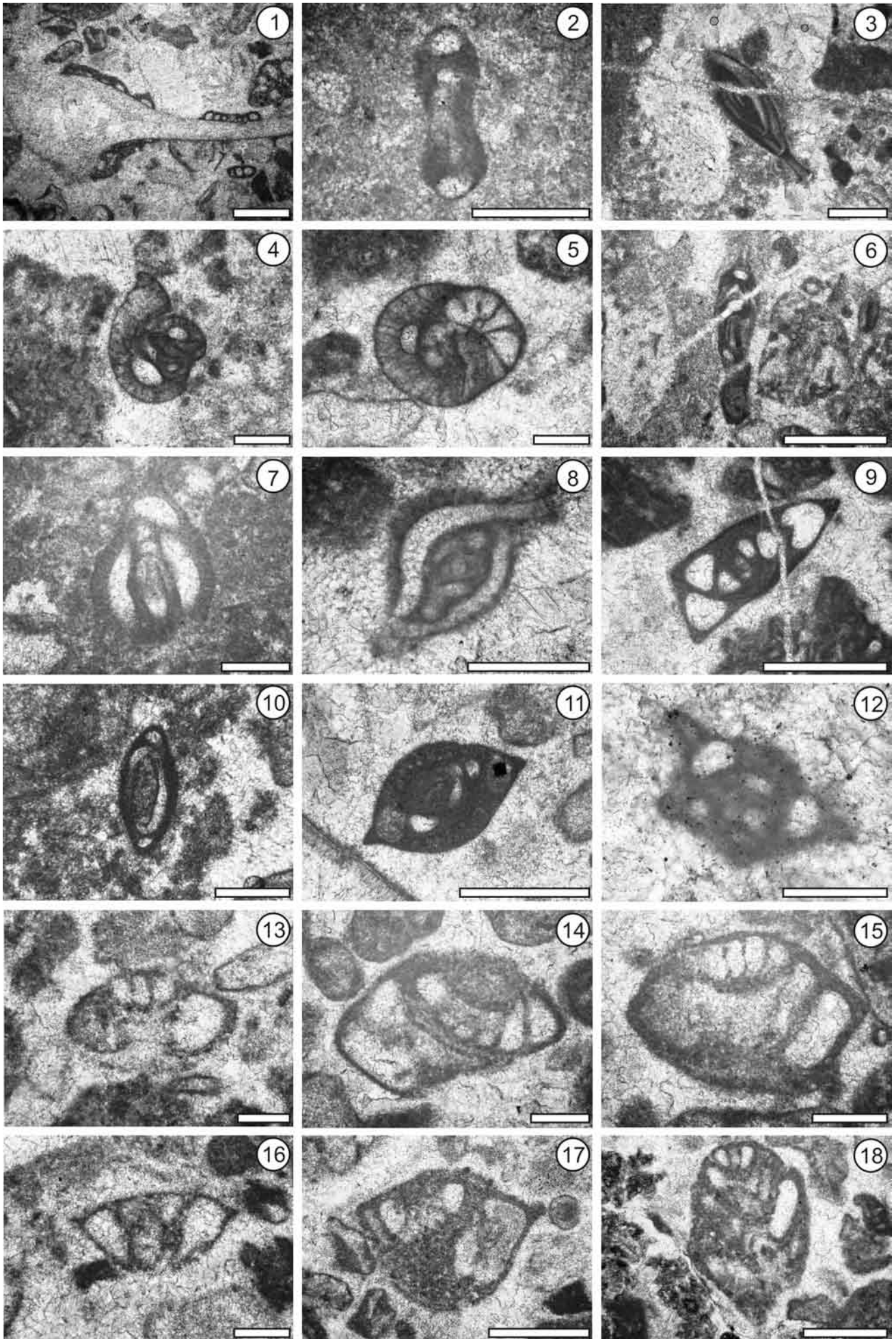
Foraminifera from the Rhaetian reef limestone of Mt. Begunjščica

- 1 *Planinivoluta carinata*; thin section 245A
- 2 *Ophthalmidium leischneri*; thin section 242A
- 3 *Paraophthalmidium carpathicum*; thin section 247
- 4-5 *Galeanella tollmanni*; 4 thin section 245A; 5 thin section 245B
- 6 “*Orthotrinacria expansa*” auct.; thin section 242
- 7-8 *Miliolipora cuvillieri*; thin section 249
- 9 Milioliporidae; thin section 245B
- 10 *Agathammina austroalpina*; thin section 240
- 11 “*Sigmoilina*” *schaeferae*; thin section 245A
- 12 *Miliolechina stellata*; thin section 243B
- 13 *Diplostromina placklesiana*; thin section 245A
- 14 *Duostomina* sp.; thin section 253
- 15 *Duostomina biconvexa*; thin section 249
- 16 *Variostoma catilliforme*; thin section 245A
- 17 *Variostoma coniforme*; thin section 245A
- 18 *Variostoma cochlea*; thin section 245A

Figures 2-5, 7-8, 10, 13-16 scale bar 200 µm; figures 1, 6, 9, 11, 17-18 scale bar 500 µm.



PLATE 3





- GÓCZÁN, F. & ORAVECZ-SCHEFFER, A. 1996: Tuvallian sequences of the Balaton Highland and the Zsámbék Basin. Part II: Characterization of sporomorphs and foraminifer assemblages, biostratigraphic, palaeogeographic and geohistoric conclusions. *Acta Geol. Hung.*, 39/1: 33-101.
- GOLONKA, J. 2007: Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 244: 297-307, doi:10.1016/j.palaeo.2006.06.041.
- GRGASOVIĆ, T. 1997: Upper Triassic biostratigraphy and algae from Žumberak (Croatia). *Geol. Croatica*, 50/2: 201-214.
- GUŠIĆ, I. 1975: Upper Triassic and Liassic Foraminiferida of Mt. Medvednica, Northern Croatia (families: Involutinidae, Nubeculariidae). *Palaeont. Jugoslavica*, 15: 7-45.
- HAAS, J. 2004: Characteristics of peritidal facies and evidences for subaerial exposures in Dachstein-type cyclic platform carbonates in the Transdanubian Range, Hungary. *Facies*, 50: 263-286, doi:10.1007/s10347-004-0021-x.
- HAAS, J., LOBITZER, H. & MONOSTORI, M. 2007: Characteristics of the Lofer cyclicity in the type locality of the Dachstein Limestone (Dachstein Plateau, Austria). *Facies*, 53: 113-126, doi:10.1007/s10347-006-0087-8.
- HAIG, D. W., MCCARTAIN, E., BARBER, L. & BACKHOUSE, J. 2007: Triassic-Lower Jurassic foraminiferal indices for Bahamian-type carbonate-bank limestones, Cablac Mountain, East Timor. *J. Foramin. Res.*, 37/3: 248-264, doi:10.2113/gsjfr.37.3.248.
- HALLAM, A. 2001: A review of the broad pattern of Jurassic sea-level changes and their possible causes in the light of current knowledge. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 67: 23-37, doi:10.1016/S0031-0182(00)00229-7.
- HE, Y. 1982: Upper Triassic foraminifera of eastern Xizang. In: *Stratigraphy and Palaeontology in W. Sichuan and E. Xizang, China*, Part 2. The People's Publishing House of Sichuan, China: 107-118.
- HE, Y. 1984: Middle Triassic foraminifera from Central and Southern Guizhou, China. *Acta Palaeont. Sin.*, 23/4: 420-431.
- HE, Y. 1999: Triassic foraminifera from northwestern Yunnan. *Acta Micropal. Sin.*, 16/1: 31-49.
- HE, Y. & CAI, L. 1991: Middle Triassic foraminifera from Tiandong depression, Baise Basin, Guangxi, China. *Acta Palaeont. Sin.*, 30/2: 212-230.
- HE, Y. & NORLING, E. 1991: Upper Triassic Foraminifera and stratigraphy of Mianzhu, Sichuan province, China. *Sver. Geol. Unders. Ser. Ca.*, 76: 1-47.
- HE, Y. & WANG, L. 1990: Triassic foraminifera from Yushu region, Qinghai. In: *Devonian-Triassic stratigraphy and palaeontology from Yushu region of Qinghai, China*, Part I. Qinghai Institute of Geological Sciences, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica, Nanjing University Press: 59-96.
- HERLEC, U. & VIDRIH, R. 2006: Manganova orudelnja v Sloveniji. *Scopolia Suppl.* 3, 119-124.
- HOHENEGGER, J. & LOBITZER, H. 1971: Die Foraminiferen-Verteilung in einem obertriadischen Karbonatplattform-Becken-Komplex der östlichen Nördlichen Kalkalpen. *Verh. Geol. B.-A.*, 3: 458-485.
- HOHENEGGER, J. & PILLER, W. 1975: Ökologie und systematische Stellung der Foraminiferen im gebankten Dachsteinkalk (Obertrias) des Nördlichen Toten Gebirges (Oberösterreich). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 18: 241-276.
- IGO, H. & ADACHI, S. 1992: Triassic foraminifers from the San Juan Islands, Washington, U.S.A. In: TAKAYANAGY, Y. & SAITO, T. (eds.): *Studies in Benthic Foraminifera Benthos'90*, Sendai, 1990, Tokyo: 313-321.
- JENDREJÁKOVÁ, O. 1972: *Involutina muranica* n. sp. in der oberen Trias der Westkarpaten. *Geol. Zb. Geol. Carpathica*, 23/1: 197-200.
- KAMOUN, F., MARTINI, R., PEYBERNES, B. & ZANINETTI, L. 1994: Caractérisation micropaléontologique du »Rhétien« dans l'axe nord-sud (Tunisie centrale); comparaison avec le Rhétien de la dorsale et de la plate-forme Saharienne. *Riv. Ital. Paleont. Strat.*, 100/3: 365-382.
- KIESSLING, W. & FLÜGEL, E. 2000: Late Paleozoic and Late Triassic limestones from North Palawan Block (Philippines): Microfacies and paleogeographical implications. *Facies*, 43: 39-78, doi:10.1007/BF02536984.
- KOEHN-ZANINETTI, L. 1969: Les Foraminifères du Trias de la région de l'Almtal (Haute-Autriche). *Jb. Geol. B.-A., Sdb.* 14: 1-155.
- KORCHAGIN, O. A. 2009: *Kaeveria fluegeli* (Zaninetti, Altiner, Dager et Ducret, 1982) (Foraminifera) from Upper Triassic of the South-East Pamirs. *Strat. Geol. Corell.*, 17/1: 62-67, doi:10.1134/S0869593809010055.
- KRISTAN, E. 1957: Ophthalmidiidae und Tetrataxinae (Foraminifera) aus dem Rhät der Hohen Wand in Nieder-Österreich. *Jb. Geol. B.-A.*, 100: 269-298.
- KRISTAN-TOLLMANN, E. 1964a: Die Foraminiferen aus den Rhätischen Zlambachmergeln der Fischerwiese bei Aussee im Salzkammergut. *Jb. Geol. B.-A., Sdb.* 10: 1-189.
- KRISTAN-TOLLMANN, E. 1964b: Beiträge zur Mikrofauna des Rhät. I. Weitere neue Holothuriensklerite aus dem alpinen Rhät. II. Zwei charakteristische Foraminiferengemeinschaften aus Rhätkalken. *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr.*, 14: 125-148.
- KRISTAN-TOLLMANN, E. 1986: Foraminiferen aus dem rhätischen Kuta-Kalk von Papua/Neuguinea. *Mitt. Österr. Geol. Ges.*, 78 (1985): 291-317.
- KRISTAN-TOLLMANN, E. 1990: Rhät-Foraminiferen aus dem Kuta-Kalk des Gurumugl-Riffes in Zentral-Papua/Neuguinea. *Mitt. Österr. Geol. Gess.*, 82: 211-289.
- KRYSTAN-TOLLMANN, E. & COLWELL, J. 1992: Alpiner Enzesfelder Kalk (Unter-Lias) vom Exmouth-

- Plateau nordwestlich von Australien. Mitt. Österr. Geol. Ges., 84 (1991): 301-308.
- KRISTAN-TOLLMANN, E. & GRAMANN, F. 1992: Paleontological evidence for the Triassic age of rocks dredged from the northern Exmouth Plateau (Tethyan foraminifers, echinoderms, and ostracodes). In: VON RAD, U., HAQ, B. U., et al. (eds): Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station (Texas) 122: 463-471.
- KUSS, J. 1983: Faziesentwicklung in proximalen Intraplattform-Becken: Sedimentation, Palökologie und Geochemie der Kössener Schichten (Ober-Trias, Nördliche Kalkalpen). Facies: 61-172.
- LEISCHNER, W. 1961: Zur Kenntnis der Mikrofauna und -flora der Salzburger Kalkalpen. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 112/1: 1-47.
- LOEBLICH, A. R. & TAPPAN, H. 1987 [with year 1988]: Foraminiferal genera and their classification. Van Nostrand Reinhold Company: 970 p.
- LOEBLICH A. R. JR. & TAPPAN H. 1992. Present status of foraminiferal classification. In: TAKAYANAGI, Y. & SAITO, T. (eds.): Studies in benthic Foraminifera. Tokai University Press (Sendai): 93-102.
- LUCAS, S. G. 2010: The Triassic chronostratigraphic scale: history and status. In: LUCAS, S. G. (ed.): The Triassic timescale. Geol. Soc. Spec. Publ., 344: 17-39.
- MANCINELLI, A., CHIOCCHINI, M., CHIOCCHINI, R. A. & ROMANO, A. 2005: Biostratigraphy of Upper Triassic-Lower Jurassic carbonate platform sediments of the central-southern Apennines (Italy). Riv. Ital. Paleont. Strat., 111: 271-283.
- MÁRQUEZ, L., CALVET, F., ARNAL, I. & TRIFONOVA, EK. 1994: Asociación de foraminíferos en la Formación Isábena, Triásico superior Sudpirenaico (España). Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Geol.), 89/1-4: 189-197.
- MARTINI, R., PEYBERNES, B., ZANINETTI, L. & FRÉCHEN-GUES, M. 1996: Découverte de foraminifères dans les intervalles transgressifs de deux séquences de dépôt anisiennes (Muschelkalk) du bassin de la Weser (Hesse, Allemagne du Nord). Geobios, 24/5: 505-511, doi:10.1016/S0016-6995(96)80021-0.
- MARTINI, R., VACHARD, D., ZANINETTI, L., CIRILLI, S., CORNÉE, J.-J., LATHUILLIERE, B. & VILLENEUVE, M. 1997: Sedimentology, stratigraphy, and micropalaeontology of the Upper Triassic reefal series in Eastern Sulawesi (Indonesia). Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 128: 157-174, doi:10.1016/S0031-0182(97)81128-5.
- MARTINI, R., ZANINETTI, L., LATHUILLIERE, B., CIRILLI, S., CORNÉE, J.-J. & VILLENEUVE, M. 2004: Upper Triassic carbonate deposits of Seram (Indonesia): palaeogeographic and geodynamic implications. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 206: 75-102, doi:10.1016/j.palaeo.2003.12.020.
- MARTINI, R., CIRILLI, S., SAURER, C., ABATE, B., FERRUZZA, G. & LO CICERO, G. 2007: Depositional environment and biofacies characterisation of the Triassic (Carnian to Rhaetian) carbonate succession of Punta Bassano (Marettimo Island, Sicily). Facies, 53: 389-400, doi:10.1007/s10347-007-0115-3.
- MARTINI, R., PEYBERNES, B. & MOIX, P. 2009. Late Triassic foraminifera in reefal limestones of SW Cyprus. J. Foram. Res., 39: 218-230, doi:10.2113/gsjfr.39.3.218.
- MATZNER, C. 1986: Die Zlambach-Schichten (Rhät) in den Nördlichen Kalkalpen: Eine Plattform-Hang-Beckenentwicklung mit allochthoner Karbonatsedimentation. Facies, 14: 1-104.
- McROBERTS, C. A., KRZYSTYN, L. & SHEA, A. 2008: Rhaetian (Late Triassic) Monotis (Bivalvia: Pectinoida) from the eastern Northern Calcareous Alps (Austria) and the end-Norian Crisis in pelagic faunas. Palaeontology, 51/3, 721-735, doi:10.1111/j.1475-4983.2008.00776.x.
- MICONNET, P., CIARAPICA, G. & ZANINETTI, L. 1983: Faune a Foraminifères du Trias supérieur d'affinité Sud-Téthysienne dans l'Apennin meridional (Bassin de Lagonegro, Province de Potenza, Italie); comparaison avec l'Apennin septentrional. Rev. Paléob., 2/2: 131-147.
- MIHAJLOVIĆ, M. & RAMOVŠ, A. 1965: Liadna cefalopodna favna na Begunjščici v Karavankah. Razprave IV. razreda SAZU, 8: 419-438.
- OBERHAUSER, R. 1964: Zur Kenntnis der Foraminiferengattungen *Permodiscus*, *Trocholina* und *Triasina* in der alpinen Trias und ihre Einordnung zu den Archaeidisciden. Verh. Geol. B.-A., 2: 196-210.
- OGORELEC, B. & ROTHE, P. 1993: Mikrofazies, Diagenese und Geochemie des Dachsteinkalkes und Hauptdolomits in Süd-West-Slowenien. Geologija, 35: 81-181.
- OGORELEC, B., BUSER, S. & MIŠIČ, M. 2006: Manganovalni gomolji v jurskem apnencu Južnih Alp Slovenije = Manganese nodules in Jurassic limestone of the Southern Alps in Slovenia. Geologija, 49/1: 69-84, doi:10.5474/geologija.2006.005.
- ORAVECZ-SCHEFFER, A. 1987: Triassic foraminifers of the Transdanubian Central Range. Geol. Hungar., 50: 3-134.
- PANTIĆ, S. 1967: *Turrispirillina minima* n. sp. iz trijaskih sedimenta Dinarida *Turrispirillina minima* n. sp. des sediments triasiques des Dinarides externes. Vesnik, Ser. A, 24/25: 255-258.
- PETERS, K. 1855: Geologische Manuskriptkarte der Blattes Radmannsdorf.
- PETERS, K. 1856: Bericht über die geologische Aufnahme in Kärnten, Krain und aus dem Görzer Gebiete im Jahre 1855. Die Karawankenkette. Jb. Geol. R. A., 7: 629-691.
- PEYBERNES, B., MARTINI, R. & ZANINETTI, L. 1991: Les Foraminifères benthiques du Trias carbonate (Ladinien-? Carnien et Rhétien) de Corse. Geobios, 24/6: 683-696.
- PILLER, W. 1978: Involutinacea (Foraminifera) der Trias und des Lias. Beiträge Paläont. Österreich, Wien, 5: 1-164.
- PILLER, E. 1981a: The Steinplatte reef complex, part of an Upper Triassic carbonate platform

- near Salzburg, Austria. In: TOOMEY, D. F. (ed.): European fossil reef models. SEPM Spec. Publ., 30: 261-290.
- PIRDENI, A. 1988: The Triassic benthic foraminifera of Albania. Rev. Paléob., Vol. Spec. 2 (Benthos'86): 145-152.
- PLACER, L. 1999: Contribution to the macro-tectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. Geologija, 41: 223-255, doi:10.5474/geologija.1998.013.
- PLACER, L. 2008: Principles of the tectonic subdivision of Slovenia. Geologija, 51: 205-217, doi:10.5474/geologija.2008.021.
- POISSON, A., CIARAPICA, G., CIRILLI, S. & ZANINETTI, L. 1985: *Gandinella falsofriedli* (Salaj, Borza et Samuel, 1983) (Foraminifere, Trias superieur), etude de l'espece sur la base de materiel-type du Dumuz Dag (Taurus Lycien, Turquie). Rev. Paléob., 4/1: 133-136.
- PREMOLI-SILVA, I. 1971: Foraminiferi anisici della regione Giudicariense (Trento). Riv. Ital. Paleont., 77/3: 303-374.
- PRETO, N., KUSTATSCHER, E. & WIGNALL, P. B. 2010: Triassic climates – State of the art and perspectives. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 290: 1-10, doi:10.1016/j.palaeo.2010.03.015.
- RAMOVŠ, A. 2001: Lipoldovo geološki raziskovanje in njegove rokopisne karte slovenskega ozemlja = Lipolds geologische Untersuchungen und seine geologische Manuskriptkarten des slowenischen Gebietes. Geologija, 44/1: 7-14, doi:10.5474/geologija.2001.001.
- RAMOVŠ, A. & KRISTAN-TOLLMANN, E. 1967: Die Lias-Schichten von Stol (Karawanken). Geol. Vjesnik, 20 (1966): 57-62.
- RAMOVŠ, A. & TURNŠEK, D. 1991: The Lower Norian (Latian) development with coral fauna on Razor and Planja in the northern Julian Alps (Slovenia). Razprave IV. razreda SAZU, 32/6: 175-213.
- RIGAUD, S., MARTINI, R., RETTORI, R. & STANLEY, JR. G. D. 2010: Stratigraphic potential of the Upper Triassic benthic foraminifera. Albertiana, 38: 34-39.
- ROZIČ, B., KOLAR-JURKOVŠEK, T. & ŠMUC, A. 2009: Late Triassic sedimentary evolution of Slovenian Basin (eastern Southern Alps): description and correlation of the Slatnik Formation. Facies, 55: 137-155, doi:10.1007/s10347-008-0164-2.
- RUSSO, F. 2005: Biofacies evolution of the Triassic platforms of the Dolomites, Italy. Ann. Univ. Studi Ferrara Mus. Sci. Nat., (Ferrara) Spec. Vol. 33-44.
- SADATI, S.-M. 1981: Die Hohe Wand: Ein obertriadisches Lagunen-Riff am Ostende der Nördlichen Kalkalpen (Niederösterreich). Facies, 5: 191-264.
- SCHÄFER, P. 1979: Fazielle Entwicklung und palökologische Zonierung zweier obertriadischer Riffstrukturen in den Nördlichen Kalkalpen ("Oberrhät"-riff-kalke, Salzburg). Facies, 1: 3-245.
- SALAJ, J., BIELY, A. & BYSTRICKÝ, J. 1967: Trias-foraminiferen in den Westkarpaten. Geol. Práce, 42: 119-136.
- SALAJ, J., BORZA, K. & SAMUEL, O. 1983: Triassic foraminifera of the West Carpathians. Geologický Ústav Dionýza Štúra, 1-213, incl. 157 pls.
- SAMUEL, O. & BORZA, K. 1981. *Paraophthalmidium* nov. gen. (Foraminifera) from the Triassic of the West Carpathians. Západné Karpaty, sér. Paleontológia, 6: 65-78.
- SATTTLER, U. & SCHLAF, J. 1999: Sedimentologie und Mikrofazies des gebankten Dachsteinkalkes der Julischen Alpen Sloweniens (Obertrias). Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 42: 109-118.
- SCHÄFER, P. 1979: Fazielle Entwicklung und palökologische Zonierung zweier obertriadischer Riffstrukturen in den Nördlichen Kalkalpen ("Oberrhät"-riff-kalke, Salzburg). Facies, 1: 3-245.
- SCHÄFER, P. & SENOWBARI-DARYAN, B. 1978: Die Häufigkeitsverteilung der Foraminiferen in drei oberrhätischen Riff-Komplexen der Nördlichen Kalkalpen (Salzburg, Österreich). Verh. Geol. B.-A., 2: 73-96.
- SCHÄFER, P. & SENOWBARI-DARYAN, B. 1981: Facies development and paleoecological zonation of four Upper Triassic patch-reefs, Northern Calcareous Alps near Salzburg, Austria. In: TOOMEY, D. F. (ed.): European fossil reef models. SEPM Spec. Publ., 30: 241-259.
- SENOWBARI-DARYAN, B. 1980: Fazielle und paläontologische Untersuchungen in oberrhätischen Riffen (Feichtenstein- und Gruberriff bei Hintersee, Salzburg, Nördliche Kalkalpen). Facies, 3: 1-237.
- SENOWBARI-DARYAN, B. 1984: Ataxophragmiidae (Foraminifera) aus den obertriadischen Rifffalken von Sizilien. Münster. Forsch. Geol. Paläont., 61: 83-99.
- SENOWBARI-DARYAN, B. & FLÜGEL, E. 1996: Nachweis einiger Riff-Foraminiferen und Problematika in den norischen Dachsteinkalken des Gosaukammes (Österreich). Jb. Geol. B.-A., 139/2: 247-271.
- SENOWBARI-DARYAN, B., SCHÄFER, P. & ABATE, B. 1982: Obertriadische Riffe und Rifforganismen in Sizilien (Beiträge zur Paläontologie und Mikrofazies obertriadischer Riffe im alpin-mediterranen Raum, 27). Facies, 6: 165-184.
- SENOWBARI-DARYAN, B., RASHIDI, K. & TORABI, H. 2010: Foraminifera and their associations of a possibly Rhaetian section of the Nayband Formation in central Iran, northeast of Esfahan. Facies, 56: 567-596, doi:10.1007/s10347-010-0221-5.
- STAMPFLI, G. M. & BOREL, G. D. 2002: A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. Earth Planet. Sci. Lett., 196: 17-33.
- STAMPFLI, G. M. & BOREL, G. D. 2004: The TRANS-MED transects in space and time: Constraints on the paleotectonic evolution of the Mediter-



- ranean Domain. In: CAVAZZA, W., ROURE, F. M., SPAKMAN, W., STAMPFLI, G. M. & ZIEGLER, P. A. (eds.): The TRANSMED atlas, the Mediterranean region from crust to mantle. Springer-Verlag: 53-90.
- STAMPFLI, G. M. & KOZUR, H. W. 2006: Europe from the Variscan to Alpine cycles. In: GEE, D. G. & STEPHENSON, R. A. (eds.): European Lithosphere Dynamics. Geol. Soc. Mem., 32: 57-82.
- STANLEY JR., G., D. 2003: The evolution of modern corals and their early history. Earth-Sci. Rev., 60: 195-225, doi:10.1016/S0012-8252(02)00104-6.
- STEFANI, M., FURIN, S. & GIANOLLA, P. 2010: The changing climate framework and depositional dynamics of Triassic carbonate platforms from the Dolomites. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 290: 43-57, doi:10.1016/j.palaeo.2010.02.018.
- SUDAR, M. 1986: Triassic microfossils and biostratigraphy of the Inner Dinarides between Gučevo and Ljubišnja Mts., Yugoslavia. Ann. Géol. Pénin. Balkan., 50: 151-394.
- TELLER, F. 1899: Das Alter der Eisen- und Manganz führenden Schichten im Stou- und Vigunšca-Gebiete an der Südseite der Karawanken. Verh. Geol. R.-A., 24: 396-418.
- TRIFONOVA, E. 1967: Some new Triassic foraminifera in Bulgaria. Ann. Univ. Sofia, 60 (1965/1966): 1-13.
- TRIFONOVA, E. 1977a: Foraminiferen aus der Trias des Ostbalkans. Palaeont., Strati. Lithol., 6: 47-63.
- TRIFONOVA, E. 1977b: A microbiofacies containing Duostaminidae, Endothyridae (Foraminifera) and *Baccanella floriformis* Pantić (Algae) in the Middle Triassic of central North Bulgaria. Rev. Bulg. Geol. Soc., 38/1: 53-60.
- TRIFONOVA, E. 1978: The foraminifera zones and subzones of the Triassic in Bulgaria. I. Scythian and Anisian. Geol. Balc., 8/3: 85-104.
- TRIFONOVA, E. 1992: Taxonomy of Bulgarian Triassic foraminifera. I. Families Psammosphaeridae to Nodosinellidae. Geol. Balc., 22/1: 3-50.
- TRIFONOVA, E. 1993: Taxonomy of Bulgarian Triassic foraminifera. II. Families Endothyriidae to Ophthalmidiidae. Geol. Balc., 23/2: 19-66.
- TSAILA-MONOPOLIS, S. 1988: Microforaminifères benthiques du Trias moyen et supérieur de l'île d'Aegina (Grèce). Rev. Paléob., (Geneve) Vol. Spec. 2 (Benthos'86): 167-173.
- TURNŠEK, D. 1997: Mesozoic corals of Slovenia. Založba ZRC SAZU, Ljubljana: 512 p.
- TURNŠEK, D. & BUSER, S. 1991: Norian-Rhaetian coral reef buildups in Bohinj and Rdeči Rob in southern Julian Alps (Slovenia). Razprave IV. razreda SAZU, 32/7: 215-257.
- TURNŠEK, D. & RAMOVŠ, A. 1987: Upper Triassic (Norian-Rhaetian) reef buildups in the northern Julian Alps (NW Yugoslavia). Razprave IV. razreda SAZU, 28/2: 27-67.
- TURNŠEK, D., BUSER, S. & OGORELEC, B. 1984: The role of corals in Ladinian-Carnian reef communities of Slovenia, Yugoslavia. Paleontogr. Am., 54: 201-209.
- TURVEY, S. T. 2003: A replacement name for *Aegerina* Farinacci, 1991 (Foraminifera) non Tjernvik, 1956. J. Micropal., 22: 139, doi:10.1144/jm.22.2.139.
- TUZCU, N., WERNLI, R. & ZANINETTI, L. 1982: L'âge de la "Série Calcaire" dans la région de Karaman, Taurus Occidental, Turquie. Étude des foraminifères du Trias Supérieur, paléoenvironnement de dépôt. Arch. Sci. Geneve, 35/2: 127-135.
- UROŠEVIĆ, D. 1971: A survey of Triassic fauna and flora of Stara Planina Mt. (Carpatho-Balkan Region). Ann. Géol. Pénin. Balk., 36: 95-104.
- UROŠEVIĆ, D. & DUMURĐANOV, N. 1976: Les caractéristiques micropaléontologiques et lithologiques des sédiments triasiques de Galičica et Jablanica (Macédoine occidentale). Bull. Mus. Hist. Natur. Belgrade, A., 31: 89-107.
- VACHARD, D. & FONTAINE, H. 1988: Biostratigraphic importance of Triassic foraminifera and algae from south-east Asia. Rev. Paléob., 7/1: 87-98.
- VACHARD, D., COLIN, J.-P., HOCHULI, P. A. & ROSELL, J. 1990: Biostratigraphie: Foraminifères, palynoflore et ostracodes du Rhétien de Bac Grilleria (Pyrénées Orientales Espagnoles). Geobios, 23/5: 521-537.
- VELLEDITS, F. & BLAU, J. 2003: The Bődöskút Olistolith, an exotic limestone block from the Bükk Mountains (NE-Hungary). Facies, 48: 23-48.
- VETTERS, H. 1933a: Geologische Manuskriptkarte Radmannsdorf 1 : 75.000. Nach Originalaufnahmen von Teller, Kossmat, Härtel und Ampfere zusammengefasst von H. Vettters.
- VETTERS, H. 1933b: Geologische Karte der Republik Österreich und der Nachbargebiete. Geol. B. A., Wien.
- VLAHOVIĆ, I., TIŠLJAR, J., VELIĆ, I. & MATIČEĆ, D. 2002: The Karst Dinarides are composed of relics of a single Mesozoic platform: Facts and consequences. Geol. Croatica, 55/2: 171-183.
- VLAHOVIĆ, I., TIŠLJAR, J., VELIĆ, I. & MATIČEĆ, D. 2005: Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 220: 333-360, doi:10.1016/j.palaeo.2005.01.011.
- WERNLI, R. 1971: *Planinivoluta carinata* Leischner, 1961 (Foraminifere) dans l'Aalénien Supérieur du Jura Méridional (France). Arch. Sci. Geneve, 24/2: 219-226.
- WERNLI, R. 1972: Les *Vidalina* du Trias et du Jurassique sont-elles des *Ophthalmidium* (Foraminifères)? Eclogae Geol. Helv., 65/2: 361-368.
- WEYNSCHENK, R. 1956: *Aulotortus*, a new genus of Foraminifera from the Jurassic of Tyrol, Austria. Contrib. Cushman Found. Foramin. Res., 7/1: 26-28.
- WURM, D. 1982: Mikrofazies, Paläontologie und Palökologie der Dachsteinriffkalke (Nor) des Gosaukammes, Österreich. Facies, 6: 203-296.
- ZAMPARELLI, V., IANNACE, A. & RETTORI, R. 1995: Upper Triassic foraminifera (Ammodiscidae

- and Aulotortidae) from the Scifarello Formation, S. Donato Unit (Northern Calabria, Italy). *Rev. Paléob.*, 14/2: 399-409.
- ZANINETTI, L. 1976: Les Foraminifères du Trias. Essai de synthèse et corrélation entre les domaines Mésogéens Européen et Asiatique. *Riv. It. Paleont.*, 82/1: 1-258.
- ZANINETTI, L. & BRÖNNIMANN, P. 1974: Etude micropaléontologique comparée des Involutinidae (Foraminifères) des formations triassiques d'Elika, d'Espahk et de Nayband, Iran. *Eclogae Geol. Helv.*, 67/2: 403-418.
- ZANINETTI, L. & BRÖNNIMANN, P. 1975: Triassic foraminifera from Pakistan. *Riv. Ital. Paleont.*, 81/3: 257-280.
- ZANINETTI, L. & MARTINI, R. 1993: *Bispiranella* et *Orthotrinacria* (Foraminifères, Trias), nouvelle description et regroupement dans la famille des Orthotrinacriidae (Milioliporacea). *Boll. Soc. Paleont. It.*, 32/3: 385-392.
- ZANINETTI, L. & THIEBAULT, F. 1975: Les foraminifères du Trias supérieur du Massif du Taygete (Péloponnèse Méridionale, Grèce). *Arch. Sci. Geneve*, 28/2: 229-235.
- ZANINETTI, L., ALTINER, D., DAGER, Z. & DUCRET, B. 1982: Les Milioliporidae (Foraminifères) dans le Trias supérieur à faciès récifal du Taurus, Turquie. II: Microfaunes associées. *Rev. Paléob.*, 1/2: 105-139.
- ZANINETTI, L., CIARAPICA, G., CIRILLI, S. & CADET, J.-P. 1985: *Miliolechina stellata*, n. gen., n. sp. et *Hirsutospirella pilosa*, n. gen. n. sp. (Foraminifères), dans le Trias supérieur (Norien) à faciès récifal des Dinarides. *Rev. Paléob.*, 4/2: 331-341.
- ZANINETTI, L., MARTINI, R. & ALTINER, D. 1992: Les Miliolina (Foraminifères): Proposition pour une nouvelle subdivision; description des familles Hydraniidae, n. fam., et Siculocostidae, n. fam. *Rev. Paléob.*, 11/1: 213-217.

## Dokaz za norijsko-retijsko natezno tektoniko v Slovenskem bazenu (Južne Alpe)

### Outcrop-scale evidence for the Norian-Rhaetian extensional tectonics in the Slovenian Basin (Southern Alps)

Primož OPRČKAL<sup>1</sup>, Luka GALE<sup>2</sup>, Tea KOLAR-JURKOVŠEK<sup>2</sup> & Boštjan ROŽIČ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana;

e-mail: primoz988@gmail.com; bostjan.rozic@geo.ntf.uni-lj.si

<sup>2</sup>Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana;

e-mail: luka.gale@geo-zs.si; tea.kolar-jurkovsek@geo-zs.si

Prejeto / Received 16. 3. 2012; Sprejeto / Accepted 4. 4. 2012

*Ključne besede:* baški dolomit, sinsedimentni prelom, norij/retij, poznotriasna tektonika, Dinaridi, Južne Alpe, Škofja Loka

*Key words:* Bača Dolomite, synsedimentary fault, Norian/Rhaetian, Late Triassic tectonics, Dinarides, Southern Alps, Škofja Loka

#### Izvleček

Neposrednih dokazov za norijsko-retijsko tektoniko na območju današnje Slovenije do sedaj nismo poznali. V članku je predstavljen primer kamnoloma v okolici Škofje Loke. Baški dolomit, ki izdanja v kamnolomu, je presekan s številnimi normalnimi paleoprelomi. Norijsko-retijska starost baškega dolomita je potrjena z najdbo konodonta vrste *Norigondolella steinbergensis* (Mosher, 1968). Nastanek prelomov povezujemo z začetkom ekstenzije na območju jurskega Piemont-Ligurijskega oceana ali s poslednjim razpiranjem Neotetide (Meliata oceana).

#### Abstract

No direct evidence for the Norian-Rhaetian tectonic activity has been gathered from the Slovenian territory until now. In the quarry in the vicinity of Škofja Loka, several palaeofaults transect the outcropping Bača Dolomite. The Norian-Rhaetian age of the Bača Dolomite is confirmed with the finding of the conodont species *Norigondolella steinbergensis* (Mosher, 1968). The formation of the faults is related to the opening of the future Jurassic Piemont-Ligurian Ocean to the west of the studied area, or with the diminishing influence of the Neotethys (Meliata) Ocean to the east.

#### Uvod

Obdobje triasa spremlja več pomembnih premikov tektonskih plošč ter z njimi povezanih zapiranj obstoječih oceanov (Paleotetida) in odpiranje novih (Neotetida) (e.g. STAMPFLI & MOSAR, 1999; TARI, 2002; STAMPFLI & BOREL, 2004; VLAHOVIĆ et al., 2005; STAMPFLI & KOZUR, 2006; GOLONKA, 2007; SCHMID et al., 2008). Na območju današnje zahodne Slovenije, ki geostruktarno pripada vzhodnim Južnim Alpam in Dinaridom, je zelo dobro poznana in dokumentirana srednjetriasna faza natezne tektonike, ki sovпада z odpiranjem oceana Meliata (Neotetida) vzhodno od današnjega alpskega prostora. Ta tektonska aktivnost, ki jo spremlja intenzivna vulkanska dejavnost, je povzročila razpad pred tem enotnega sedimentacijskega prostora (BUSER, 1979, 1986, 1989, 1996). Najbolje je raziskana na idrijskem, kjer je odigrala ključno

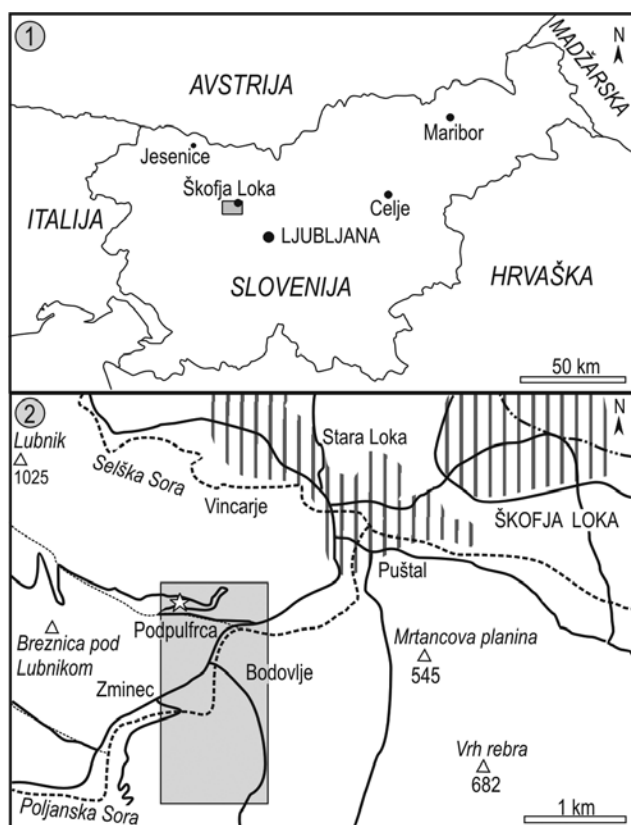
vlogo pri formiranju hidrotermalnega živosrebrovega orudenja (npr. MLAKAR & DROVENIK, 1971; ČAR, 2010). Medtem pa norijsko-retijska ekstenzija, ki spremlja odpiranje jurskega Piemont-Ligurijskega oceana (Alpske Tetide) in je dobro znana v sosednjih paleogeografskih enotah, pri nas ni dokumentirana. Nasprotno, za obdobje poznega triasa naj bi bila za širše območje današnje Slovenije značilna progradacija platform v bazenska območja (BUSER, 1989, 1996; ŠMUC & ČAR, 2002; GIANOLLA et al., 2003; CELARC & OGORELEC, 2006; CELARC & GORIČAN, 2007; CELARC & KOLAR-JURKOVŠEK, 2008). Slednja so bila v celoti ali, v primeru Slovenskega bazena, delno zapolnjena s sedimenti (BUSER, 1989, 1996, ŠMUC & ČAR, 2002). Posledično so podatki o poznotriasni tektoniki pri nas skromni (KRYSTYN et al., 1994; SCHLAF et al., 1997). Na podlagi študije zgornjetriasnih plasti v Južnih Karavankah KRYSTYN et al. (1994) pišejo



o norijsko-retijskemu razpadu tega ozemlja na bazene in karbonatne platforme. Novejše študije norijsko-retijskih kamnin Slovenskega bazena tudi kažejo na obdobje intenzivnejše tektonske aktivnosti proti koncu triasa in na prehodu v juro (OGORELEC & ROTHE, 1993, območje Čepovana; GALE et al., 2012). Vendar pa so dokazi večinoma interpretativni, kjer se tekonska aktivnost kaže posredno v pojavljanju mestoma zelo debelih horizontov karbonatno-roženčevih breč v tem delu bazenskega zaporedja (ROŽIČ, 2006, 2009; ROŽIČ et al., 2009; GALE 2010; GALE et al., 2012). V celotnem norijsko-retijskem zaporedju Slovenskega bazena GALE in sodelavci (2012) izdvajajo štiri take nivoje, ki so datirani v spodnji in srednji norij, retij in konec triasa.

Neposrednih strukturnih dokazov o obstoju poznotriasne natezne tektonike nasprotno do sedaj še nismo imeli. Pričujoči članek predstavlja prvi tovrstni dokaz za obstoj poznotriasnih prelomnih struktur na nivoju izdanka. Namen članka je:

- detajlni sedimentološki in strukturni opis izdanka baškega dolomita v kamnolomu nad vasjo Podpulfrcra pri Škofji Loki (sl. 1);
- tektonska analiza izdanka in rekonstrukcija razvojnih faz;
- regionalna umestitev rezultatov v poznotriasni geološki prostor.



Sl. 1. Geografska lega obravnavanega območja. Lega obravnavanega kamnoloma je označena z zvezdico.

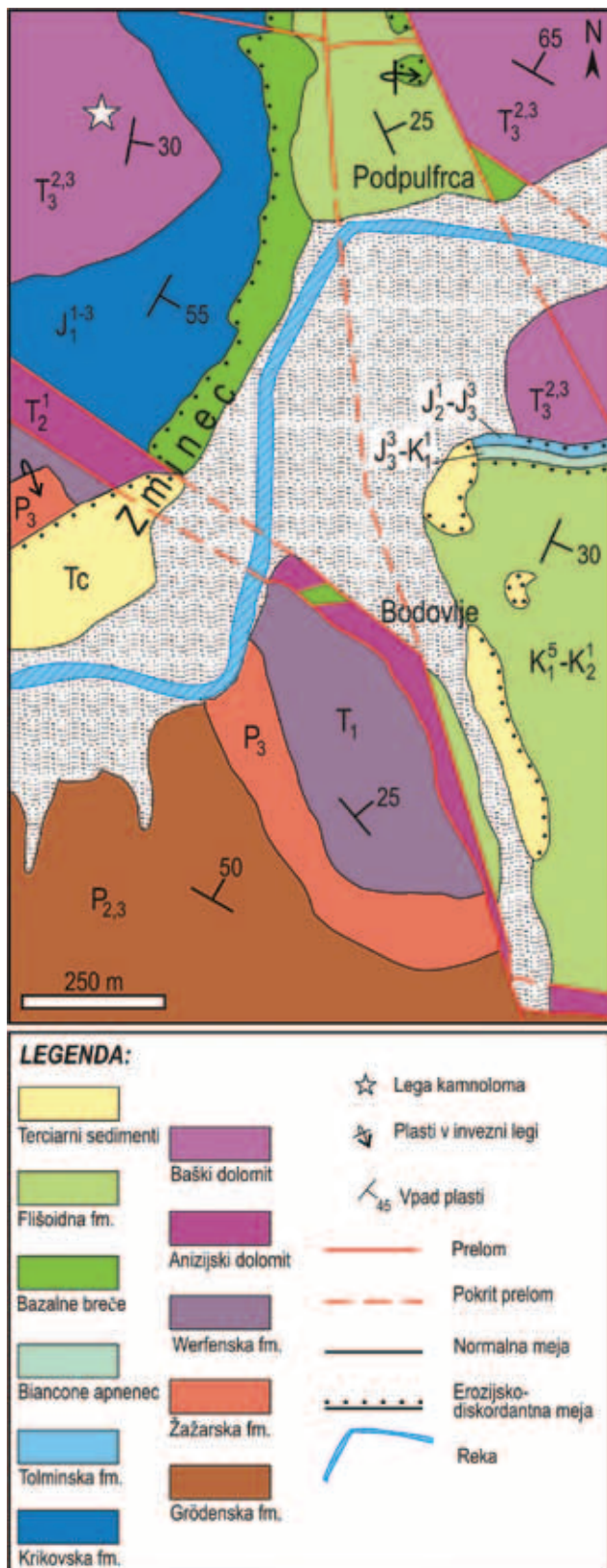
Fig. 1. Geographic position of the studied area. The star symbol marks the position of the quarry described in the paper.

## Geološka zgradba

Obravnavano območje je strukturno del Tolminskega pokrova, proti jugu ločenega od Zunanjih Dinaridov z južnoalpsko naravno mejo, in proti severu prekritim s Krnskimi pokrovom (BUSER, 1986; PLACER, 1999, 2008). Prevladujoč vpliv na strukturo Tolminskega pokrova je imelo miocensko ali post-miocensko podpiranje Zunanjih Dinaridov pod Južne Alpe (PLACER, 2008). "Južnoalpski" narivi prekrivajo starejše narive z vergenco proti jugo-zahodu pred-oligocenske starosti (PLACER, 1999; KASTELIC et al., 2008). Naravno zgradbo so dodatno razrezali pliocenski normalni prelomi, ki so bili kasneje reaktivirani kot desnozmični (VRABEC & FODOR, 2006; KASTELIC et al., 2008; ŠMUC & ROŽIČ, 2009; ČAR, 2010).

V okviru Osnovne geološke karte SFRJ 1 : 100.000 je ozemlje prikazano na listu Kranj (GRAD & FERJANČIČ, 1974, 1976). Poenostavljena geološka karta okolice Zminca, Podpulfrcra in Bodovelj (sl. 2) je rezultat geološkega kartiranja, opravljenega leta 2011 v okviru terenskih vaj študentov geologije Naravoslovnotehniške fakultete (skupina pod mentorstvom B. Rožiča). V okolici Bodovelj in Zminca izdajajo srednje- do zgornjopermski rdeči do zeleno rjavi meljasti peščenjaki z vložki kremenovih konglomeratov Grödenske formacije. Slednji ostro prehajajo v temno sive "sataste" dolomite in plastnate dolomite Žazarške formacije konca perma. Temu sledijo rumeno rjavi do sivo rjavi sljudnati muljevci z lečami oolitnega apnenca, ki pripadajo spodnjetriasni Werfenski formaciji. Masivni anizijski dolomit se pojavlja le v ozkem pasu, omejenem s prelomi v smeri WNW-ESE. Pod Lubnikom v okolici Podpulfrcra izdajajo le mezozojske kamnine, izmed katerih je najstarejši norijsko-retijski plastnat poznodiagenetski dolomit z gomolji roženca, t.i. baški dolomit. Slednji prehaja v spodnjepersko Krikovsko formacijo, ki jo sestavljajo plastnati kalkareniti z vložki roženca. Z erozijsko mejo nanje nalegajo spodnjekredne bazalne karbonatne breče, ki prehajajo v zeleno rjave muljevce z vložki kalkarenitov (Spodnja flišoidna formacija). Drugačen razvoj sledimo ob vznožju Dešne, kjer nad baškim dolomitom izdajajo rdeči okremenjeni laporovci in radiolariti srednje- do zgornjeperske Tolminske formacije in nad njimi zgornjeperski svetlo siv plastnat mikritni apnenec z rdečimi in zelenimi roženci (biancone apnenec). Baški dolomit, Krikovska formacija, Tolminska formacija in biancone apnenec so značilni za sedimentacijo v Slovenskem bazenu.

V kamnolomu, ki je opisan v nadaljevanju, izdajajo zgornji del baškega dolomita. Meja s Krikovsko formacijo je razgaljena v nadaljevanju profila ob cesti nekaj metrov višje. Čeprav je bilo v kamnolomu pobranih več vzorcev za konodontne analize (sl. 3.2), je bila le v enem najdena in določena vrsta *Norigondolella steinbergensis* (Mosher, 1968), ki potrjuje norijsko-retijsko starost baškega dolomita (KOLAR, 1979; KOLAR-JURKOVŠEK, 1991; KOZUR, 2003; BUSER et al., 2007, 2008; ROŽIČ et al., 2009; KRYSSTYN et al., 2009; KOLAR-JURKOVŠEK, 2011).



Sl. 2. Geološka karta okolice opisanega kamnoloma (lega kamnoloma je označena z zvezdico)

Fig. 2. Geological map of the outcrop area (the position of the quarry is marked by the star symbol)

### Opis izdanka

Opuščen kamnolom se nahaja dva kilometra jugozahodno od Škofje Loke, ob cesti na Lubnik (Y: 5445175; X: 5112788; n.m.v. 426 m) (sl. 1). Pla-

sti baškega dolomita v splošnem vpadajo proti vzhodu pod kotom 30°. Težje dostopni deli kamnoloma so bili pregledani s pomočjo polstatične vrvi (tab. 1, sl. 1).

### Opis faciesov

V zahodnem delu kamnoloma kot najstarejše plasti izdajajo črni, bituminozni, vzporedno laminirani dolomikriti s črnimi roženci. Plasti dosega debeline 5 do 60 cm. Pogoste so kanalne teksture, zapolnjene z drobno do srednjezrnato dolomitizirano polimiktno brečo. V zgornjem delu zapolnitev kanalov so pogoste številne lupine brahiopodov (tab.1, sl. 2). Redke so obremenitvene teksture (tab. 1, sl. 3). Bituminozni dolomiti večkrat postopno preidejo v tanke- do srednje debele plasti svetlo sivega dolomikrosparita (tab. 1, sl. 4). Plastnatim dolomitom z erozijsko mejo sledi okoli 10 m debel paket dolomitiziranih, mestoma tudi okremenjenih konglomeratnih breč (gramozovcev; tab. 1, sl. 5). Breče so zrnsko ali muljasto podprte in polimiktne, vendar prvotna sestava klastov ni določljiva zaradi poznejše dolomitizacije (tab. 2, sl. 1). Makroskopsko lahko ločimo naslednje vrste klastov (tab. 2, sl. 2):

- Ekstraklasti:
  - temno siv roženec (premer do 2 cm); 1 %
  - svetlo rjav dolosparit (premer do 2 cm); 5 %
  - svetlo siv dolosparit (premer do preko 5 cm); 10 %
  - črn debelozrnat dolosparit (premer od 1 cm do preko 5 cm); 15-20 %
  - temno siv dolosparit (premer do preko 5 cm); 30 %
- Bioklasti:
  - prekristaljeni fragmenti lupin (ramenonožci, polži; velikost do 1,5 cm); 5-30 %
- Intraklasti:
  - črn dolomikrit (premer od nekaj cm do preko 5 cm); 5-10 %.

Klasti so veliki do 15 cm, večina pa meri v premeru en centimeter. Njihovi robovi so ostri ali dobro zaobljeni, pred odložitvijo litificirani ali preloženi še v mehkem stanju (vtisnjenje sosednjih klastov). Redko so prisotni bioklasti (polži, ramenonožci). Vezivo je črn do temno siv dolomikrit, redko svetlo siv dolomikrosparit.

Nad brečami so z ostro mejo odložene plasti vzporedno laminiranega dolosparita z roženci. Posamezne plasti so debele 5 do 20 cm in ločene z nekaj centimetrov debelimi horizonti laporovca. Gomolji roženca so črni ali rožnati, premera do 0,5 m. Paket je v zahodnem delu kamnoloma debel 1,5 m in zapolnjuje razliko v paleoreliefu glede na osrednji in vzhodni del kamnoloma, kjer je razvitih le zgornjih 0,5 m zaporedja. Zaključni ga skoraj 40 cm debela morfološko izrazitejša plast dolomitiziranega kalkarenita oz. drobnozrnatega kalkrudita z notranjimi erozijskimi površinami.



Nad to plastjo ponovno sledi menjavanje tankoplastnatih laporastih dolomikrospartov in laporovcev. Paket je v zahodnem in osrednjem delu kamnoloma tokrat tanjši (1,5 m) kot v vzhodnem delu (3,0 m). V zgornjem delu paketa je sledljiv horizont z gomolji belega roženca.

Zaporedje, ki izdanja v kamnolomu se zaključí z masivnim dolospartom z ravno spodnjo mejo.

### Opis prelomov

V kamnolomu je vidnih vsaj pet prelomov, ki so na sliki 3.3 označeni s številkami od 1 do 5:

- *Prelom 1* izdanja na zahodni strani kamnoloma. Spodnji del preloma sega pod nivo kamnoloma, zgoraj pa sega do masivnega dolomita. Vpad prelomne ploskve je v spodnjem delu 170/85. Kamnina ob prelomu ni pretrta, ali pa je rahlo sklivažirana (tab. 2, sl. 3 in 4; vpad klivaža 330/70). Levo in desno krilo preloma sta v tesnem stiku. Navidezni premik v steni kamnoloma vzdolž preloma ni enoten: glede na zgornjo mejo muljasto podprtih breč je v srednjem delu kamnoloma zahodno (krovninsko) krilo navidezno spuščeno glede na vzhodno (talninsko) za 1,2 m; nasprotno je plast z belimi roženci ob zgornji meji preloma navidezno premaknjena za 0,5 m in je višje v zahodnem krilu.
- *Prelom 2* poteka prek sredine kamnoloma. Spodnji del ni razgaljen. Premik ob prelomu je sledljiv do plasti z belim rožencem (ta že ni več premaknjena), slab meter pod spodnjo mejo masivnega dolomita (tab. 2, sl. 6). Prelomna ploskev ima ob vznožju kamnoloma vpad 290/90. Kamnina ob prelomu ni pretrta ali pa je izražen šibek klivaž. Zahodno in vzhodno krilo sta v tesnem stiku. Glede na zgornji del breč znaša navidezni premik ob prelomu 1,5 m, pri čemer je vzhodno krilo relativno spuščeno glede na zahodnega.
- *Prelom 3* je viden v vzhodni polovici kamnoloma. Zgornji del preloma je pokrit, spodaj pa se naslanja na prelom 2 (tab. 2, sl. 4). Prelomna ploskev je položnejša, z vpadom 350/60. Kamnina ob prelomu ni pretrta. Krovninsko in talninsko krilo sta ločena z do nekaj centimetrov debelim slojem črnega dololutita. Zgornja meja muljasto podprtih breč je na zgornji strani preloma navidezno premaknjena za 0,5 m, pri čemer je nižje na zahodni strani (krovninsko krilo).
- *Prelom 4* je manjši prelom v zahodnem delu kamnoloma. Spodaj se priključuje na prelom 1. Zgornji del preloma ni razgaljen (tab. 2, sl. 5). Splošni vpad preloma je proti vzhodu. Zgornja meja breč je v vzhodnem, krovninskem krilu nekaj 10 cm nižje kot v zahodnem. Kamnina ob prelomu ni vidno pretrta.
- *Prelom 5* povezuje preloma 1 in 2 in poteka prek muljasto podprtih breč. Prelomna ploskev vpada proti vzhodu pod okoli 60°. Prelomna cona ni izražena.

## Razprava

### Starost prelomov

Ob odsotnosti pokazateljev smeri premikov, opazovane navidezne premike ob prelomih interpretiramo kot premike ob normalnih prelomih. Zveznost plasti v zgornjem delu kamnoloma kaže na prenehanje tektonske aktivnosti pred njihovo odložitvijo (glej COZZI, 2000; KEIM & BRANDNER, 2001; MARTIN-ROJAS et al., 2011). Prelome 1-5 zato interpretiramo kot paleoprelome, ki so bili aktivni v času sedimentacije, na kar kažejo neenakomerne debeline sedimentov (BERTOTTI et al., 1993), ki zapolnjujejo nastali relief (tj. ploščastih dolomitov z vmesnim laporovcem nad brečami in nad plastjo dolomitiziranega kalkarenita). Glede na konodontne najdbe, so bili prelomi aktivni v noriju in/ali v retiju. Toga deformacija odloženih plasti ob prelomih predvideva vsaj delno litifikacijo sedimentov kmalu po odložitvi sedimenta. O krhki deformaciji kamnine ob sinsedimentnih prelomih poroča tudi COZZI (2000).

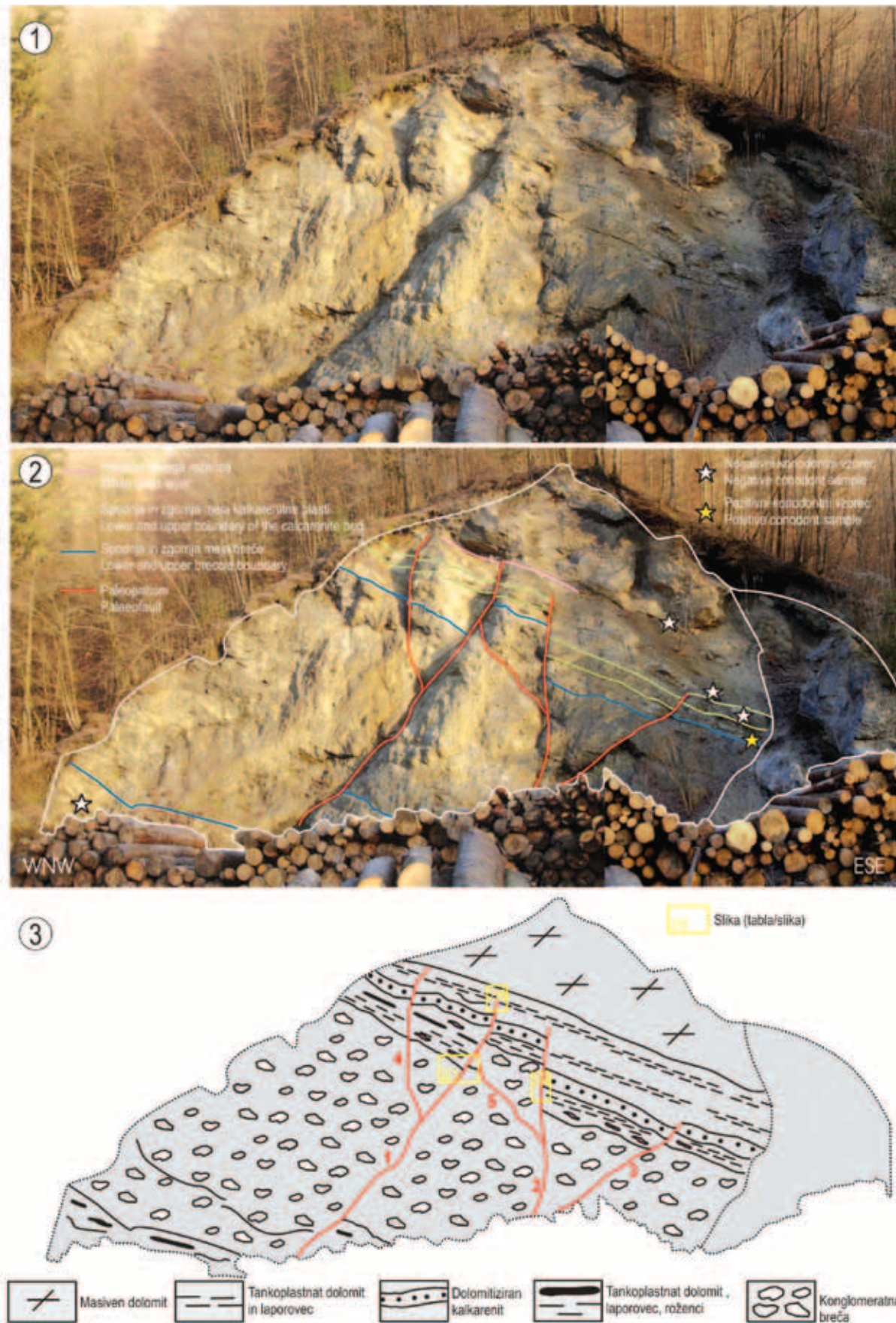
Šibko razvit klivaž ob nekaterih odsekih prelomov povezujemo s pliocensko ali mlajšo tektoniko, ko so bile obstoječe strukture reaktivirane kot zmične (L. Placer, os. kom.).

### Interpretacija premikov

Slika 4 prikazuje predvideno zaporedje sedimentacije in tektonske aktivnosti v noriju in/ali retiju:

- *Faza 1: Odlaganje muljasto podprtih konglomeratnih breč*  
Raznolika sestava klastov, ki so mestoma tudi dobro zaobljeni, kaže na preperevanje starejših kamnin dvignjenih blokov in njihov transport. Del klastov je bil preložen še v mehkem ali delno litificiranem stanju in je znotraj-bazenskega izvora. Sestava breč tako posredno kaže na obstoj prelomov, ki so starejši od prelomov 1-5 (glej COZZI & PODDA, 1998).
- *Faza 2: Spuščanje zahodnega bloka ob prelomu 1*  
Spuščanje zahodnega bloka ob strmem normalnem prelomu je spremljalo odlaganje tankoplastnatih dolomitov in podrejeno laporovcev nad spuščajočim blokom. Po zapolnitvi prostora nad spuščanim blokom se je nadaljevalo odlaganje plastnatih dolomitov in laporovcev, ki se zaključí z debelejšo plastjo dolomita (prvotno verjetno kalkarenit z notranjimi erozijskimi površinami).
- *Faza 3: Spuščanje vzhodnega bloka ob prelomu 2*  
Po odložitvi kalkarenita je prišlo do nastanka reliefa ob prelomu 2. Prostor nad pogreznjenim vzhodnim blokom so zapolnili tankoplastnati dolomiti in laporovci. Sedimentacija se je nadaljevala tudi po prenehanju premikov ob prelomu 2. Zaporedje po-tektonskih sedimentov vključuje sledljivo plast z belimi roženci.





Sl. 3. Slika izdanka. 1 – fotografija kamnoloma; 2, 3 – obris glavnih tektonskih struktur in slednih horizontov; 2 – Z zvezdicami so označene lege vzorcev, vzetih za konodontne analize. Vrsta *Norigondolella steinbergensis* je bila najdena v vzorcu, katerega lega je označena z rumeno zvezdico. 3 – Lega nekaterih ključnih slik s table 2 je prikazan z rumenim okvirjem.

Fig. 3. Picture of the outcrop. 1 – photograph of the quarry; 2, 3 – outlines of the major tectonic structures and marker levels; 2 – Z zvezdicami so označene lege vzorcev, vzetih za konodontne analize. *Norigondolella steinbergensis* was found in the sample marked with the yellow star. 3 – Positions of some key photos from plate 2 are shown with yellow rectangles.

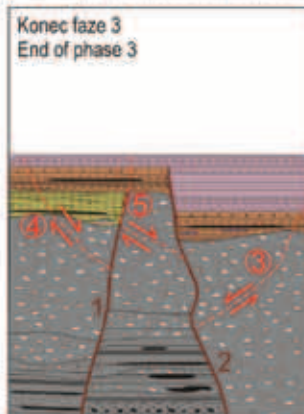




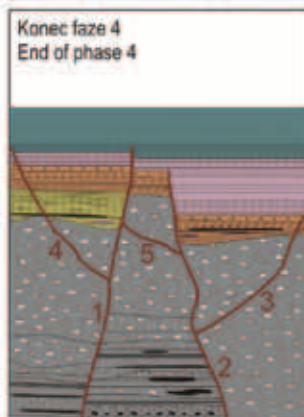
Odlaganje bituminoznega dolomita, kanaliziranih dolomitov in muljasto ali zmsko podprtih konglomeratnih breč.  
Deposition of bituminous dolostone, channelized dolomite and mud- or clast-supported conglomeratic breccias.



Spuščanje zahodnega krila ob prelomu 1, sintektonska sedimentacija v nastajajočem prostoru. Po prenehanju tektonske aktivnosti se odloži debelejša plast kalkarenita.  
Down-dropping of the western block along fault 1; syntectonic sedimentation takes place in the creating accommodation space. The cessation of the tectonic activity is marked by a uniformly developed thicker layer of calcarenite.



Spuščanje vzhodnega krila ob prelomu 2; v nastajajočem prostoru se hkrati odlagajo sedimenti. Sedimentacija se nadaljuje še po prenehanju spuščanja krila. Zaporedje po-tektonskih sedimentov vključuje plast s slednim markerkim horizontom belih rožencev.  
Down-dropping of the eastern block along fault 2; syntectonic sedimentation takes place in the creating accommodation space. Sedimentation continues also after cessation of the tectonic activity. Post-tectonic sediments include the marker layer with nodules of white chert.



Nova diferenciacija sedimentacijskega prostora ob obstoječih (1, 2) in novonastalih (3, 4, 5) prelomih. Premik ob prelomu 1 je podaljšan še preko plasti z belim rožencem. Premik se prenaša na prelom 2 preko veznega preloma 4, tako da je spodnji del preloma 1 verjetno neaktiven. Po prenehanju tektonske aktivnosti se odloži neprekinjena masivna plast dolomita.  
New differentiation of the sedimentary space takes place along the existing (1, 2) and newly created (3, 4, 5) faults. The displacement is transferred along fault 4 to the fault 2, so the lower (older) plane of the fault 1 probably remained inactive. The massive dolostone bed accumulated after the cessation of tectonic activity.

### Legenda - legend

Premik Displacement	Bituminozni dolomit, konglomeratna breča Bituminous dolostone, conglomeratic breccia	Tankoplastnat dolomit, laporovec Thin-bedded dolostone, marlstone
Prelom aktiven v naslednji fazi Fault active in the next phase	Tankoplastnat dolomit z roženci, laporovec Thin-bedded dolostone with chert, marlstone	Tanko-plastnat dolomit, masiven dolomit Thin-bedded dolostone, massive dolostone
Prelom, ki je bil aktiven v trenutni fazi Fault that was active in the current phase	Tankoplastnat dolomit z roženci, laporovec, debelejša plast kalkarenita Thin-bedded dolostone with chert, marlstone, thicker calcarenite bed	

Sl. 4. Interpretacija paleotektonskih premikov, ki so privedli do današnjih razmer.  
Fig. 4. Interpretation of tectonic movements leading to the current situation.

- *Faza 4: Spuščanje ob obstoječih in novonastalih prelomih 3, 4, 5*

V zadnji fazi je prišlo do delne reaktivacije prelomov 1 in 2, ter do nastanka prelomov 3, 4 in 5. Premiki ob posameznih prelomih so v tej fazi manjši. Premik plasti z belimi roženci nad prelomom 1 kaže na delno reaktivacijo starejše strukture ob hkratnem nastanku normalnega preloma 4. Po prenehanju tektonske aktivnosti se je odložila masivna dolomitna plast.

### **Norijsko-retijska ekstenzija v Slovenskem bazenu**

Vzrok za nastanek paleoprelomov v baškem dolomitu je verjetno natezna tektonika. Odkritje norijsko-retijskih prelomov v kamnolomu pri Podpulfrci potrjuje nedavne ugotovitve o tektoniki v Slovenskem bazenu (Rožič et al., 2009; GALE et al., 2012). GALE s sodelavci (2012) so s pomočjo analize več profilov baškega dolomita in Slatniške formacije pokazali obstoj več tektonskih faz v tem obdobju. Prvi dve, tj. zgodnje- in sredjenorijska, sta imeli širši obseg in ju je moč zaznati v celotnem območju bazena. Nasprotno je bila retijska ekstenzija omejena na posamezne dele bazena in verjetno obsega več krajših tektonskih sunkov (GALE et al., 2012).

Ob postavitvi plasti v horizontalno lego s pomočjo Wulfove mreže dobimo prvotne vpade prelomov: 182/78 (prelom 1), 65/70 (prelom 2), 285/70 (prelom 3).

Smeri prelomov so primerljive z norijskimi prelomi v Karnijskem predgorju (CARULLI et al., 1998; COZZI & PODDA, 1998; COZZI, 2000, 2002). COZZI (2000, 2002) začetek odpiranja s prelomi omejenih intraplatformnih bazenov znotraj karbonatne platforme postavlja na konec srednjega norija. Na podlagi sinsedimentnih pokazateljev tenzije (razpoke, neptunski dajki, normalni prelomi z manjšimi premiki, intraformacijske breče) je določil glavne smeri prelomov E-W, N-S in NE-SW, pri čemer prvi dve smeri prevladujeta v severnem delu raziskovanega ozemlja, v notranjosti platforme, slednja pa v SE delu, tj. na robu platforme, ki meji na intraplatformni bazen (COZZI, 2000, 2002). Prelome z usmerjenostjo E-W povezuje z napredovanjem Neotetide (Hallstatt-Meliata oceana), prelome v smeri N-S pa s poznotriasnim-zgodnjejurjskim raztezanjem, ki je povzročilo odprtje Ligurijsko-Piemontskega oceana in Osrednjega Atlantika v srednji juri. Za skupino struktur, orientirano v smeri NE-SW predvideva, da so podedovane, reaktivirane permsko-triasne (predvsem srednjetriasne) strukture (COZZI, 2000). Tektonska aktivnost se je nadaljevala še tekom celotnega retija (COZZI, 2002; COZZI & HARDIE, 2003). CARULLI et al. (1998) so domnevali, da obstaja povezava teh prelomov z W-E potekajočimi desno zmičnimi prelomnimi conami, znotraj katerih so se odpirali intraplatformni bazeni.

BERRA (1995) je prelome v smeri E-W ali ESE-WNW dokumentiral v norijskih plasteh v Severnih Apeniških Alpah.

Slovenskemu bazenu najbližje študije usmerjenosti paleoprelomov sta opravila MLAKAR in ČAR (2009) na idrijsko-cerkljanskem ozemlju. Nekaj deset- do več stometrski vertikalni premiki ob prelomih, ki so bili najbolj aktivni v srednjem triasu, so postopno zamrli do sredine karnija. Današnja usmerjenost teh prelomov je E-W do SE-NW, vezni prelomi pa se raztezajo v smeri N-S (ČAR, 2010).

### **Zaključki**

Paleoprelomi v baškem dolomitu v kamnolomu pri Podpulfrci predstavljajo prvi dokumentirani neposredni dokaz za norijsko-retijsko ekstenzijo v Slovenskem bazenu. BERTOTTI s sodelavci (1993), CARULLI s sodelavci (1998), STAMPFLI in MOSAR (1999) in CIARAPICA (2007) natezno tektoniko zahodno od Slovenskega bazena obravnavajo kot prve znake odpiranja Piemont-Ligurijskega oceana. COZZI (2000, 2002) dodatne vzroke za nastanek natezних struktur v Karnijskem predgorju išče v pojemajočem širjenju Neotetide na vzhodu. Hkraten vpliv razpiranja na obeh oceanskih območjih so zabeležili tudi HAAS in BUDAI (1999) in HAAS (2002) v Transdanubijskem pogorju. Glede na paleogeografsko lego Slovenskega bazena vzhodno od Karnijskega predgorja, tj. bližje Neotetidi (glej npr. HAAS et al., 1995), lahko tudi pri nas poznotriasno tektonsko aktivnost pripišemo sočasni aktivnosti na območju obeh oceanov.

## **Outcrop-scale evidence for the Norian-Rhaetian extensional tectonics in the Slovenian Basin (Southern Alps)**

### **Extended Summary**

No direct evidence for the Norian-Rhaetian tectonic activity has been gathered from the Slovenian territory until now. In this paper, we give an example of the quarry from the vicinity of Škofja Loka, where several palaeofaults transect the outcropping Bača Dolomite. The fault planes extend in W-E, NW-SE and NNE-SSW directions. The Norian-Rhaetian age of the Bača Dolomite is confirmed with the finding of the conodont species *Norigondolella steinbergensis* (Mosher, 1968).

The sedimentary succession starts with highly bituminous bedded dolostone with scour structures and several meters of mud-supported dolobreccias. Breccias were downthrown for 1.2 m along a normal fault. The created accommodation space was simultaneously filled with thin-bedded dolostone with marlstone interlayers. Sedimentation of thin-bedded dolostone continued even after the complete leveling of topography. After deposition of a thicker, marker bed of calcarenite/fine-grained calcirudite with internal scour structures, another differentiation of the basin floor is marked by the formation of the second normal fault, along which the hanging-wall dropped for 1.5 m. Created space above the down-dropped block was again filled by thin-bedded dolosto-



ne with marlstone interlayers. During the third pulse of extensional tectonics, several smaller faults originated and the already existing ones were partly reactivated. The final cessation of tectonics is marked by the uniform deposition of a massive dolostone bed with undisturbed lower boundary. The formation of the faults is related to the opening of the future Jurassic Piemont-Ligurian Ocean to the west of the studied area, or with the diminishing influence of the Neotethys (Meliata) Ocean to the east.

### Zahvala

Avtorji članka se zahvaljujemo dr. Ladislavu Placerju, dr. Jožetu Čarju, dr. Bogomirju Celarcu in doc. dr. Dragomir Skabernetu za natančen pregled članka, konstruktivne predloge k njegovemu izboljšanju in razpravo med samo pripravo besedila. Laboratorijsko delo je bilo opravljeno v prostorih Geološkega zavoda Slovenije in Naravoslovnotehniške fakultete (Oddelek za geologijo), tudi ob pomoči tehničnih sodelavcev, katerim velja posebna zahvala. Finančno je raziskava podprta s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (programski skupini P1-0011 in Z1-9759).

### Literatura

- BERRA, F. 1995: Stratigraphic evolution of a Norian intraplate basin recorded in the Quaternary Nappe (Austroalpine, Northern Italy) and paleogeographic implications. *Eclologiae Geol. Helv.*, 88/3: 501-528.
- BERTOTTI, G., PICOTTI, V., BERNOULLI, D. & CASTELLARIN, A. 1993: From rifting to drifting: tectonic evolution of the South-Alpine upper crust from the Triassic to the Early Cretaceous. *Sed. Geol.*, 86/1-2: 53-76, doi:10.1016/0037-0738(93)90133-P.
- BUSER, S. 1979: Triassic beds in Slovenia. In: DROBNE, K. (ed.): 16<sup>th</sup> European micropaleontological colloquium, Zagreb – Bled, Yugoslavia, 8<sup>th</sup>-16<sup>th</sup> September 1979. Croatian Geological Society & Slovenian Geological Society, Ljubljana: 17-25.
- BUSER, S. 1986: Tolmač listov Tolmin in Videm (Udine): L 33-64, L 33-63. *Zvezni geološki zavod, Beograd*: 103 p.
- BUSER, S. 1989: Development of the Dinaric and the Julian carbonate platforms and of the intermediate Slovenian Basin (NW Yugoslavia). *Boll. Soc. Geol. It.*, 40: 313-320.
- BUSER, S. 1996: Geology of Western Slovenia and its paleogeographic evolution. In: DROBNE, K., GORIČAN, Š. & KOTNIK, B. (eds.): International workshop Postojna '96: The role of impact processes and biological evolution of planet Earth, Ljubljana: 111-123.
- BUSER, S., KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JURKOVŠEK, B. 2007: Triasni konodonti Slovenskega bazena. *Geologija*, 50/1: 19-28, doi:10.5474/geologija.2007.002.
- BUSER, S., KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JURKOVŠEK, B. 2008: The Slovenian Basin during the Triassic in the light of conodont data. *Boll. Soc. Geol. It.*, 127/2: 257-263.
- CARULLI, G. B., COZZI, A., LONGO SALVADOR, G., PONTON, M., PODDA, F. 1998: Evidence of synsedimentary tectonic activity during the Norian-Lias (Carnian Prealps, Northern Italy). *Mem. Soc. Geol. It.*, 53: 403-415.
- CELARC, B. & GORIČAN, Š. 2007: Diferenciran razpad anizijske (ilirske) karbonatne platforme v Julijskih Alpah (Prisojnik) in Kamniško-Savinjskih Alpah (Križevnik). *Geol. zbornik*, 18: 11-15.
- CELARC, B. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 2008: The Carnian-Norian basin-platform system of the Martuljek Mountain Group (Julian Alps, Slovenia): progradation of the Dachstein carbonate platform. *Geol. Carpathica*, 59/3: 211-224.
- CELARC, B. & OGORELEC, B. 2006: Progradacija karnijsko-norijske karbonatne platforme v Martuljkovi skupini. V: REŽUN, B. et al. (ur.): Zbornik povzetkov, 2. Slovenski geološki kongres, Idrija, 26.-28. 9. 2006. Rudnik živega srebra v zapiranju, Idrija: 42-43.
- CIARAPICA, G. 2007: Regional and global changes around the Triassic-Jurassic boundary reflected in the late Norian-Hettangian history of the Apennine basins. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 244/1-4: 34-51, doi:10.1016/j.palaeo.2006.06.022.
- COZZI, A. 2000: Synsedimentary tensional features in Upper Triassic shallow-water platform carbonates of the Carnian Prealps (northern Italy) and their importance as palaeostress indicators. *Basin Res.*, 12/2: 133-146, doi:10.1046/j.1365-2117.2000.00117.x.
- COZZI, A. 2002: Facies patterns of a tectonically-controlled Upper Triassic platform-slope carbonate depositional system (Carnian Prealps, Northeastern Italy). *Facies*, 47/1: 151-178, doi:10.1007/BF02667711.

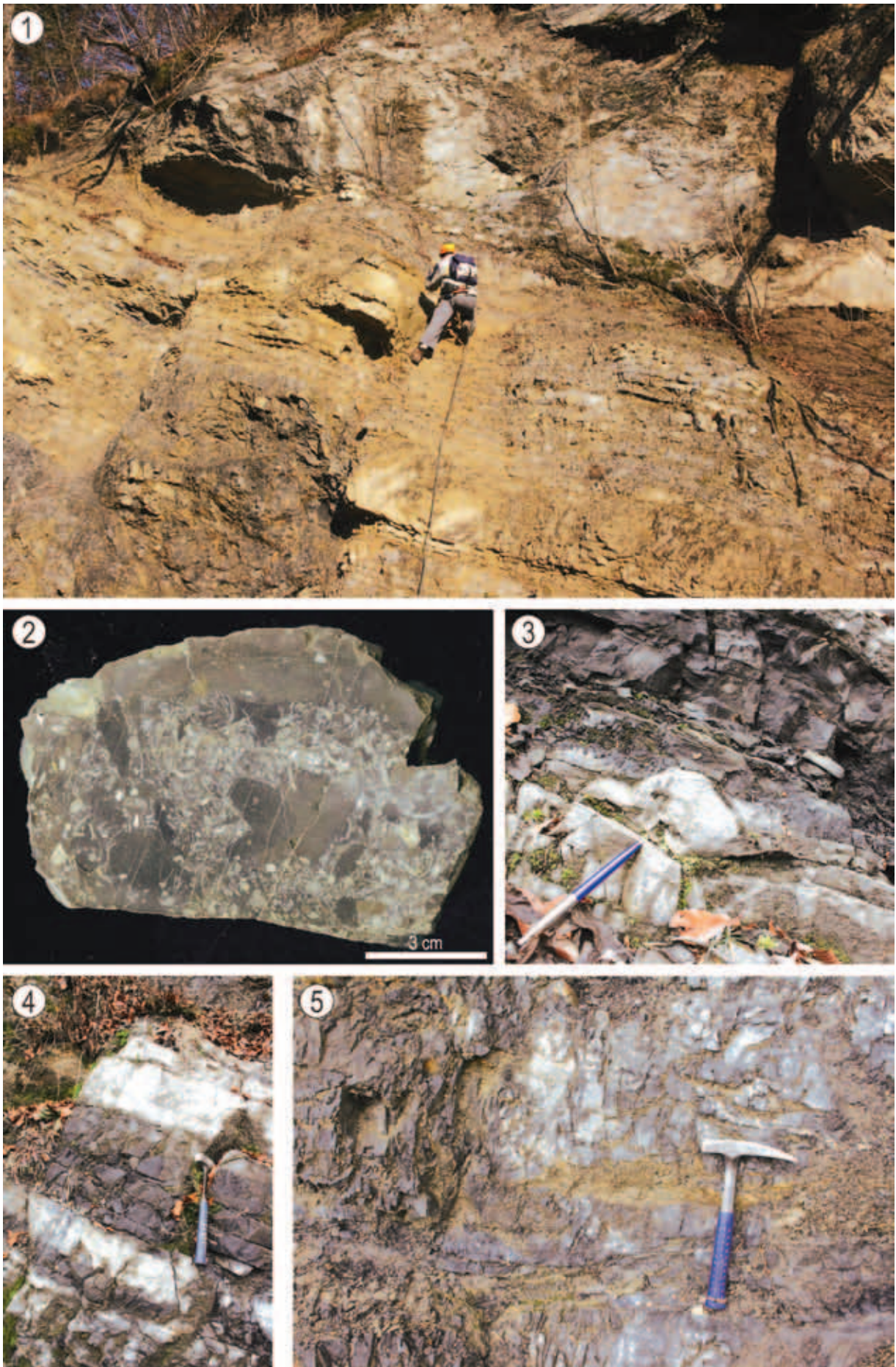
### TABLA 1 – PLATE 1

1 – Bližnja slika zgornjega dela kamnoloma; 2 – Nakopičenje brahiopodnih lupin v zgornjem delu zapolnitve kanala; 3 – Obremenitvena tekstura pod klastom (konica kemičnega svinčnika), padlim v tedaj še mehak sediment in izravnava nastalega reliefa s plastmi močno bituminoznega dolomita; 4 – Menjavanje črnih, močno bituminoznih dolomitov s plastmi svetlega dolomita (morda znamenje menjavanja obdobja omejene in dobre vodne cirkulacije); 5 – Dolomit s kanalnimi teksturami.

1 – Close-up photo of the upper part of the quarry; 2 – Concentration of brachiopod-shells in the upper part of the channel-fill; 3 – Load cast caused by the clast (at the point of the pen) falling in an un-lithified sediment; 4 – Interchanging of dark, bituminous dolostone with beds of light-gray dolostone (perhaps pointing at the interchange of times with restricted and open water circulation); 5 – Channel structures.



TABLA 1 – PLATE 1





- COZZI, A. & HARDIE, L. A. 2003: Third-order depositional sequences controlled by synsedimentary extensional tectonics: evidence from Upper Triassic carbonates of the Carnian Prealps (NE Italy). *Terra Nova*, 15/1: 40-45, doi:10.1046/j.1365-3121.2003.00461.x.
- COZZI, A. & PODDA, F. 1998: A platform to basin transition in the Dolomia principale of the M. Pramaggiore area, Carnia Prealps, northern Italy. *Mem. Soc. Geol. It.*, 53: 387-402.
- ČAR, J. 2010: Geološka zgradba idrijsko-cerkljanskega hribovja. Tolmač h Geološki karti idrijsko-cerkljanskega hribovja med Stopnikom in Rovtami 1 : 25 000. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 127 p.
- GALE, L. 2010: Microfacies analysis of the Upper Triassic (Norian) "Bača Dolomite": early evolution of the western Slovenian Basin (eastern Southern Alps, western Slovenia). *Geol. Carpathica*, 61: 293-308.
- GALE, L., ŠMUC, A., KOLAR-JURKOVŠEK, T., SKABERNE, D., CELARC, B., ČAR, J. & ROŽIČ, B. 2012: Norian-Rhaetian sedimentary evolution of the Slovenian Basin (eastern Southern Alps). *Geophys. Res. Abstracts (EGU General Assembly 2012)*, 14.
- GIANOLLA, P., DE ZANCHE, V. & ROGHI, G. 2003: An Upper Tuvalian (Triassic) platform-basin system in the Julian Alps: the start-up of the Dolomia Principale (Southern Alps, Italy). *Facies*, 49: 125-150, doi:10.1007/s10347-003-0029-7.
- GOLONKA, J. 2007: Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 244: 297-307, doi:10.1016/j.palaeo.2006.06.041.
- GRAD, K. & FERJANČIČ, L. 1974: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000, Kranj L 33-65. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- GRAD, K. & FERJANČIČ, L. 1976: Tolmač za list Kranj L 33-65. Zvezni geološki zavod, Beograd: 70 p.
- HAAS, J. 2002: Origin and evolution of Late Triassic backplatform and intraplateform basins in the Transdanubian Range, Hungary. *Geol. Carpathica*, 53/3: 159-178.
- HAAS, J. & BUDAI, T. 1999: Triassic sequence stratigraphy of the Transdanubian Range (Hungary). *Geol. Carpathica*, 50/6: 459-475.
- HAAS, J., KOVÁCS, S., KRYSSTYN, L. & LEIN, R. 1995: Significance of Late Permian-Triassic facies zones in terrane reconstructions in the Alpine-North Pannonian domain. *Tectonophysics*, 242: 19-40, doi:10.1016/0040-1951(94)00157-5.
- KASTELIC, V., VRABEC, M., CUNNINGHAM, D. & GOSAR, A. 2008: Neo-Alpine structural evolution and present-day tectonic activity of the eastern Southern Alps: The case of the Ravne Fault, NW Slovenia. *J. Struct. Geol.*, 30: 963-975.
- KEIM, L., BRANDNER, R. 2001: Facies interfingering and synsedimentary tectonics on late Ladinian-early Carnian carbonate platforms (Dolomites, Italy). *J. Earth Sci. (Geol. Rund.)*, 90: 813-830, doi:10.1007/s005310000192.
- KOLAR, T. 1979: Konodonti v škofjeloškem apnenecu na Šmarjetni gori. *Geologija*, 22/2: 309-325.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T. 1991: Mikrofavna srednjega in zgornjega triasa Slovenije in njen biostratigrafski pomen. *Geologija*, 33: 21-170.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T. 2011: Latest Triassic conodonts of the Slovenian Basin and some remarks on their evolution. *Geologija*, 54/1: 81-90, doi:10.5474/geologija.2011.006.
- KOZUR, H. 2003: Integrated ammonoid-, conodont and radiolarian zonation of the Triassic. *Hallesches Jahrb. Geowiss.*, 25: 49-79.
- KRYSSTYN, L., LEIN, R., SCHLAF, J. & BAUER, F. K. 1994: Über ein neues obertriadisch-jurassisches Intraplattformbecken in den Südkarawanken. *Jubiläumsschrift 20 Jahre Geologische Zusammenarbeit Österreich-Ungarn*, 2: 409-416.
- KRYSSTYN, L., MANDL, G. W. & SCHAUER, M. 2009: Growth and termination of the Upper Triassic platform margin of the Dachstein area (Northern Calcareous Alps, Austria). *Austrian J. Earth Sci.*, 102: 23-23.
- MARTIN-ROJAS, I., SOMMA, R., DELGADO, F., ESTÉVEZ, A., IANNACE, A. & ZAMPARELLI, V. 2011: The triassic platform of the Gador-Turon unit (Alpujarride complex, Betic Cordillera, southeast

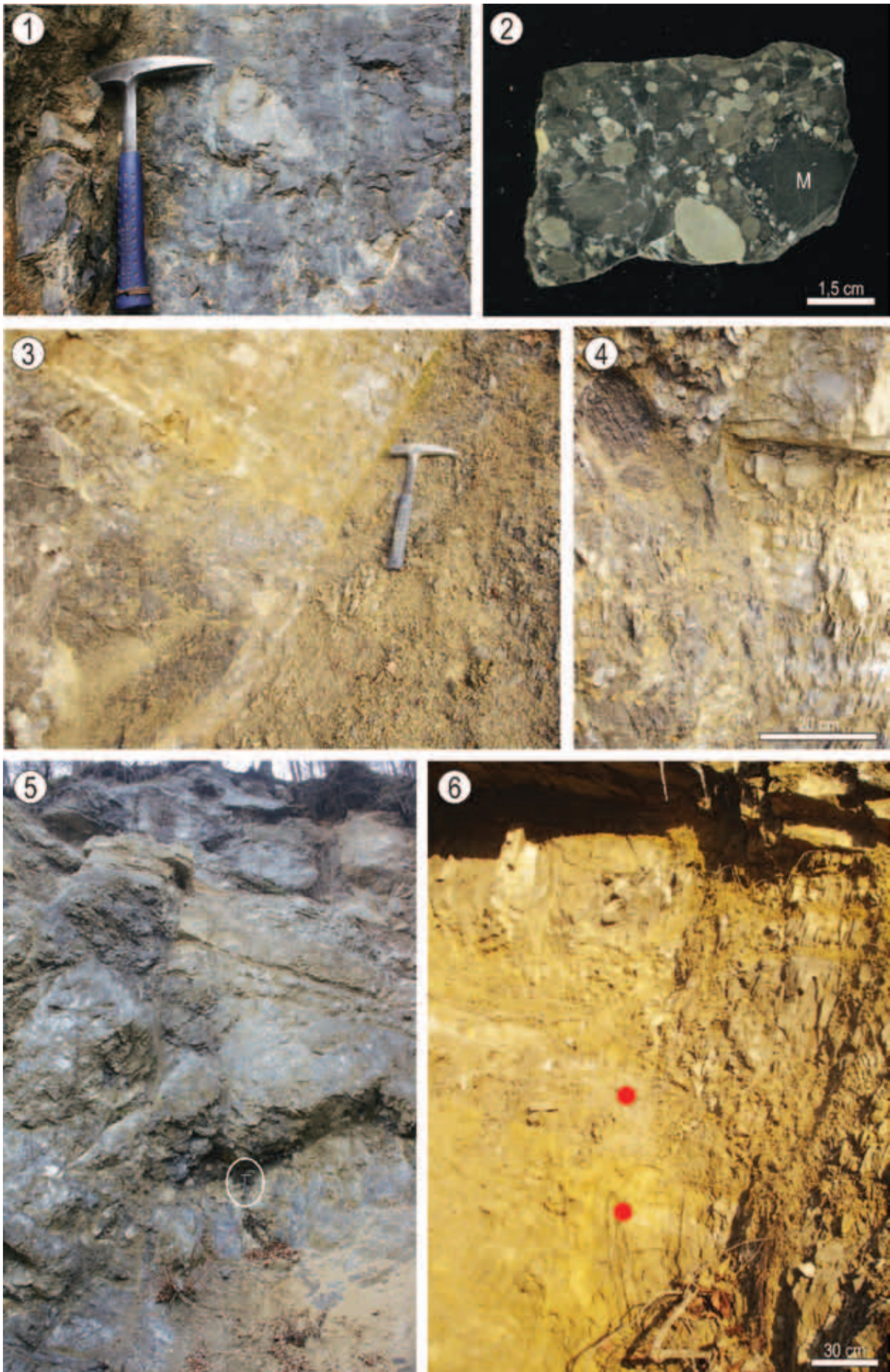
## TABLA 2 – PLATE 2

1 – Terenska fotografija klasta v breči; 2 – Odrezan in zbrusen kos zrnsko podprte breče. Vidna je različna sestava in zaobljenost klastov. V dolomikritni klast na desni (M) so vtisnjena druga zrna, kar kaže na preložitev klasta v še mehkejšem stanju (plastiklast); 3 – Prelom 1. Geološka meja med brečami (spodaj) in tankoplastnatimi dolomiti (zgoraj) je na desni strani preloma premaknjena navzgor za 1,5 m, zato je tam vidna samo breča; 4 – Prelom 2. Na fotografiji so ob prelomu v stiku tankoplastnatih dolomitov in debela plast dolomitiziranega kalkarenita (desno) s stratigrafsko starejšimi brečami (levo); 5 – Fotografija vzhodne strani kamnoloma s prelomoma 2 in 3 (obkroženo kladiivo); 6 – Navidezni premik plasti s horizontom belega roženca (rdeči piki) v nadaljevanju preloma 1 pod masivno dolomitno plastjo. Premaknjene so tudi plasti med označeno plastjo in masivnim dolomitom, medtem ko spodnja meja slednjega ni prekinjena.

1 – Field photo of a clast in the breccia; 2 – Cut and polished slab of clast-supported breccia. Several different types and roundness of clasts are visible. Several smaller clasts are embedded in the micritic clast on the right-hand side of the photo (M), proving it was still un-lithified prior to transport; 3 – Fault no. 1. The geological boundary between the breccias (below) and thin-bedded dolostones (above), visible to the left of the fault, is 1.5 m higher on the right-hand side of the fault; 4 – Fault no. 2. The contact between thin-bedded dolostones and the thick bed of dolomitized calcarenite (on the right-hand side of the fault) and the stratigraphically older breccias (to the left of the fault) is visible on the photo; 5 – Photo of the eastern side of the quarry with faults no. 2 and 3 (circled geological hammer); 6 – Displacement of the bed with the level of white chert (red dots) in the extension of fault no. 1 below the massive dolomite bed. Note that beds between the marked and the massive bed are displaced as well, while the lower boundary of the massive bed continuously covers the fault.



TABLA 2 – PLATE 2



- Spain): climate versus tectonic factors controlling platform architecture. *Facies*, 58/2: 297-323, doi:10.1007/s10347-011-0275-z.
- MLAKAR, I. & ČAR, J. 2009: Geološka karta idrijsko-cerkljanskega hribovja med Stopnikom in Rovtami 1:25.000. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- MLAKAR, I. & DROVENIK, M. 1971: Strukturne in genetske posebnosti idrijskega rudišča. *Geologija*, 14: 67-126.
- OGORELEC, B. & ROTHE, P. 1993: Mikrofazies, Diagenese und Geochemie des Dachsteinkalkes und Hauptdolomits in Süd-West-Slowenien. *Geologija*, 35: 81-181.
- SCHMID, S. M., BERNOULLI, D., FÜGENSCHUH, B., MATEMCO, L., SCHEFER, S., SCHUSTER, R., TISCHLER, M. & USTASZEWSKI, K. 2008: The Alpine-Carpathian-Dinaric orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss J. Geosci.*, 101: 139-183, doi:10.1007/s00015-008-1247-3.
- PLACER, L. 1999: Contribution to the macro-tectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. *Geologija*, 41: 223-255, doi:10.5474/geologija.1998.013.
- PLACER, L. 2008: Principles of the tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija*, 51/2: 205-217, doi:10.5474/geologija.2008.021.
- ROŽIČ, B. 2006: Stratigrafija, sedimentologija in geokemija jurskih plasti zahodnega dela Slovenskega jarka, Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Ljubljana: 149 p.
- ROŽIČ, B. 2009: Perbla and Tolmin formations: revised Toarcian to Tithonian stratigraphy of the Tolmin Basin (NW Slovenia) and regional correlations. *Bull. Soc. Geol. France*, 180/5: 409-423, doi:10.2113/gssgfbull.180.5.411.
- ROŽIČ, B., KOLAR-JURKOVŠEK, T. & ŠMUC, A. 2009: Late Triassic sedimentary evolution of Slovenian Basin (eastern Southern Alps): description and correlation of the Slatnik Formation. *Facies*, 55/1: 137-155, doi:10.1007/s10347-008-0164-2.
- SCHLAF, J., LEIN, R. & KRYSSTYN, L. 1997: Sequence stratigraphy of Upper Triassic carbonate platform margins in the Julian Alps (Slovenia) – an example for tectonic control on the development of systems tracts. *Gaea Heidelberg*, 3: 303-304.
- STAMPFLI, G. M. & BOREL, G. D. 2004: The TRANSMED transects in space and time: Constraints on the paleotectonic evolution of the Mediterranean Domain. In: CAVAZZA, W. et al. (eds.): The TRANSMED atlas, the Mediterranean region from crust to mantle. Springer-Verlag: 53-90.
- STAMPFLI, G. M. & KOZUR, H. W. 2006: Europe from the Variscan to Alpine cycles. In: GEE, D. G. & STEPHENSON, R. A. (eds.): *European Lithosphere Dynamics*. *Geol. Soc. Mem.*, 32, 57-82.
- STAMPFLI, G. M. & MOSAR, J. 1999: The making and becoming of Apulia. *Mem. Sci. Geol.*, 51/1: 141-154.
- ŠMUC, A. & ČAR, J. 2002: Upper Ladinian to Lower Carnian sedimentary evolution in the Idrija-Cerkno region, western Slovenia. *Facies*, 46: 205-216, doi:10.1007/BF02668081.
- ŠMUC, A. & ROŽIČ, B. 2009: Tectonic geomorphology of the Triglav Lakes Valley (easternmost Southern Alps, NW Slovenia). *Geomorphology*, 103/4: 597-604, doi: 10.1016/j.geomorph.2008.08.005.
- TARI, V. 2002: Evolution of the northern and western Dinarides: a tectonostratigraphic approach. *EGU Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. (European Geosci. Union)*, 1: 223-236.
- VLAHOVIĆ, I., TIŠLJAR, J., VELIĆ, I. & MATIČEC, D. 2005: Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 220: 333-360, doi:10.1016/j.palaeo.2005.01.011.
- VRABEC, M. & FODOR, L. 2006: Late Cenozoic tectonics of Slovenia: structural styles at the Northeastern corner of the Adriatic microplate. In: PINTER, N. et al. (eds.): *The Adria microplate: GPS geodesy, tectonics and hazards*. *NATO Sci. Ser., IV, Earth and Environ. Sci.* 61: 151-168.



## Anelidi v miocenskem litotamnijskem apnencu iz Zgornje Pohance

### Annelids in the Miocene lithothamnion limestone from Zgornja Pohanca, Slovenia

Vasja MIKUŽ<sup>1</sup>, Andreja ŠKEDELJ - PETRIČ<sup>2</sup> & Miloš BARTOL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani – Oddelek za geologijo, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: vasja.mikuz@geo.ntf.uni-lj.si

<sup>2</sup>Zavod RS za varstvo narave, Območna enota Novo mesto, Adamičeva ulica 2, SI-8000 Novo mesto, Slovenija; e-mail: andreja.skedelj-petric@zrsvn.si

<sup>3</sup>Paleontološki inštitut Ivana Rakovca ZRC SAZU, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: mbartol@zrc-sazu.si

Prejeto / Received 15. 4. 2012; Sprejeto / Accepted 31. 5. 2012

**Ključne besede:** anelidi, poliheti, litotamnijski apnenec, srednji miocen – badenij, Centralna Paratetida, Zgornja Pohanca, Slovenija

**Key words:** Annelids, Polychaetes, lithothamnion limestone, Middle Miocene – Badenian, Central Paratethys, Zgornja Pohanca, Slovenia

#### Izvleček

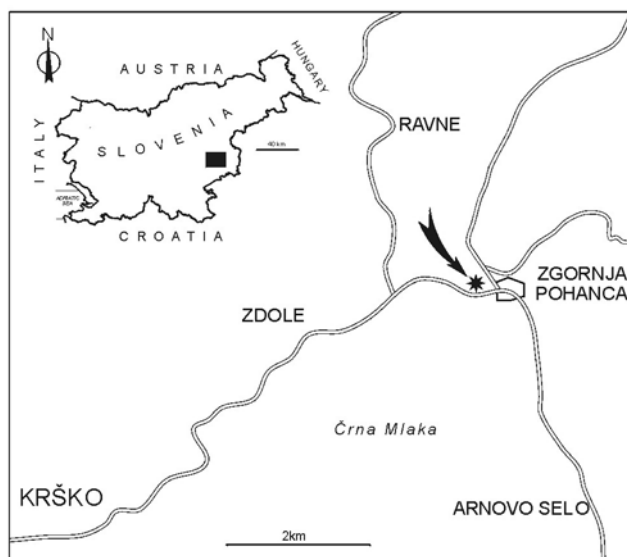
V prispevku so predstavljeni ostanki srednjemiocenskih – badenijskih anelidov v kosih apnenca iz Zgornje Pohance pri Krškem. Apnenci sestojijo predvsem iz cevasto-paličastih anelidov in litotamnij. Segmentirane apnenčeve cevke so večinoma fragmentirane in zapolnjene s kalcitom. Njihove morfološke in velikostne značilnosti so primerljive s poliheti iz družine Serpulidae. Cevasti ostanki lahko pripadajo rodovom *Protula*, *Hydroides* ali *Vermiliopsis*?

#### Abstract

Presented and discussed are remains of Middle Miocene – Badenian annelids in limestone fragments that consist mostly of tubular-rodlike annelids and lithothamnions. Segmented limestone tubules are largely fragmented and filled with calcite. By their morphology and size they are comparable to polychaetes of the Serpulidae family. Tubular remains could be attributed to genera *Protula*, *Hydroides* or *Vermiliopsis*? The samples of annelidic limestone with polychaetes were found in environs of Zgornja Pohanca near Krško in eastern part of central Slovenia.

#### Uvod

Vasica Zgornja Pohanca, ki leži blizu Krškega, doslej ni bila poznana po nobenih paleontoloških zanimivostih ali posebnostih, dokler me ni geologinja Andreja Škedelj-Petrič iz Zavoda RS za varstvo narave, Območna enota Novo mesto, 21. aprila 2011 po e-pošti obvestila o najdbi zanimive kamnine, sestojeeče iz samih cevastih skeletov iz okolice omenjenega zaselka. Zgornja Pohanca leži dobre 3 km severovzhodno od Krškega na nadmorski višini 220 m (sl. 1). 26. maja 2011 mi je soavtorica tega prispevka prinesla štiri kose kamnine z omenjenimi cevastimi organizmi. Izkazalo se je, da cevasti ostanki niso skafopodni temveč anelidni. Predstavljeni kosi s poliheti so bili najdeni pri terenskem ogledu 11. novembra 2010. Znova smo obiskali najdišče 29. julija 2011 in našli še nekaj kosov anelidnega apnenca ali anelidolita, ki so najdeni samo na začetku na novo odkopane brežine v litotamnijski apnenec (sl. 2). Pregledali smo še celoten usek v preostalo brežino, v kateri pa nismo našli nobenih ostankov omenjene kamnine.



Sl. 1. Geografski položaj najdišča miocenskih anelidov v Zgornji Pohanci blizu Krškega

Fig. 1. Geographical position of the site of Miocene annelids in Zgornja Pohanca near Krško





Sl. 2. Najdišče anelidnega apnenca v horizontu badenijskega litotamnjskega apnenca v Zgornji Pohanci

Fig. 2. A site of annelidic limestone in the horizon of the Badenian lithothamnion limestone in Zgornja Pohanca

Polihetov ni enostavno ločiti od drugih organizmov s podobnimi zunanji cevastimi skeleti, kot je to pri nekaterih polžih in skafopodih. Morfologija njihove zunanosti si je precej podobna in večkrat zabrisana. Zanesljive razlike vidimo šele v mikrostrukturi stene njihovih cevastih domovanj v prečnih in vzdolžnih presekih. Ustrezen recentni in fosilni primerjalni material nam lahko tudi veliko pomaga pri razločevanju fosilnih organizmov s cevastimi domovanji.

### Geološka zgradba okolice najdišča Zgornja Pohanca

ŠIKIĆ, BASCH in ŠIMUNIĆ (1978) so predstavili geološko zgradbo ozemlja, na katerem je najdišče miocenskih anelidov pri Zgornji Pohanci. V tektonskem smislu je najdišče deloma na južnih obronkih Posavskih gub in deloma v podaljšku hrvaškega Zágorskega terciarnega bazena oziroma na severnem obrobju Savske udorine. Samo najdišče je v pasu badenijskih organogenih in bioklastičnih apnencev, peščenjakov in apnenčevih ter glinenih laporovcev. Navzgor sledijo mlajše sarmatijske, panonijske in pontijske plasti. Pod miocenskimi skladi so najrazličnejše zgornjekredne in triasne kamnine. ŠIKIĆ in sodelavci (1979, 36) so pisali, da je znotraj miocenskih klastičnih sedimentnih kamnin morskega porekla veliko najrazličnejših makrofosilov. Med njimi so našli več badenijskih školjk, ne omenjajo pa nobenih ostankov anelidov oziroma polihetov. Najdišče Zgornja Pohanca ni omenjena v besedilu njihovih raziskav.

## Fosilni poliheti Slovenije

STACHE (1859, 318) je zapisal, da so v okolici Vremščice in Ilirske Bistrice našli cevaste ostanke poliheta rodu *Serpula*. RAMOVŠ (1974, 137) obravnava anelide oziroma kolobarnike, med katerimi omenja tudi polihete. Omenja samo rodova *Serpula* in *Spirorbis*. Iz slovenskih najdišč ne omenja nobenih polihetov. MIKUŽ in HORVAT (1998, 190, tab. 11-13 in tab. 19, sl. 1-2) poročata o rojih polihetov vrste *Polydora hoplura* (Claparède) iz družine Spionidae, ki so ohranjeni na površini in v notranjosti kamenih jeder leščurjev iz badenijskih plasti pri Dobruški vasi na Dolenjskem. Manjšo podobno sled poliheta rodu *Polydora* smo našli tudi na kamenem jedru školjke *Glossus humanus* iz srednjemiocenskih plasti blizu Šentilja v Slovenskih goricah (neobjavljeno). MIKUŽ in ČVOROVIĆ (2004, 123) poročata tudi o skromni najdbi serpulidnega mnogoščetinca iz eocenskih plasti pri Kuteževu. MIKUŽ (2008, 164) piše, da so eocenske serpulide pri nas našli na več različnih mestih, med drugim tudi na območju med Lokavcem in Brodom, severno od Ajdovščine v Vipavski dolini. PAVŠIĆ (2009, 304) v učbeniku tudi obravnava polihete in med sedentarnimi cevkarji iz družine Serpulidae omenja rodove *Spirorbis*, *Serpula* in *Rotularia*. Iz slovenskih miocenskih nahajališč jih ne omenja, predstavlja pa dve obliki iz eocena Slovenije, okrog 1 cm dolge cevke v flišnem peščenjaku pri Strunjanu in preseka istega primerka rodu *Spirorbis* iz najdišča Uhanje-Ključ. Po pregledu menimo, da slednja preseka ne pripadata rodu *Spirorbis*, temveč rodu *Rotularia*.

## Paleontološki del

Sistematika po: SCHMIDT 1955 in BALUK & RADWAŃSKI 1997

Phylum Annelida Lamarck, 1809  
Classis Polychaeta Grube, 1850  
Ordo Sedentarida Lamarck, 1818  
Familia Serpulidae Rafinesque, 1815

Znotraj družine Serpulidae najdemo pri primerkih iz Zgornje Pohance podobnosti z rodovnimi značilnostmi rodov *Protula* Risso (1826), *Hydroides* Gunnerus (1768) in *Vermiliopsis* Saint-Joseph (1894).

Gen. et sp. indet.

Tab. 1, 1a-1c; tab. 2, 1a-1c; tab. 3, 1, 3

**Material:** Ostanki anelidov so v štirih kosih apnenca, ki sestoji iz cevastih skeletov polihetov različnih dolžin in ohranjenosti. Ponekod so samo odtisi njihovih skeletov. Na prepereli površini nekaterih kosov so drobne luknjice (tab. 1, 1b-1c), ki sprva spominjajo na delovanje spužev, v resnici gre za izdolbene oziroma korozijsko poglobljene prečne preseke anelidnih cev. V prispevku predstavljene vzorce je 11. novembra 2010 našla geologinja Andreja Škedelj-Petrič. 29. julija 2011 sva

z dr. Milošem Bartolom znova obiskala in pregledala najdišče in našla še nekaj večjih in manjših kosov enakega anelidnega apnenca.

**Nahajališče:** Vzorci so iz useka v pobočju pod domačijo Pavličevih, na zahodnem delu Zgornje Pohance, kjer izdanja horizont badenijskega litotamnjskega apnenca (sl. 2). Primerki so bili najdeni samo na začetku takratne na novo usekane brežine.

**Opis:** Cevke približno enakih debelin so ravne do rahlo ukrivljene in različnih dolžin. Največje merijo v dolžino do 5 cm in več, njihov premer znaša od 1 do 2 mm. Cevke v prečnem preseku so okrogle do ovalne. V spodnjem ali starejšem delu so nekoliko ožje in bolj ukrivljene kot v mlajšem zgornjem delu. Površina cevastega kalcitnega skeleta je drobno segmentirana s koncentričnimi prirastnimi obroči (tab. 2, 1c), kar je ena izmed značilnosti polihetnih cevkv. V vzorcih litotamnjskega apnenca so zelo številni cevasti skeleti in njihovi odtisi, ki so večinoma usmerjeni ter ponekod bolj ali manj med seboj vzporedni (tab. 1, 1a; tab. 3, 1).

**Primerjava:** Poliheti iz Zgornje Pohance so po morfologiji primerljivi s primerki vrste *Protula canavarii* Rovereto, 1898 iz Italije in Avstrije, ki jih predstavljata ROVERETO (1898; 1904) in SCHMIDT (1955). ROVERETO (1898, 84–85, Tav. 7 (2), Figs. 4, 4a) in (1904, Tav. 2, Figs. 1a–1b) predstavlja protule omenjene vrste iz zgornjepliocenskih in pleistocenskih skladov Italije, kjer je ponekod zelo pogostna. Nadalje piše, da so njihove cevke dolge okrog 8 cm, v premeru pa merijo do 4 mm. SCHMIDT (1955, 34, Taf. 3, Figs. 4–5) predstavlja protule iz badenijskih plasti Dunajske kotline in navaja, da imajo cevke primerkov iz avstrijskih najdišč vrste *Protula canavarii* premer okrog 4 mm, dolge pa so lahko do 8 cm. Torej so italijanski pliocensko-pleistocenski in avstrijski badenijski poliheti širši in daljši od naših iz Zgornje Pohance. Mislimo, da velikost ni ključna primerjalna značilnost pri polihetih. Omenjeni avtorji prikazujejo le posamezne cevke vrste *Protula canavarii*, tako da ne vemo ali so te cevke izdvojene iz kolonijskih skupkov ali pa gre za prave solitarne oblike polihetov? Ostanke polihetov iz rodu *Protula* so našli tudi v srednjemiocenskih skladih južne Poljske (JAKUBOWSKI & MUSIAL 1979, 85).

Manjše podobnosti so tudi z vrsto *Hydroides pectinata* (Philippi) iz badenijskih in sarmatijskih plasti Avstrije (SCHMIDT 1955, 46, Taf. 4, Fig. 19) in s pliocensko vrsto *Protula firma* Seguenza, ki jo je ROVERETO (1901) preimenoval v *Protulophila gestroi* (Tav. 28 (1), Figs. 7a–7c). Možna je tudi primerjava z recentno vrsto *Hydroides uncinata* Philippi, ki jo opisuje ROVERETO (1898, 66, Tav. 6 (1), Fig. 10) in vrsto *Protula protensa* (Linné), ki jo prikazuje SCHULTZ (1998, 54–55, Taf. 20, Fig. 1) iz badenijskih plasti Avstrije.

Večje podobnosti lahko najdemo tudi z recentno vrsto *Vermiliopsis infundibulum* iz Jadranskega morja. Primerke omenjenega jadranskega

poliheta imamo shranjene v paleontološki zbirki Oddelka za geologijo (vzorec z inv. št. 6389, Tab. 3, 2a–2b). Ta vrsta ima prav tako cevke podobnih velikosti kot opisani miocenski poliheti iz Zgornje Pohance, s premerom od 1,5 do 2 mm. Tudi njihove stene cevkv so podobnih debelin, so drobno segmentirane in rastejo skupaj v številnih ravnih in ukrivljenih vzporedno potekajočih in dotikajočih se cevastih kolonijskih skupkih. ROVERETO (1898, 91) omenja v seznamu terciarnih in kvartarnih serpul tudi vrsto *Vermilia infundibulum* Philippi, ki je najdena v pliocenskih in pleistocenskih plasteh Italije. Rod *Vermilia* je danes najverjetneje sinonim rodu *Vermiliopsis*.

## Zaključki

Primerki apnenca z anelidnimi cevkami (tab. 1 in tab. 2; tab. 3, 1, 3) so najdeni v horizontu badenijskega litotamnjskega apnenca v useku brežine pod domačijo Pavličevih pri Zgornji Pohanci, okrog 3 km severovzhodno od Krškega (sl. 1 in sl. 2). Kalcitne oziroma iz kalcijevega karbonata sestojee drobno segmentirane cevke imajo premer od 1 do okrog 2 mm. Njihovo dolžino je težko določiti, ker nobena cevka ni ohranjena v celoti. Večinoma so krajše, nekateri daljši primerki merijo okrog 5 cm in več. Cevasti skeletni deli in njihovi odtisi so večinoma ravni do rahlo upognjeni, močnejše ukrivljenih ni. Skeleti so tanki in po celotni dolžini približno enakega premera. Ker kamnina sestoji izključno iz ostankov anelidov in veziva, bi jo lahko imenovali kar anelidni apnenc ali anelidolit.

Cevasti ostanki so fragmentirani in pogosto naknadno zapolnjeni s kalcitom, njihove morfološke značilnosti pa lahko primerjamo z več oblikami raznih rodov, predvsem z rodovi *Protula*, *Hydroides* in *Vermiliopsis*. Prepričani smo, da cevke v anelidolitu iz Zgornje Pohance pripadajo enemu izmed naštetih rodov, torej so vsekakor od polihetov iz družine Serpulidae. Točnejša taksonomska uvrstitev zaenkrat ni mogoča. Vzorčili smo tudi na kalcitni nanoplankton zaradi določitve bolj zanesljive neogenske cone, vendar nanoplanktonskih florističnih ostankov nismo našli.

Takšnega srednjemiocenskega anelidnega apnenca, v katerem so nagnetenosti cevasti polihetni ostanki, doslej v Sloveniji še nismo našli. Pred enim letom smo spoznali badenijske peščene laporovce s številnimi ostanki polihetov iz kamnolomov Plesko nad Trbovljami (neobjavljeno), vendar tamkajšnji ostanki ne pripadajo isti anelidni vrsti in prav tako ne podobnemu ali enakemu bio in litofaciesu.

V Sloveniji se dosedaj ni nihče sistematično ukvarjal s fosilnimi ostanki anelidov, najverjetneje zaradi razloga, ker so razen izjem stratigrafsko nepomembni. Zato je malo literaturnih podatkov o najdbah fosilnih polihetov. Ugotavljamo, da so jih pri nas registrirali v eocenskih in miocenskih kamninah, čeprav smo prepričani, da bi jih lahko našli tudi v drugih sedimentnih kamninah kenozojske, mezozojske in paleozojske starosti. Dose-

daj najdeni ostanki polihetov v slovenskih eocenskih kamninah pripadajo primerkom iz družine Serpulidae, v miocenskih pa družinama Serpulidae in Spionidae.

## Annelids in the Miocene lithothamnion limestone from Zgornja Pohanca, Slovenia

### Conclusions

Limestone fragments containing annelid tubules (pl. 1 and pl. 2; pl. 3, 1, 3) were found in a horizon of Badenian lithothamnion limestone in a cut in the slope below the Pavlič home at Zgornja Pohanca, about 3 km northeast of Krško (fig. 1 and fig. 2). Calcitic resp. calcium carbonate thinly segmented tubules measure 1 to around 2 mm in diameter. Their length is difficult to establish since no tubule is preserved in full. They are mostly shorter, the longest specimens measure 5 cm or little more. Tubular skeletal parts and their imprints are mostly straight to slightly bent, none is more curved. Skeletons are thin and along the entire length of approximately constant diameter. Since the rock consists exclusively of annelidic remains and cement, it could be named annelidic limestone or annelidolite.

Tubular remains are fragmented and often subsequently filled by calcite. Their morphologic characteristics could be compared to several forms of various genera, especially to genera *Protula*, *Hydroides* and *Vermiliopsis*. We are convinced that tubules in annelidolite from Zgornja Pohanca belong to one of the listed genera. They belong by all means to polychaetes of Serpulidae family, but a more precise taxonomic attribution is not possible at present. We sampled also the calcaneous nanoplankton for determination of a more reliable Neogene zone, but no nanoplankton floristic remains could be found.

The Middle Miocene annelid limestone with massive tubular remains of polychaetes not found in Slovenia so far. One year ago we recorded Badenian sandy marlstones with numerous remains of polychaetes in Plesko quarries above Trbovlje in central Slovenia (not published). The remains there, however, do not belong to the same annelid

species, and also not to a similar or equal bio- and lithofacies.

In Slovenia there has been no systematic study of the fossil remains of annelids so far, most probably because they are, a part form a few exceptions, of no stratigraphical relevance. Consequently the published data on finds of Slovenian fossil polychaetes are scarce. It may be stated that they were recognized so far in Eocene and Miocene beds only, although their presence could be presumed also in other sedimentary rocks of Cenozoic, Mesozoic and Paleozoic age. The polychaetes remains found so far in our Eocene beds belong to the Serpulidae family, and in Miocene beds to the Serpulidae and Spionidae families.

### Zahvale

Za prevode v angleščino se avtorji zahvaljujemo služnemu profesorju dr. Simonu Pircu, za fotografsko dokumentacijo in računalniško podporo pa sodelavcu Marijanu Grmu.

### Literatura – References

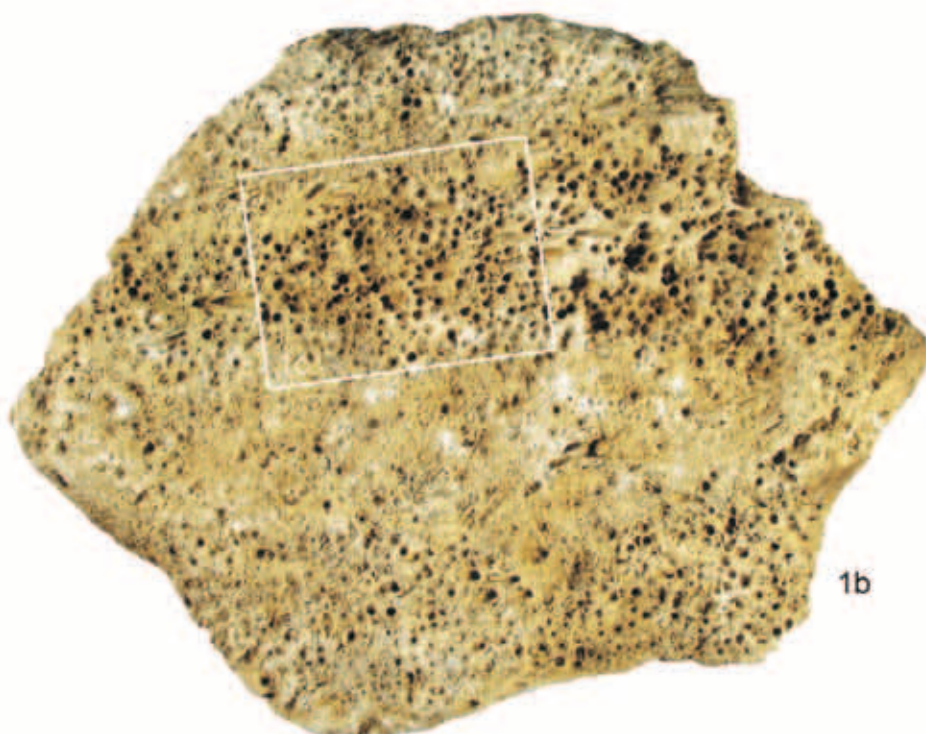
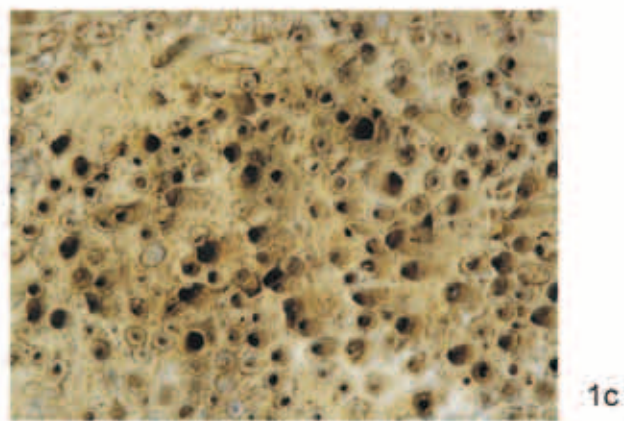
- BALUK, W. & RADWAŃSKI, A. 1997: The micropolychaete *Josephella commensalis* sp. n. comensal to the scleractinian coral *Tarbellastraea reussiana* (Milne-Edwards & Haime, 1850) from the Korytnica Clays (Middle Miocene; Holy Cross Mountains, Central Poland). *Acta Geol. Polonica*, 47/3-4: 211-224, Pl. 1-13.
- JAKUBOWSKI, G. & MUSIAŁ, T. 1979: Middle Miocene sandy and carbonate deposits of Huta Lubycka and Huta Różaniecka (Roztocze Rawskie Region, Southeastern Poland) and their fauna. *Prace Muzeum Ziemi*, 32: 71-100, Pl. 1-7.
- MIKUŽ, V. 2008: Serpulidni črv *Rotularia spirulaea* iz eocenskih plasti pri Gračišču v Istri, Hrvaška = The serpulid worm *Rotularia spirulaea* from Eocene beds near Gračišće in Istria, Croatia. *Geologija*, 51/2: 161-168, (Tab. 1), doi:10.5474/geologija.2008.017.
- MIKUŽ, V. & ČVOROVIĆ, B. 2004: Mehkužci in ostali makrofosili iz eocenskih flišnih plasti v okolici Kuteževega in Trpčan = The molluscs and other macrofossils from Eocene flysch beds in neighbourhood of Kuteževo and Trpčane.

### TABLA 1 – PLATE 1

- 1a Srednjemiocenski – badenijski anelidni apnenec ali anelidolit iz horizonta litotamnijskega apnenca pri Zgornji Pohanci; s strani, velikost 126 x 100 x 107 mm, x 1  
The Middle Miocene – Badenian annelidic limestone or annelidolite from horizon of lithothamnion limestone at Zgornja Pohanca, lateral side, size 126 x 100 x 107 mm, x 1
- 1b Isti kos z zgornje strani, Zgornja Pohanca, x 1  
The same piece from upper side, Zgornja Pohanca, x 1
- 1c Detajl z zgornje preperete površine istega kosa, Zgornja Pohanca, x 2  
Detail from the upper mouldered surface of the same piece, Zgornja Pohanca, x 2



**TABLA 1 – PLATE 1**



- Razprave IV. razreda SAZU, 45/3: 91-143, Tab. 1-6.
- MIKUŽ, V. & HORVAT, A. 1998: Leščurji iz badenijskih plasti Dolnje Stare vasi pri Škocjanu in Gorenje vasi pri Šmarjeti na Dolenjskem (Slovenija) = Pen shells from Badenian beds at Dolnja Stara vas near Škocjan and at Gorenja vas near Šmarjeta in Lower Carniola (Slovenia). Razprave IV. razreda SAZU, 39/4: 137-197, Tab. 1-22.
- PAVŠIČ, J. 2009: Paleontologija. Paleobotanika in nevretenčarji. II. dopolnjena in popravljena izdaja. Univerza v Ljubljani, NTF-Oddelek za geologijo, Ljubljana: 460 p., Tab. A-K.
- RAMOVŠ, A. 1974: Paleontologija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Ljubljana: I-XIII, 1-304, ilustr. 1-155.
- ROVERETO, G. 1898: Serpulidae del terziario e del quaternario in Italia. Palaeontographia Italica, 4: 47-91, Tav. 6 (1)-7 (2).
- ROVERETO, G. 1901: Briozoi, Anellidi e Spugne perforanti del Neogene ligure???. Paleontographia Italica, 7: 219-234, Tav. 28 (1).
- ROVERETO, G. 1904: Studi monografici sugli anellidi fossili. Palaeontographica Italica, Mem. Palaeont., 10: 1-73, Tav. 1-4.
- SCHMIDT, J. 1951: Neue Serpulidae aus dem tertiären Wiener Becken. Annalen Naturhist. Mus. Wien, 58: 77-84.
- SCHMIDT, W. J. 1955: Die Tertiären Würmer Österreichs. Denkschr. Österr. Akad. Wiss., Mathem.-naturwiss. Kl. 109/7: 1-121, Taf. 1-8.
- SCHULTZ, O. 1998: Tertiärfossilien Österreichs. Wirbellose, niedere Wirbeltiere und marine Säugetiere. Goldsneck-Verlag (Korb): 159 p., Taf. 1-65.
- STACHE, G. 1859: Die Eocengebiete in Inner-Krain und Istrien. Jb. Geol. R. A., 10: 272-331, Taf. 8.
- ŠIKIĆ, K., O. BASCH & ŠIMUNIĆ, A. 1978: Osnovna geološka karta SFRJ Zagreb 1:100 000. Redakcija i izdanje Saveznog geološkog zavoda Beograd.
- ŠIKIĆ, K., O. BASCH & ŠIMUNIĆ, A. 1979: Tumač za list Zagreb L33-80. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. Savezni geološki zavod Beograd, Beograd: 81 p.

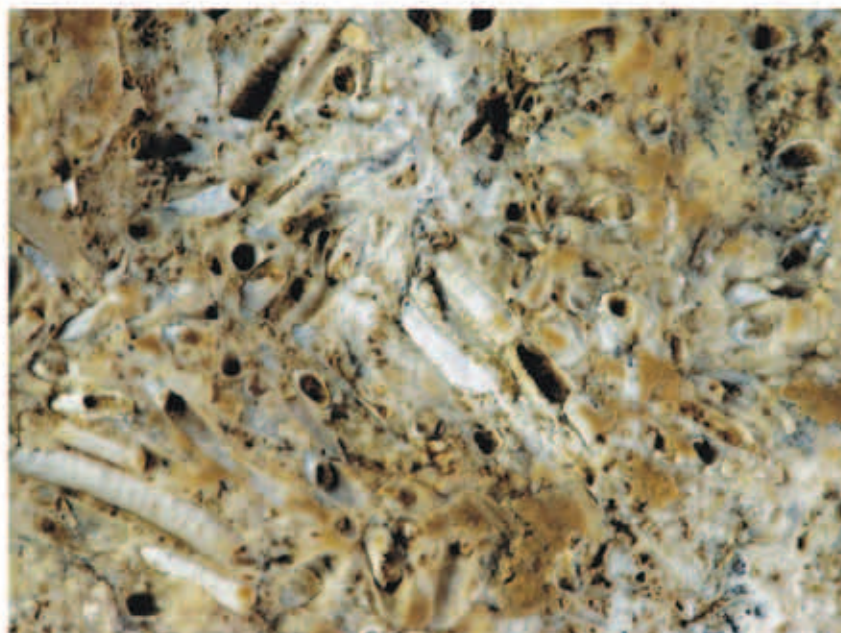
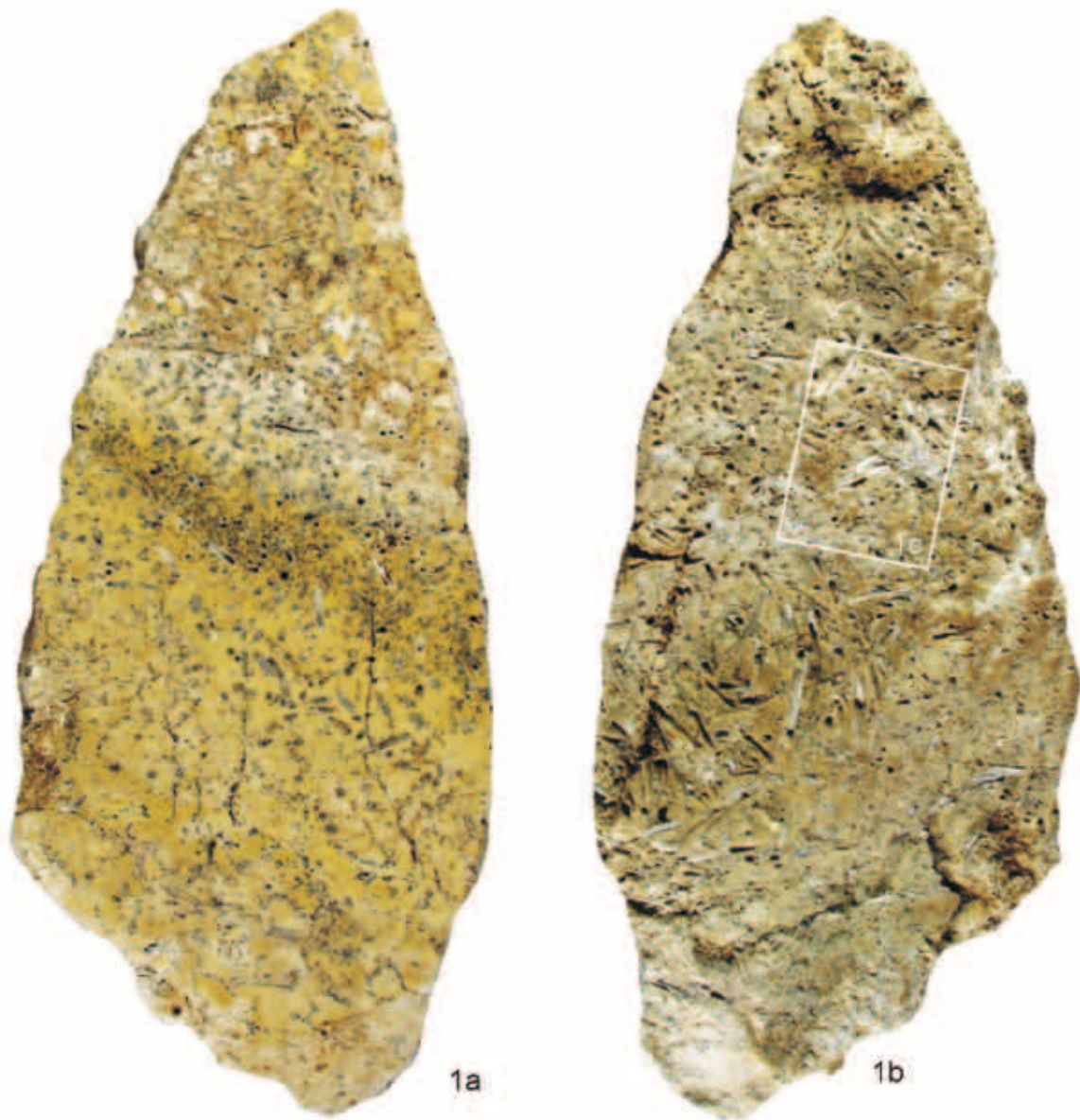
---

**TABLA 2 – PLATE 2**

- 1a* Brušena površina anelidnega apnenca, Zgornja Pohanca, velikost 180 x 79 x 25 mm, x 0,9  
The polished surface of annelidic limestone, Zgornja Pohanca, size 180 x 79 x 25 mm, x 0,9
- 1b* Isti kos z nasprotni strani, Zgornja Pohanca, x 0,9  
The same piece from opposite side, Zgornja Pohanca, x 0,9
- 1c* Detajl iz istega kosa, Zgornja Pohanca, x 3,5  
Detail from the same piece, Zgornja Pohanca, x 3,5



**TABLA 2 – PLATE 2**



**1c**



**TABLA 3 – PLATE 3**

- 1 Kos anelidnega apnenca z vzporednimi kalcitnimi skeletnimi deli, Zgornja Pohanca, velikost 92 x 56 x 28 mm, x 1,3  
The piece of annelidic limestone with parallel calcitic skeletal parts, Zgornja Pohanca, size 92 x 56 x 28 mm, x 1,3
- 2a Recentni anelidi vrste *Vermiliopsis infundibulum* iz Jadranskega morja, s strani, Paleontološka zbirka Oddelka za geologijo, inv. št. 6389, velikost kosa 65 x 48 x 37 mm, x 1,4  
The actual annelids *Vermiliopsis infundibulum* from Adriatic sea, lateral side, Paleontological collection of Department of Geology, inv. no. 6389, size of piece 65 x 48 x 37 mm, x 1,4
- 2b Isti vzorec z zgornje strani, Jadransko morje, x 1,4  
The same specimen from upper side, Adriatic sea, x 1,4
- 3 Preperela površina anelidnega apnenca ali anelidolita, Zgornja Pohanca, velikost 95 x 59 x 23 mm, x 1,2  
The mouldered surface of annelidic limestone or annelidolite, Zgornja Pohanca, size 95 x 59 x 23 mm, x 1,2

Fotografije (Photos): Marijan Grm

**TABLA 3 – PLATE 3**







# Miocenski pteropodi s Poličkega Vrha v Slovenskih goricah

## Miocene pteropods from Polički Vrh in Slovenske gorice, northeast Slovenia

Vasja MIKUŽ<sup>1</sup>, Rok GAŠPARIČ<sup>2</sup>, Miloš BARTOL<sup>3</sup>, Aleksander HORVAT<sup>3</sup> & Jernej PAVŠIČ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani – Oddelek za geologijo, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; vasja.mikuz@geo.ntf.uni-lj.si; jernej.pavsic@geo.ntf.uni-lj.si

<sup>2</sup>Ljubljanska cesta 4j, SI-1241 Kamnik, Slovenija; rok.gasparic@gmail.com

<sup>3</sup>Paleontološki inštitut Ivana Rakovca ZRC SAZU, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; mbartol@zrc-sazu.si; aleksander.horvat@geo.ntf.uni-lj.si

Prejeto / Received 15. 4. 2012; Sprejeto / Accepted 1. 6 2012

*Ključne besede:* pteropodi, srednji miocen, badenij, Centralna Paratetida, Polički Vrh, Slovenske gorice, Slovenija  
*Key words:* pteropods, Middle Miocene, Badenian, Central Paratethys, Polički Vrh, Slovenske gorice, Slovenia

### Izvleček

V prispevku so obravnavani, po ohranjenosti razmeroma skromni vendar zelo številni ostanki pteropodov iz srednjemiocenskih – badenijskih sljudnatih laporovcev iz najdišča na Poličkem Vrhu v Slovenskih goricah. Ostanki pripadajo pteropodom iz družine Cliidae Jeffreys, 1869 oziroma vrsti *Clio pedemontana* (Mayer, 1868). To so prve dokumentirane najdbe te vrste pri nas, zaenkrat so tudi najbolj južno registrirani tovrstni pteropodi v Štajerskem bazenu neogenskih skladov Centralne Paratetide.

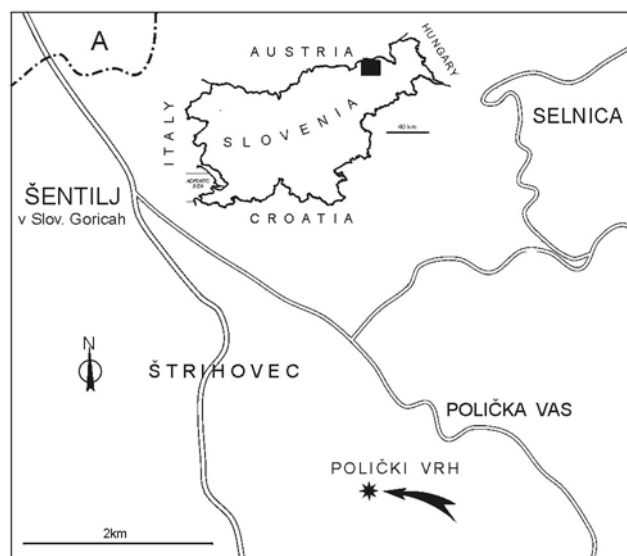
### Abstract

In the paper relatively modestly preserved but very numerous pteropod remains from Middle Miocene – Badenian micaceous marlstones of Polički Vrh locality in Slovenske gorice, northeastern part of Slovenia are described. The fossils were attributed to the pteropod family Cliidae Jeffreys, 1869, respectively the species *Clio pedemontana* (Mayer, 1868). They represent the first documented finds of this species in Slovenia, and so far also the southernmost occurrence of the pteropods belonging to this species in Neogene beds of the Styrian basin in the Central Paratethys.

### Uvod

Osmega avgusta 2011 me je gospod Rok Gašparič obvestil, da je bil na terenu v okolici Šentilja v Slovenskih goricah (sl. 1). Ob lokalni cesti od Šentilja proti Jarenini je na desnem pobočju Poličkega Vrha opazil globoko oranje in pripravljane terena za nov večji vinograd. Poblize si je ogledal tamkajšnjo kamnino in ugotovil, da gre za tipične miocenske laporovce, kakršni izdanjajo v Slovenskih goricah. V njih je našel ostanke školjk, nagrmadene ostanke pteropodov, mahovnjakov, rakovic in septarijske konkrecije. Septarijske konkrecije in njihovo mineralizacijo s Poličkega Vrha so že predstavili JERŠEK in sodelavci (2011). V septarijah so ugotovili kalcit, barit, pirit, kremen, kalcedon in ferrierit, med fosilnimi ostanki pa majhne polžke. 12. avgusta 2011 sem od Roka Gašpariča prejel paket z vzorci laporovca s številnimi sicer slabo ohranjenimi pteropodi iz že omejenega najdišča.

Pred desetimi leti je dr. Jernej Pavšič našel nekaj vzorcev s pteropodi v okolici Lenarta. Lenart-



Sl. 1. Geografski položaj najdišča miocenskih pteropodov s Poličkega Vrha v Slovenskih goricah

Fig. 1. Geographical position of the site of Miocene pteropods from Polički Vrh in Slovenske gorice, northeast Slovenia

ski miocenski laporovci so navidez podobni laporovcem s Poliškega Vrha. Ti laporovci so svetlejši in nimajo toliko organske snovi. V teh laporovcih je PAVŠIČ (2002a, 225) ugotovil ostanke manjše pteropodne vrste *Vaginella austriaca* Kittl, 1886 in nanoplanktonsko floro, ki dokazuje srednji badenij oziroma neogensko nanoplanktonsko cono NN5.

Vzorci s Poliškega Vrha smo analizirali tudi na morebitno vsebnost kremenčnih alg ali diatomej (Bacillariophyta) in na planktonske enocelične alge ali kokolite (Coccolithophyta) z namenom ugotovitve sedimentacijskega okolja in točneje starosti laporovcev.

### Raziskave terciarnih pteropodov v Sloveniji

Podatke o terciarnih pteropodih zasledimo že v BITTNER-jevi razpravi iz leta 1884. Na strani 488 navaja fosilne ostanke iz morskih laporovcev pri Trbovljah. Med naštetimi fosilnimi ostanki najdemo tudi zaznamek *Balantium spec.* in dalje navaja, da je ta oblika zelo pogostna. Bittner je primerke iz Trbovelj poslal v zbirko takratnega avstroogrškega geološkega zavoda na Dunaju. KITTL je kmalu za tem začel Bittnerjeve primerke preučevati in leta 1886 predstavil ter določil novo vrsto in jo poimenoval po najditelju *Balantium Bittneri* n. f. (63, Taf. 2, Fig. 27). Istega leta je poročal še FUCHS (1884, 380) o pteropodih iz miocenskih peščenih laporovcev z območja med Rogatcem in Rogaško Slatino. RAKOVEC (1933, 165) piše, da je v Posavskih gubah nad soteškimi skladi morská siva in v takšnih skladih so pri Trbovljah med številno morskó favno našli tudi polže *Balantium sp.* KUŠČER (1967), ki je zelo kritično analiziral BITTNER-jevo razpravo iz leta 1884 in še sam temeljito raziskoval Zagorski terciar, je tudi prezrl podatek o tam najdenih pteropodih. Med polži omenja pteropode tudi RAMOVŠ (1974, 83) kjer je zabeleženo, da imajo ti nogo na vsaki strani podaljšano v nekakšno krilo in z zamahovanjem s temi krili lahko lebdiijo na odprtih morjih. RAMOVŠ (1974, 87) opisuje tudi njihove fiziološke in morfološke značilnosti ter, da se njihovi skeleti ponekod nabirajo na dnu globokih morij, kjer ustvarjajo pteropodno blato. Na koncu še dodaja, da v Sloveniji fosilni pteropodi še niso znani, pač pa v bližnjem miocenu Zagrebske gore. Ramovšev zapis, da fosilni pteropodi pri nas še niso bili najdeni, nas je malce presenetil glede na obstoječe starejše literaturne vire iz leta 1884 in 1886. Vrsto *Balantium bittneri* Kittl, 1886 omenja iz Trbovelj tudi JANSSEN (1984, 64-65). Vendar ima JANSSEN (1984, 79) na tabeli 1 označeno, da so v Trbovljah najdeni pteropodi v oligocenskih oziroma egerijskih plasteh. PAVŠIČ (2002a, 224) je iz badenijskih laporovcev okolice Lenarta opisal vrsto *Vaginella austriaca* Kittl, 1886 in istega leta (2002b, 69) napisal še poljuden prispevek o pteropodih. PAVŠIČ (2009, 241-242) obravnava tudi pteropode, ki jih poimenuje krilonožci ali morski metulji, ki da so prosto plavajoči in v glavnem goli ali redko opremljeni s slabotno hišico. So predstavniki od-

prtega morja in glavna hrana kitom in nekaterim ribam. Predstavlja pa rodove *Spiratella*, *Vaginella*, *Creseis*, *Clio*, *Peracle* in *Styliolina*. Med fosilnimi predstavniki omenja iz okolice Lenarta in Šentilja v Slovenskih goricah iz badenijskih plasti pteropodno vrsto *Vaginella austriaca*. HORVAT (2009, 406) povzema po podatkih PAVŠIČA (2002a), da najdemo v Mura - Zala bazenu v srednjem badeniju (zgornji del NN5) planktonske pteropode vrste *Vaginella austriaca* Kittl, ki so pogostni tudi v drugih sedimentacijskih prostorih.

### Geološke razmere v okolici najdišča

Številne koristne podatke o geologiji Slovenskih goric in o fosilnih ostankih iz okolice Šentilja najdemo že v STUR-ovem delu (1871, 562), ki opisuje miocenske laporovce s foraminiferami, školjkami, morskimi ježki in ostanki rakovic. Pteropodov ne omenja, piše o kolosalnih konkrecijah iz okolice Šentilja. Prav takšne septarijske konkrecije so izkopali tudi na ozemlju bodočega vinograde na pobočju Poliškega Vrha.

L. RLJAVEC (1976, 61) opisuje geološki profil Poliška vas - Sladki vrh, kjer je ugotovila spodnje in srednjebadenijske plasti. Spodnjebadenijske plasti pripadajo coni Praeorbulina in Orbulina suturalis, srednji badenij oziroma zgornji horizont je določila s pomočjo foraminifer rodu *Uvigerina* in drugih. Zanimivo je, da L. RLJAVEC (1976) iz nobenega raziskovanega profila v Slovenskih goricah ne omenja nikakršnih pteropodnih ostankov.

ŽNIDARČIČ in MIOČ (1988) na Osnovni geološki karti SFRJ 1 : 100 000, list Maribor in Leibnitz v okolici Poliškega Vrha in Jarenine prikazujeta ottangijsko-karpatijske sklade (nekdanje helvetijske plasti). V tolmaču omenjenega lista ŽNIDARČIČ in MIOČ (1989, 25-26) pišeta, da tam skladi sestojijo iz peščenih laporovcev, peščenjakov, peska in konglomerata. V laporovcih so ugotovljene foraminifere, ostrakodi, ribji zobje, ribje koščice in bodice morskih ježkov. Foraminifere določajo laporovcem ottangijsko-karpatijsko starost. V tektonskem smislu pripada ozemlje v bližnji okolici Poliškega Vrha in širše k tektonski enoti Slovenskih goric oziroma k Panonskemu bazenu (ŽNIDARČIČ & MIOČ, 1989, 39).

### Paleontološki del

Sistematiaka po: CAHUZAC & JANSSEN 2010

Phylum Mollusca Linné, 1758  
 Classis Gastropoda Cuvier, 1797  
 Cladus Thecosomata de Blainville, 1824  
 Superfamilia Cavolinioidea Gray, 1850

SMOLIK (1967, 696) oziroma prevajalec Alojz Šercelj je pteropode poimenoval polži veslonožci ali krilonožci. RIEDL (1983, 308-311) v pteropodni skupini Thecosomata omenja iz območja Mediteranskega morja družine Limacinidae, Cavoliniidae in Cymbuliidae. Znotraj družine Cavoliniidae

omenja rodove *Creseis*, *Styliola*, *Hyalocyclis*, *Clio* in *Cavolinia*. Velikost njihovih hišic je v razponu od 4 do 20 mm. ABBOTT in DANCE (1991, 280) imenujeta pteropode »morski metulji«. So majhni pelagični polži z mesnatimi krili za plavanje. Pogostni so v vseh večjih morjih in predstavljajo glavno hrano za nekatere kite. Danes živi 15 rodov z okrog 100 vrstami, nekatere vrste nimajo hišic in so gole. Njihove hišice se najdejo v večjih globinah na dnu oceanov. MILIŠIČ (1991, 290) prikazuje iz Jadranskega morja pteropode iz družine Cavoliniidae vrste *Cavolinia tridentata* (Forskael, 1775).

Če združimo podatke različnih avtorjev, so pteropodi (Pteropoda Cuvier, 1804) majhni planktonsko-nektonski oziroma holoplanktonski polžki in tenkimi hišicami ali pa so povsem goli. Pteropodi deloma lebdiijo in deloma »plavajo« v morjih in oceanih.

Familia Cliidae Jeffreys, 1869  
Genus *Clio* Linné, 1767

BENOIST (1888) opisuje in predstavlja določene miocenske mehkužce iz južnozahodnega dela Francije. Med opisi pteropodov BENOIST-a (1888, 26) zasledimo zapis: *Clio*, Browne (1756), non Linné (1758). Ta raziskovalec in še nekateri drugi pripisujejo avtorstvo pteropodnega rodu *Clio* Browne-ju iz leta 1756.

*Clio pedemontana* (Mayer, 1868)  
Sl. 4; tab. 1, sl. 1-2

- 1868 *Cleodora Pedemontana*, Mayer – MAYER, 104, Pl. 2, Fig. 2  
1873 *Balantium pedemontanum* (May.) – BELLARDI, Parte 1, Tav. 3, Figs. 10a-10c  
1886 *Balantium pedemontanum* (Mayer) – KITTL, 64, Tav. 2, Figs. 28, 33  
1904 *Balantium pedemontanum* (May.) – SACCO, Parte 30, Tav. 4, Fig. 7  
1971 *Clio pedemontana* (Mayer, 1868) – ROBBA, 84, Tav. 3, Figs. 7-9  
1978 *Clio pedemontana* (Mayer, 1868) – ROBBA & SPANO, 774, Tav. 78, Fig. 4  
1981 *Clio pedemontana* (Mayer, 1868) – D'ALESSANDRO & ROBBA, 641, Tav. 66, Figs. 7a-7d  
1981 *Clio pedemontana* (Mayer 1868) – KRACH, 123, Pl. 1, Figs. 1, 9  
1984 *Balantium pedemontanum* (Mayer, 1868) – JANSSEN, 66, Pl. 6, Figs. 1-4  
1993 *Clio pedemontana* (Mayer, 1868) – JANSSEN & ZORN, 199, Pl. 9, Figs. 4-6  
1995 *Clio pedemontana* (Mayer 1868) – ZORN, 746, Taf. 1, Figs. 1-6

**Material:** Trije večji kosi sivega peščenega laporovca s številnimi pteropodi, ribjimi luskami in posameznimi otoliti, odtisi in lupinicami školjk, s posameznimi deli škarij rakovic iz rodu *Callianassa*. Med pteropodi sta morda dve različni obliki, ki sta zaradi slabše ohranjenosti težko določljivi. Najbolj opazna je večja oblika s številnimi prečnimi rebri, ki je najbližja vrsti *Clio pede-*

*montana*, nekateri primerki so podobni tudi vrsti *Clio fallauxi*.

**Nahajališče:** Pri zemeljskih delih celovite obnove vinograda na Poličkem Vrhu ob regionalni cesti Jareninski dol – Šentilj v Slovenskih goricah (sl. 2) so poleti 2011 odprli več profilov na 100 m dolgem pobočju Poličkega Vrha. Kamnine v nahajališču so bile večkrat pregledovane v avgustu in septembru 2011. Ko so se gradbena dela v vinogradu tudi končala, so bili vsi profili zravnani v velik vinograd.



Sl. 2. Srednjemiocenski laporovci na pobočju Poličkega Vrha (Foto: R. Gašparič)

Fig. 2. The Middle Miocene marls on the slope of Polički Vrh (Photo: R. Gašparič)

**Geološke razmere v najdišču:** V nekaj razkritih krajših profilih preko pobočja je bilo v času del mogoče opazovati kontinuiran litološki profil v skupni debelini okrog 60 m. Razkriti so bili homogeni svetlosivi sljudnati laporovci srednjemiocenske – badenijske starosti (sl. 2), ki so v okolici in na celotnem območju Slovenskih goric pogostni.

V spodnjem delu profila so laporovci drobno plastnati in mehki, z več terigene komponente in večjo vsebnostjo sljude. Med laporovci se mestoma pojavljajo do 40 cm debele leče peščenega slabo sprijetega laporovca s številnimi ostanki pteropodov. V zgornjih 40 m profila so laporovci masivnejši in bolj litificirani z več karbonatne in manj terigene komponente. V tem delu profila so bile najdene tudi pogostne kroglaste septarijske konkrecije s premerom do 1,5 m in valjaste konkrecije s premerom do 2,5 m (sl. 3). V konkre-



Sl. 3. Septarijske konkrecije s Poličkega Vrha (Foto: R. Gašparič)

Fig. 3. Septarian nodules from Polički Vrh (Photo: R. Gašparič)



cijah so makroskopsko razpoznavni lepi kristali kalcita, kremenca in barita. Med makrofosili so v nahajališču pogostni ostanki školjk rodu *Ammusium*, ki se pojavljajo v laporovcih skozi celoten profil. V spodnjem delu profila so mestoma izredno pogosti ostanki škarij rakovic rodu *Callianassa*. Manj pogosti so ostanki školjk rodu *Solen* in *Pinna* ter sferičnih kolonij mahovnjakov, ostankov bentoških polžev pa nismo zasledili. Proti vrhu profila postane laporovec trši in neplastnat z razmeroma pogostnimi ostanki majhnih, do 3 cm velikih iregularnih morskih ježkov ter zelo velikimi in številnimi septarijskimi konkrecijami.

**Opis pteropodnih ostankov:** Hišice opisane oblike so podolgovato-trikotne do stožčaste oblike (sl. 4; tab. 1). Bočno precej stisnjene oziroma ozke z izbočenimi ali konveksnimi osrednjimi deli, z zašiljenimi vrhovi, širokimi do ozko ovalnimi ustji. Od vrha proti ustju poteka večje število prečnih in konveksnih reber, tako da je površina rebrasta. Število prečnih reber pri naših poškodovanih primerkih se giblje med 17 in 20, pri v celoti ohranjenih primerkih bi jih moralo biti okrog 25. Na straneh hišice sta ozka in ostra sploščena robova hišice, ki od vrha proti ustju divergirata pod različnimi koti, od 22° do 26°.



Sl. 4. Pteropodi vrste *Clio pedemontana* (Mayer, 1868) v badenijskih laporovcih s Poličkega Vrha. Velikost slikane površine 65 x 40 mm (Foto: R. Gašparič)

Fig. 4. Pteropods *Clio pedemontana* (Mayer, 1868) in the Badenian marls from Polički Vrh. Size of photographed area 65 x 40 mm (Photo: R. Gašparič)

Izdvojili smo dve malce različni obliki (?) vrste *Clio pedemontana* – formo A z bolj ravnimi oziroma manj izbočenimi rebrci (tab. 1, sl. 1-A) in formo B z bolj konveksnimi rebrci (tab. 1, 1-B, 2).

**Velikost pteropodnih kamenih jeder ali odtisov njihovih hišic:** Vse mere so zelo približne, saj nimamo v celoti ohranjenega nobenega primerka. Večinoma so ohranjeni odlomki njihovih kamenih jeder.

Višina Height mm	Širina 1 Width 1 mm	Širina 2 Width 2 mm	Apikalni kot Apical angle
10 – 16	4 – 6	1 – 2	22° – 26°

**Primerjava:** Oblika in ornamentacija MAYER-jevega primerka (1868, Pl. 2, Fig. 2) povsem ustreza oblikam naših primerkov. Morda je bolj opazna velikost, ki je pri MAYER-jevemu primerku nekoliko večja (dolžina 26 mm in širina 11 mm). Naši primerki (sl. 4 in tab. 1) so manjši in so deloma podobni tudi vrstama *Clio bittneri* (KITTL 1886, Taf. 2, Fig. 27) in *C. fallauxi* (KITTL 1886, Taf. 2, Figs. 23-26). Vendar mislimo, da velikost ni ključni faktor razlikovanja, kjer so majhni primerki so lahko tudi večji in obratno. Primerki s Poličkega Vrha po obliki in ornamentaciji ustrezajo primerkom, ki jih predstavlja ZORN (1995, Taf. 1, Figs. 1-6). Primerki vrste *Clio fallauxi* (Kittl, 1886) ki jih prikazuje ZORN (1999, 730, Pl. 2, Figs. 3-4) so izredno podobni nekaterim našim primerkom. JANSSEN & ZORN (2001, 47, Figs. 1a-d) sta postavila novo vrsto *Clio (Balantium) collina* iz burdigalijsko-langhijskih plasti Piemonta v Italiji, ki se bistveno ne razlikuje od vrst *Clio pedemontana* in po našem mnenju vprašljive vrste *C. fallauxi*.

**Opomba:** KITTL (1886, 63) je vrsto *Balantium bittneri* z danes veljavnim poimenovanjem *Clio bittneri* opisal iz »miocenskih«  
laporovcev v okolici Trbovelj. Laporovci so iz egerijskih oziroma zgornjeoligocenskih plasti, kjer naj bi bila ta vrsta množična. Primerke je našel BITTNER in jih označil kot *Balantium spec.* (1884, 488) ter jih posredoval v zbirko takratnega državnega geološkega zavoda na Dunaju.

**Stratigrafska in geografska razširjenost:** MAYER (1868, 105) opisuje primerke vrste *Clio pedemontana* iz langhijskih pteropodnih laporovcev okolice najdišča Serravalle-di-Scriva in z gričevja v okolici Torina. KITTL (1886, 72) Mayerjevo pteropodno vrsto omenja iz najdišča Praterberg pri kraju Brünn v takratni avstroogrski monarhiji. Omenja jo še iz miocenskih in pliocenskih skladov Italije. ROBBA (1971, 84) poroča, da je vrsta *Clio pedemontana* (Mayer, 1868) ugotovljena v spodnjem miocenu Piemonta, v srednjem miocenu Italije (Piemont, Emilia, Umbria, Puglia), Avstrije in Turčije. ROBBA (1972, 474-475) prikazuje stratigrafsko razširjenost pteropodnih vrst, kjer je vrsta *Clio pedemontana* razširjena od zgornjega oligocena do serravallija in še dodaja, da sodi med najbolj razširjene pteropode. ROBBA (1977, 583) prikazuje razširjenost vrste *Clio pedemontana* znotraj langhijskih plasti Italije. ROBBA in SPANO (1978, 775) poročata, da so primerki že navedene vrste najdeni v spodnje in srednjemiocenskih plasteh Italije, v karpatijskih in spodnjebadenijskih Paratetide, Turčije in serravallijsko-tortonijskih plasteh Italije. KRACH (1979, 659-660) poroča, da je vrsta *Clio pedemontana* najdena na Poljskem v spodnjem badeniju (v moravijski podstopnji). KRACH (1981, 123) piše, da je bila ta oblika najdena v langhijskih plasteh Italije, v srednjemiocenskih plasteh blizu Brna in v Turčiji. Vrsta je na območju Paratetide razširjena od paleogena do badenija, v Tetidi pa od oligocena do serravallija. V Paratetidi so jo registrirali še v Romuniji, Avstriji, na Madžarskem, Češkem in Slovaškem.

D'ALESSANDRO in ROBBA (1981, 641) pišeta, da je ta vrsta razširjena v spodnjemiocenskih in langhijskih skladih na območju Mediterana ter spodnjabadenijskih plasteh Paratetide. Ugotovljena je še v Turčiji in v serravallijsko-tortonijskih plasteh Sicilije. JANSSEN (1984, 66) je vrsto *Balantium pedemontanum* (Mayer, 1868) predstavil iz miocenskih skladov najdišča Serravalle v Italiji. ZORN (1991, 29) prikazuje razširjenost primerkov rodu *Clio* v spodnje in srednjemiocenskih plasteh Avstrije. BOHN HAVAS (1992, 480) poroča o pteropodih Madžarske, vrsta *Clio pedemontana* je najdena v spodnjabadenijskih glinah na območju Soprona. BOHN HAVAS & ZORN (1993, 60; 1994, 78) vrsto *Clio pedemontana* uvrščata k mlajšemu delu spodnjega badenija. Najdena je v »severnem pogorju« v nahajališčih Cserhát, Borsod in Hidasnémeti na Madžarskem. Drugo zelo podobno vrsto *Clio fallauxi* pa uvrščata prav tako k mlajšemu ali zgornjemu delu spodnjega badenija z območja severno od Budimpešte, z obmejnega dela med Madžarsko in Slovaško. Primerki rodu *Clio* so najdeni tudi v enako starih plasteh v severnem delu Dunajske kotline. ZORN (1995, 748) poroča, da so vrsto *Clio pedemontana* ugotovili v langhijskih plasteh Italije in v miocenskih skladih Turčije in Izraela. V Paratetidi so jo našli v badenijskih plasteh na Madžarskem, Poljskem in v Romuniji. BOHN HAVAS, LANTOS in SELMECZ (2004, 41) poročajo, da so na Madžarskem pteropodi zelo pogostni v plasteh srednjega dela nanoplanktonske cone NN5, v kateri je udeležena tudi vrsta *Clio pedemontana*.

### Zaključki

Ostanki pteropodov s Poliškega Vrha (sl. 2) v Slovenskih goricah so razmeroma slabo ohranjeni (sl. 4, tab. 1, 1-2). Večinoma gre za kamena jedra in odtise zunanjih ali notranjih površin njihovih tankolupinastih hišic. Pri redkih primerkih je ohranjen tudi odtis hišične ornamentacije. Močno prevladujejo ostanki vrste *Clio pedemontana*, morda je prisotna tudi vrsta *C. fallauxi*, ki sta si zelo podobni. JANSSEN in ZORN (1993, 202) pišeta, da se vrsti med seboj razlikujeta po večjem apikalnem kotu in sekundarnih prečnih linijah pri vrsti *Clio fallauxi*, vrsta *C. pedemontana* pa ima manjši apikalni kot in je brez sekundarnih prečnih reber ali prirastnic. Primerkov drugih pteropodnih rodov nismo ugotovili. V laporovcih s Poliškega Vrha so najdeni še ostanki školjk rodov *Ammusium*, *Solen* in *Pinna*, briozoji, rakovice rodu *Callianassa*, korone majhnih iregularnih morskih ježkov in ribje luske.

Kljub navedenim dejstvom in morebitnim razlikam med vrstama gre najverjetneje za eno samo obliko, prioriteto za vrsto *Clio pedemontana* (Mayer, 1868). Mislimo, da med omenjenima pteropodnima vrstama ni bistvenih in odločujočih razlik, hkrati pa ne poznamo zanesljivih variacijskih širin pri hišicah ene ali druge vrste. Intaktnih oziroma v celoti ohranjenih hišic tovrstnih oblik ne poznamo, vse so deformirane ali poškodovane. Pteropodi ali holoplanktonski polžki opisane vr-

ste *Clio pedemontana* z morebitnima dvema oblikama (forma A in B; tab. 1) so najdeni v srednjemiocenskih – badenijskih sljudnatih laporovcih na pobočju Poliškega Vrha v Slovenskih goricah, ki pripadajo južnemu delu ali podaljšku Štajerskega bazena.

Registracija pteropodnih vrst *Clio pedemontana* in morda *C. fallauxi* ? ter drugih fosilnih ostankov z območja Slovenskih goric znova potrjuje takratno badenijsko povezavo med Centralno Paratetido in območjem Protomediterana, ki je potekala z južne strani proti severu v Centralno Paratetido. Ena morska povezava je prav gotovo potekala čez ozemlje, ki danes pripada slovenskemu delu Štajerskega bazena.

Vzorca Poliški Vrh II in V (tab. 2, 1-13) vsebujeta razmeroma revno nanoplanktonsko združbo (določenih je 14 vrst). V obeh vzorcih sta vrsti *Sphenolithus heteromorphus* in *Helicosphaera minuta*, v vzorcu Poliški Vrh II pa je bila najdena tudi vrsta *Discoaster exilis*. To omogoča, da združbe umestimo v biocono NN5 (MARTINI, 1971). Odsotnost vrst *Helicosphaera waltrans* in *H. walbersdorfensis* omogoča, da starost vzorcev opredelimo še bolj natančno. Po lokalni biostratigrafski zonaciji, izdelani za Mursko udorino (BARTOL, 2009), lahko združbi umestimo v biocono MuN5a na sami bazi biocone NN5.

Z mikroflorističnimi analizami smo ugotovili, da v laporovcih s Poliškega Vrha kremenične alge niso prisotne, so pa najdene enocelične kalcitne alge oziroma kokoliti, s katerimi je ugotovljen spodnji del nanoplanktonske cone NN5 oziroma spodnji badenij.

### Miocene pteropods from Poliški Vrh in Slovenske gorice, northeast Slovenia

#### Conclusions

Pteropod remains from Poliški Vrh (Fig. 2) in Slovenske gorice are relatively poorly preserved (Fig. 4, Pl. 1, 1-2). They are mostly represented by stone moulds and imprints of internal and external surfaces of their thin-walled shells. In rare individuals imprints of their shell ornamentation are also preserved. Clearly predominant are remains of species *Clio pedemontana*. Possibly present is also the very similar species *C. fallauxi*. JANSSEN & ZORN (1993, 202) write that the species differ by a wider apical angle and secondary transversal lines in species *Clio fallauxi*, and the species *C. pedemontana* having a smaller apical angle, and no secondary transversal ribs or growth-lines. Specimens of other pteropod genera were not determined. In marlstones from Poliški Vrh also remains of bivalves of the genera *Ammusium*, *Solen* and *Pinna*, bryozoans, decapode crustaceans of the genus *Callianassa*, coronas of small irregular sea urchins and fish scales were registered.

In spite of these facts and possible differences between the species we are most probably dealing with a single form, preferentially of the species *Clio pedemontana* (Mayer, 1868). We consider that

there are no essential and decisive differences between the mentioned pteropod species, although we do not know reliably the variation ranges of shells for the two species. We do not know the intact or entirely preserved state of shells of this kind of forms, those available being deformed or damaged. Pteropods or holoplanktonic small gastropods of described species *Clio pedemontana* with possible two forms (Pl. 1, forms A and B) have been found in Middle Miocene – Badenian micaceous marlstones in the slope of Polički Vrh in Slovenske gorice that belong to southern part, or to the extension of the Styrian basin.

Registration of the pteropod species *Clio pedemontana* and possibly of *C. fallauxi* ? and other fossil inventory from Slovenske gorice area is a repeated confirmation of the Badenian connection between Central Paratethys and Protomediteranean region that passed from south to north to Central Paratethys. This distinct sea connection undoubtedly passed across the territory that at present belongs to Slovenian part of the Styrian basin.

Samples Polički Vrh II and V (Pl. 2, 1-13) contain a relatively poor nanoplanktonic assemblage (14 species were determined). In both samples occur species *Sphenolithus heteromorphus* and *Helicosphaera minuta*, and in sample Polički Vrh II also the species *Discoaster exilis* was found. These finds permit to attribute the assemblages to biozone NN5 (MARTINI, 1971). Absence of species *Helicosphaera waltrans* and *H. walbersdorfensis* allows an even narrower determination of the age of samples. According to local biostratigraphic zonation elaborated for the Mura depression (BARTOL 2009), the assemblages can be attributed to biozone MuN5a at the very base of the NN5 biozone.

With microfloristic analyses we established an absence of siliceous algae in marlstones at Polički Vrh, but found monocellular calcitic algae respectively coccolites that permitted the recognition of lower part of NN5 nanoplankton zone, i.e. the Lower Badenian.

### Zahvale

Za prevode v angleščino se avtorji zahvaljujemo za služnemu profesorju dr. Simonu Pircu, za fotografsko dokumentacijo in računalniško podporo pa sodelavcu Marijanu Grmu.

### Literatura – References

- ABBOTT, R. T. & DANCE, S. P. 1991: Compendium of Seashells. A Color Guide to more than 4,200 of the World's Marine Shells. Charles Letts & Co. Ltd., IX, 1-411.
- BARTOL, M. 2009: Middle Miocene calcareous nanoplankton of NE Slovenia (western Central Paratethys). Paleontološki inštitut Ivana Rukovca ZRC SAZU, 136 p., (Pl. 1-25).
- BELLARDI, L. 1873: I Molluschi dei terreni terziarii del Piemonte e della Liguria. Parte 1. Cephalopoda, Pteropoda, Heteropoda, Gasteropoda (Muricidae et Tritonidae). Mem. R. Accad. Sci. Torino, 2/27: 33-294, Tav. 1-15.
- BENOIST, A. E. 1888: Coquilles fossiles des terrains Tertiaires moyens du Sud-Ouest de la France. Description des Céphalopodes, Ptéropodes et Gastropodes Opisthobranches (Acteonidae). Actes Soc. Linnéenne Bordeaux, 42: 11-84, Pl. 1-5.
- BITTNER, A. 1884: Die Tertiär-Ablagerungen von Trifail und Sagor. Jb. Geol. R. A., 34: 433-596, Taf. 10.
- BOHN HAVAS, M. 1992: Plankton Gastropodák a magyarországi miocénból. (Miocene Pteropoda in Hungary). Magyar Áll. Földt. Int. Évi Jel. (1990): 473-480.
- BOHN HAVAS, M., LANTOS, M. & SELMECZI, I. 2004: Biostratigraphic studies and correlation of Tertiary planktonic gastropods (Pteropods) from Hungary. Acta Palaeontologica Romaniaae, 4: 37-43, Pl. 1.
- BOHN HAVAS, M. & ZORN, I. 1993: Biostratigraphic studies on planktonic gastropods from Tertiary of the Central Paratethys. Scripta Geol., Spec. Issue (Leiden) 2: 57-66.
- BOHN HAVAS, M. & ZORN, I. 1994: Biostratigraphische Studien über planktonische Gastropoden im Mittel-Miozän von Österreich und Ungarn. Jubilläumschr. 20 Jahre Geol. Zusammenarbeit Österr.-Ungarn, 2: 73-85, Taf. 1-3.
- CAHUZAC, B. & JANSSEN, A. W. 2010: Eocene to Miocene holoplanktonic Mollusca (Gastropoda) of the Aquitaine Basin, southwest France. Scripta Geologica (Leiden) 141: 193 p., Pl. 1-27.
- D'ALESSANDRO, A. & ROBBA, E. 1981: Pteropodi neogenici della Puglia (Italia meridionale). Riv. Ital. Paleont., 86/3: 605-698, Tav. 61-77.

### TABLA 1 – PLATE 1

- 1 Pteropodi v sivem sljudnatem laporovcu iz srednjemiocenskih – badenijskih plasti s Poličkega Vrha v Slovenskih goricah, x 5  
Pteropods in the greyish micaceous marl from the Middle Miocene – Badenian beds of Polički Vrh in Slovenske gorice, x 5  
A – *Clio pedemontana* (Mayer, 1868), forma A  
B – *Clio pedemontana* (Mayer, 1868), forma B
- 2 *Clio pedemontana* (Mayer, 1868), forma B, x 7,4  
*Clio pedemontana* (Mayer, 1868), forma B, x 7,4



**TABLA 1 – PLATE 1**



1

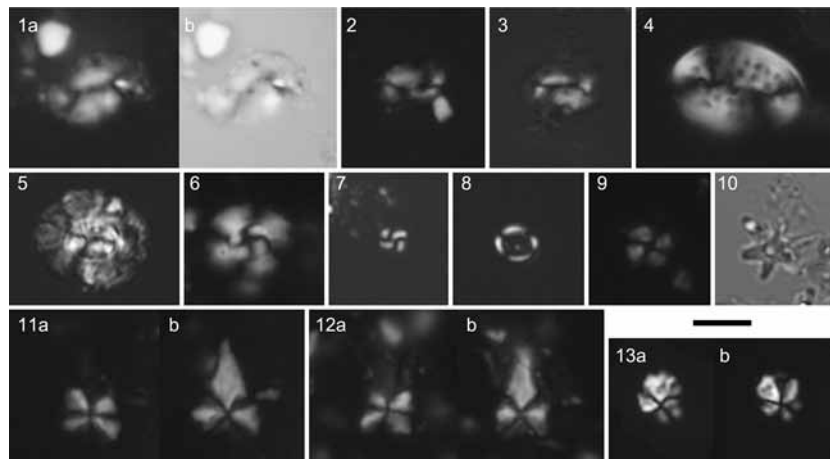


2

- FUCHS, T. 1884: Ueber einige Fossilien aus dem Tertiär der Umgebung Rohitsch-Sauerbrunn und über das Auftreten von Orbitoiden innerhalb des Miocäns. Verh. Geol. R. A., 18: 378-382.
- HORVAT, A. 2009: Miocen. In: PLENIČAR, M. OGORLEC, B. & NOVAK, M. (eds.), Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia, Geološki zavod Slovenije: 390-419.
- JANSSEN, A. W. 1984: Type specimens of pteropod species (Mollusca, Gastropoda) described by Rolle (1861), Reuss (1867) and Kittl (1886), kept in the collection of the Naturhistorisches Museum at Vienna. Meded. Werkgr. Tert. Kwart. Geol., 21/2: 61-91, Pl. 1-6.
- JANSSEN, A. W. & ZORN, I. 1993: Revision of Middle Miocene holoplanktonic gastropods from Poland, published by the late Wilhelm Krach. Scripta Geol., Spec. Issue 2: 155-236.
- JANSSEN, A. W. & ZORN, I. 2001: Notes on the systematics, morphology and biostratigraphy of fossil holoplanktonic Mollusca, 10. *Clio (Balantium) collina* spec. nov., for »*Clio* sp.? an *Clio lavayssei*« non Rutsch, 1934 (Miocene, Italy). Basteria (Leiden) 65: 47-50.
- JERŠEK, M., BEDJANIČ, M., ROJS, L. & ŠAUPERL, D. 2011: Minerali v septarijskih konkrecijah na Poličkem Vrhu. Geološki zbornik, 21: 44-47.
- KITTL, E. 1886: Ueber die miocenen Pteropoden von Oesterreich-Ungarn. Annalen Naturhist. Hofmuseums, 1: 47-74, Taf. 2.
- KRACH, W. 1979: Biostratigraphical extension of Miocene pteropoda. Ann. Géol. Pays Hellén., T. hors série, fasc. 2, VII<sup>th</sup> Int. Congr. Mediterranean Neogene (Athènes): 653-661.
- KRACH, W. 1981: Ślimaki skrzydłonogi (Pteropoda) w miocenie Polski i ich znaczenie stratygraficzne = The Pteropodes in the Miocene of Poland and their stratigraphic significance. In: KRACH, W. (ed.): Badańskie utwory rafowe na Roztoczu Lubelskim oraz ślimaki skrzydłonogi (Pteropoda) w miocenie Polski i ich znaczenie stratygraficzne). Prace Geologiczne, 121: 116-140, Pl. 1-6.
- KUŠČER, D. 1967: Zagorski terciar = Tertiary Formations of Zagorje. Geologija, 10: 5-85, geol. karta.
- MARTINI, E. 1971: Standard Tertiary and Quaternary Calcareous Nannoplankton Zonation. In: FARINACCI, A. (ed.): Proceedings of the II Planktonic Conference, Roma, 1970. Edizioni Tecnoscienza, 2: 739-785.
- MAYER, C. 1868: Description de Coquilles fossiles des terrains tertiaires supérieurs. Journal Conchyliologie, 16: 102-112, Pl. 2-3.
- MILIŠIČ, N. 1991: Školjke i puževi Jadrana. Logos, 302 p.
- PAVŠIČ, J. 2002a: Badenian nannoplankton and pteropods from surroundings of Lenart in Slovenske Gorice (Slovenia) = Badenijski nannoplankton in pteropodi iz okolice Lenarta v Slovenskih Goricah. Razprave IV. razreda SAZU, 43/2: 219-239, Pl. 1-3.
- PAVŠIČ, J. 2002b: Vodni letalci. Gea, 12/3: 69-70.
- PAVŠIČ, J. 2009: Paleontologija. Paleobotanika in nevretenčarji. 2. dopolnjena in popravljena izdaja. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Ljubljana: 460 p., Tab. A-K.
- RAKOVEC, I. 1933: Geološko-paleontološki oddelek. V: Vodnik po zbirkah Narodnega muzeja v Ljubljani. Prirodopisni del. Narodni muzej v Ljubljani, 119-185.
- RAMOVŠ, A. 1974: Paleontologija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Ljubljana: XIII, 304 p., ilustr. 1-155.
- RIEDL, R. 1983: Fauna und Flora des Mittelmeeres. Ein systematischer Meeresführer für Biologen und Naturfreunde. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin: 836 p.
- RLJAVEC, L. 1976: Biostratigrafija miocena v Slovenskih goricah = Biostratigraphy of Miocene Beds from Slovenske Gorice. Geologija, 19: 53-82.
- ROBBA, E. 1971: Associazioni a Pteropodi della Formazione di Cessole (Langhiano). Riv. Ital. Paleont., 77/1: 19-126, Tav. 1-5.
- ROBBA, E. 1972: Associazioni a Pteropodi nel Miocene inferiore delle Langhe (Piemonte). Riv. Ital. Paleont., 78/3: 467-524, Tav. 57-60.
- ROBBA, E. 1977: Pteropodi serravalliani delle Langhe (Piemonte). Riv. Ital. Paleont., 83/ 3: 575-640, Tav. 17-25.
- ROBBA, E. & SPANO, C. 1978: Gasteropodi pelagici nel Miocene medio del Campidano meridionale (Sardegna). Riv. Ital. Paleont., 84/3: 751-796, Tav. 76-81.
- SACCO, F. 1904: I Molluschi dei terreni terziarii del Piemonte e della Liguria. Parte 30. Carlo Clausen (Torino).
- SMOLIK, H. W., 1967: Živalski svet (prevedel Alojz Šercelj). Državna založba Slovenije, Ljubljana: 769 p.
- STUR, D. 1871: Geologie der Steiermark. V. Die Känozoischen Formationen. Im Verlage des geogn.-mont. Vereines für Steiermark in Graz: 509-650.
- ZORN, I. 1991: Gastropoda tertiaria Pteropoda (Thecosomata, Gastropoda). In: ZAPFE, H. (ed.): Österr. Akad. Wiss., Catalogus Fossilium Austriae. Ein systematisches Verzeichnis aller auf österreichischem Gebiet festgestellten Fossilien. Wien VIc/3c: 69 p., Taf. 1-5.
- ZORN, I. 1995: Planktonische Gastropoden (Euthecosomata und Heteropoda) in der Sammlung Mayer-Eymar im Naturhistorischen Museum in Basel. Eclogae geol. Helv., 88/3: 743-759, Taf. 1-2.
- ZORN, I. 1999: Planktonic gastropods (pteropods) from the Miocene of the Carpathian Foredeep and the Ždánice Unit in Moravia (Czech Republic). Abh. Geol. B. A., 56/2: 723-738, Pl. 1-5.
- ŽNIDARČIČ, M. & MIOČ, P. 1988: Osnovna geološka karta SFRJ Maribor in Leibnitz 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod Beograd.
- ŽNIDARČIČ, M. & MIOČ, P. 1989: Tolmač za lista Maribor in Leibnitz. Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod Beograd, Beograd: 60 p.



TABLA 2 – PLATE 2



Scale bar – 5  $\mu\text{m}$ .

Kalcitni nannoplankton v vzorcih Polički Vrh II in V

Calcitic nannoplankton in samples Polički Vrh II and V, (BARTOL, 2012)

- 1 *Helicosphaera perch-nielseniae* (Haq, 1971) Jafar & Martini, 1975, vzorec (sample) Polički Vrh V, a-XPL, b-PPL.
- 2 *Helicosphaera minuta* Müller, 1981, vzorec (sample) Polički Vrh V, XPL.
- 3 *Helicosphaera minuta* Müller, 1981, vzorec (sample) Polički Vrh II, XPL.
- 4 *Pontosphaera multipora* (Kamptner, 1948) Roth, 1970 emend. Burns, 1973, vzorec (sample) Polički Vrh II, XPL.
- 5 *Coccolithus pelagicus* (Wallich, 1877) Schiller, 1930, vzorec (sample) Polički Vrh II, XPL.
- 6 *Cyclicargolithus floridanus* (Hay et al., 1967) Bukry, 1971, vzorec (sample) Polički Vrh V, XPL.
- 7 *Reticulofenestra minuta* Roth, 1970, vzorec (sample) Polički Vrh II, XPL.
- 8 *Syracosphaera* sp., vzorec (sample) Polički Vrh II, XPL.
- 9 *Umbilicosphaera jafarii* Müller, 1974, vzorec (sample) Polički Vrh V, XPL.
- 10 *Discoaster* cf. *exilis* Martini & Bramlette, 1963, vzorec (sample) Polički Vrh II, PPL.
- 11 *Sphenolithus heteromorphus* Deflandre, 1953, vzorec (sample) Polički Vrh II, XPL, a and b – različna usmerjenost (different orientation of sample).
- 12 *Sphenolithus heteromorphus* Deflandre, 1953, vzorec (sample) Polički Vrh V, XPL a and b – različna usmerjenost (different orientation of sample).
- 13 *Sphenolithus moriformis* (Brönnimann and Stradner, 1960) Bramlette and Wilcoxon, 1967, vzorec (sample) Polički Vrh V, XPL, a and b – različna usmerjenost (different orientation of sample).





# A contribution to petrology of dark grey to black interbeds within Upper Permian and Triassic carbonate rocks in the area between Ljubljana and Bloke, Central Slovenia

## Prispevek k petrologiji temno sivih do črnih plasti v zgornjepermskih in triasnih karbonatnih kamninah na območju med Ljubljano in Blokami

Stevo DOZET<sup>1</sup>, Tjaša KANDUČ<sup>2</sup> & Miloš MARKIČ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, Ljubljana, SI-1000, Slovenia; e-mail: stevo.dozet@gmail.com; milos.markic@geo-zs.si

<sup>2</sup>Jožef Stefan Institute, Jamova ulica 36, Ljubljana, SI-1000, Slovenia; e-mail: tjasa.kanduc@gmail.com

Prejeto / Received 22. 5. 2012; Sprejeto / Accepted 12. 6. 2012

*Key words:* Permian, Triassic, mudrocks, carbonates, anthracite, chemical composition, C and N isotopic composition, microscopy, Central Slovenia

*Ključne besede:* perm, trias, glinavci, karbonati, antracit, kemična sestava, izotopska sestava C in N, mikroskopska sestava, osrednja Slovenija

### Abstract

This paper presents results of macroscopic, microscopic, chemical, and isotopic investigations of 12 samples of dark grey to black coloured interbeds occurring within Upper Permian and Triassic lime-, dolo- and marlstones in an area of Outer Dinarides between Ljubljana and Bloke in Central Slovenia. An additional sample is anthracite of the Carnian age from the Orle locality. Concentration of  $C_{org}$  in four samples is below 1 %, and in seven samples it varies between 1 and 2.3 %. Only in one sample, in the black Carnian limestone of the Lesno Brdo area, it is somewhat higher than 5 %. The highest  $C_{org}$  content, 30.61 %, was analysed in the Orle anthracite.

Chemical analysis of major elements (as oxides) showed that four samples are clearly siliciclastic mudrocks, with 65–80 %  $SiO_2 + Al_2O_3$ . Three samples are typical calcite rich – dolomite poor rocks, with high loss on ignition (LOI about 40 %) derived from calcite decomposition. Four samples are calcite – dolomite characterized rocks with LOI of 34–43 %. One sample, from the Slugovo quarry, is composed of quartz, dolomite and calcite. The anthracite sample from Orle has inorganic matter composed almost exclusively of  $SiO_2 + Al_2O_3$  (clays), and some iron and sulphur which form pyrite.

Isotopic composition of the calcite carbon ranges from  $\delta^{13}C_{CaCO_3}$  -5.7 to 1.9 ‰, whereas isotopic composition of the organic carbon varies between  $\delta^{13}C_{org}$  -34.7 and -21.6 ‰. The most negative  $\delta^{13}C_{org}$  value of -34.7 ‰ was analysed in a sample, which is the most organic-rich limestone. Isotopic investigations of nitrogen, expressed by  $\delta^{15}N$  values, also did not express notable differences in respect to lithology. They vary between 4.6 and 9.1 ‰.

Microscopy of polished surface samples showed clearly fine grained siliciclastic, carbonate and coal composition of the treated rocks.

### Izvleček

V članku predstavljamo rezultate makroskopskih, mikroskopskih, kemičnih in izotopskih preiskav 12 vzorcev temno sivih do črnih plasti, ki nastopajo znotraj zgornjepermskih in triasnih apnenec, dolomitov in laporovcev na območju Zunanjih Dinaridov med Ljubljano in Blokami. Dodatni vzorec je vzorec antracita karnijske starosti z območja Orel pri Ljubljani. Koncentracija organskega ogljika ( $C_{org}$ ) štirih vzorcev je nižja kot 1 %, v sedmih vzorcih pa se spreminja med 1 in 2,3 %. Samo v enem vzorcu, z Lesnega Brda, je nekoliko višja kot 5 %. Največja vsebnost Corg, 30,61 %, je bila analizirana v vzorcu antracita z Orel.

Kemična analiza glavnih prvin je pokazala, da so štirje vzorci glinavci s 65–80 %  $SiO_2 + Al_2O_3$ . Trije vzorci so izrazito kalcitni s podrejenim deležem dolomita. Vsi ti trije izkazujejo visoko žaroizgubo (LOI), okoli 40 %. Štirje vzorci so kalcitno dolomitni z žaroizgubo 34–43 %. Vzorec iz kamnoloma Slugovo vsebuje kremen, dolomit in kalcit, en vzorec pa je antracit z Orel, katerega anorganska snov je sestavljena praktično v celoti iz  $SiO_2 + Al_2O_3$  (gline) in nekaj železa ter žvepla, ki tvorita pirit.

Izotopska sestava kalcitnega ogljika se giblje v okviru vrednosti  $\delta^{13}C_{CaCO_3}$  med -5,7 in 1,9 ‰, izotopska sestava organskega ogljika  $\delta^{13}C_{org}$  pa med -34,7 in -21,6 ‰. Najbolj negativna vrednost  $\delta^{13}C_{org}$ , -34,7 ‰, je bila ugotovljena za vzorec, ki je najbolj z organsko snovjo bogat apnenec. Tudi izotopske preiskave dušika niso pokazale povezav z litološkimi razlikami.  $\delta^{15}N$  se spreminja med 4,6 in 9,1 ‰.

Mikroskopska preiskava poliranih obruskov je jasno pokazala siliciklastično, karbonatno in premoško (antracitno) sestavo obravnavanih vzorcev.

## Introduction

The aim of this study was to investigate basic petrologic, mainly microscopic and chemical characteristics of dark-coloured interbeds within Upper Permian and Triassic rocks in the territory south of Ljubljana, towards Bloke. More precisely, the investigated area extends between Ljubljana in the north, Postojna in the west, Velike Bloke in the south and Ribnica in the east (Fig. 1). From the geographical point of view, this area belongs to the Notranjska and Dolenjska karst area (MELIK, 1959). Tectonically, it is a part of the Notranjska-Dolenjska Mesozoic Blocks (BUSER, 1974) and geotectonically, a part of the External Dinarides (PREMRU, 2005; PLACER 2008; and references there-in).

The Dolenjska and Notranjska area was firstly mapped by LIPOLD (1858). Results of this mapping that LIPOLD realized together with STACHE, were two manuscript map sheets on the scale of 1 : 75,000, namely the Višnja Gora–Cerknica and the Laze–Čabar sheets. Fifty years later, KOSSMAT (1910) wrote an Explanatory guide to the Geological map of the area between Škofja Loka and Idrija. On the Basic Geological Map of Yugoslavia 1 : 100,000, our study area extends on the map sheets Ribnica (BUSER, 1969, 1974), Kranj (GRAD & FERJANČIČ, 1974, 1976), Postojna (PLENIČAR et al., 1967, 1970) and Ljubljana (PREMRU, 1983 a,b).

As known from the Basic Geological Map of Yugoslavia 1 : 100,000, and the monograph Geology of Slovenia (Eds.: PLENIČAR et al., 2009) the area of External Dinarides south of Ljubljana is built up mostly of Mesozoic carbonates, underlain by Permian and Carboniferous rocks. Occurrences of Tertiary rocks are “fragmental” and will not be discussed in this paper. Within Mesozoic rocks, our study is mostly restricted to the Triassic carbonates. We include only one locality from the Upper Permian rocks. The term “Triassic carbonates” refers mostly to limestones and dolostones which are more or less bedded and massive, respectively. In general, Triassic carbonates are prevalingly grey in colour. Limestones and dolostones sporadically contain thinly bedded bed-sets of either carbonate or non-carbonate (Si-Al) mudrocks, which are quite often dark grey to black in colour. As already mentioned, exactly these dark interbeds, at some localities having appearance of coaly rocks and even true coals, were target lithologic varieties of our investigations.

Concerning coals, the most known locality in the study area is that at the Orle–Klen, where an anthracite-rank coal (Rm%: 4.5) (HAMRLA, 1987) occurs in three lenticular beds (up to 0.5, 0.5 and 1.0 m thick) within Carnian (Upper Triassic) organic-rich limestone beds (SEDLAR et al. (1948). Between 1878 and 1948, this coal was mined underground in small quantities (below 1500 tons/a) (ČEŠMIGA, 1959). Some other coal layers, that are currently considered to occur mostly in the Carnian beds, but are of lower extent than those at the Orle–Klen locality, were mentioned in the works of KOSSMAT (1902), KRAMER (1905), ŠPOLJARIČ

(1917), and PETRASCHECK (1926, 1926/29, 1927), and finally summarized to a great part by RAKOVEC (1955) in the book *History of Ljubljana*. In this book, RAKOVEC (1955) described coal occurrences in the borderland of the Ljubljana Moor and wider surroundings. He worked out occurrences of coal and anthracite, respectively, in Podlipska dolina, Drenov Grič, Lesno Brdo area, Klen (at Orle), Orle, eastern borderland of the Ljubljana Moor, Lipalnica south of Horjul, Vnanje gorice, and near Dule. ŽLEBNIK & GRAD (1953) mapped »Wengen and Raibl beds« between Drenov Grič, St. Jošt and Butajново. PLENIČAR et al. (1970) quoted coal lenses at Dule near Škofjica, Grič at Ligojna and Lipalnica south of Horjul. BUSER (1974) described Carnian beds with coal at Orle. DOZET (1979, 2002) studied lito- and biostratigraphy of the Carnian beds south of Ljubljana and described a paralic shallow-water coal-bearing formation termed as the Grosuplje–Orle Formation. Within this formation, bituminous coal and anthracite, respectively, is interpreted to occur within limestones of the lower part of the Julian stratigraphic sequence. DOLENEC & JELEN (1987) studied isotopic composition of carbon and oxygen of the Carnian beds in the Lesno Brdo quarry, and three years later JELEN (1990) published his study on litostratigraphy, bivalves and their paleobiological significance in the Carnian carbonate-clastic beds as exposed in two Lesno Brdo quarries. At the same locality, OBLAK (2001) studied Carnian Foraminifera. In 1990, a short contribution on fossil lamellibranch fauna from the Carnian beds at Orle was published by JURKOVŠEK & JELEN (1990).

Although coal resources in the Triassic beds, and also in the Pre-Triassic as well as in younger Mesozoic beds, are presently recognised as out of any economic value in Slovenia, dark varieties of Mesozoic rocks did invoke some attention as potential source rocks for hydrocarbon generation. In the area of External Dinarides in Slovenia, these rocks were for the last time under more detailed investigations in the 1980s. A published work about the oil and gas potential of carbonates of External Dinarides in Slovenia, based on almost 200 samples, is that of OGORELEC et al. (1996). Maturity of organic matter versus clay mineralogy of Carboniferous to Tertiary sediments was regionally studied on nearly 1000 samples by RAINER et al. (2002).

An overview study of isotopic composition of O and C of Mesozoic carbonates on almost 300 samples was carried out by OGORELEC et al. (1999). Isotopic composition of different geological materials and media, and geochemical processes leading to their characteristic isotopic composition is described in PEZDIČ (1999). Basic research work in Slovenia referring to C and O isotopic composition at the transition from Permian to Triassic strata was made and published by DOLENEC & OGORELEC (2001), DOLENEC & RAMOVŠ (1998), and DOLENEC et al. (1999 a,b, 2000, 2003, 2004, 2006).



## Methods

Our study is based on regional geological mapping (1 : 10,000 and 1 : 25,000) of the area south of Ljubljana towards Bloke, and field sampling of dark coloured (organic-rich) rock varieties, either siliciclastics or carbonates. By the field outlook, the samples resembled to different organic matter rich rocks, as coaly, sapropelic, oil and/or gas sourcing, and oil shale rocks, respectively. All sites of sampling are shown on the map in Fig. 1 and were photographed (Figs. 2a-k). Litho-stratigraphic column of the rocks investigated and positions of samples 1 (bottom) to 13 (top) are shown in Fig. 3. The column was made by compilation of regional geological data from the map sheets Ribnica (BUSER, 1969, 1974), Kranj (GRAD & FERJANČIČ, 1974, 1976), Postojna (PLENIČAR et al., 1967, 1970), and Ljubljana (PREMRU, 1983 a,b) of the Basic Geological Map of Yugoslavia 1 : 100,000, and by regional geological mapping of the first author of this paper in recent years.

A representative fragment of each sample was photographed to show dark colour of the samples and their structure (Fig. 4). Colour was defined using the Rock Colour Chart (RCCC, 1970).

In addition to the field/stratigraphic/tectonic positioning of the samples, further aim of this study was to analyse these samples more in detail, using microscopic and bulk chemical analyses.

For microscopic investigation, polished blocks with reflective surfaces, as in ore and/or coal micro-petrography, were prepared – since more coaly materials were expected at the beginning of the investigation. Polished blocks were inspected under normal white reflected polarized light.

Preparation of samples for chemical analysis was done at the Geological Survey of Slovenia according to well established procedure as practiced by the survey's geochemical group. Samples were dried and pulverized, 10 grams in weight, and sent to the ACME (Canada) laboratory (www.acmelab.com – Acme Labs Schedule of Services & Fees 2009-2010). They were analysed on major “rock-forming” elements (as oxides) by the method of inductively coupled plasma (ICP) – emission spectrometry (ACME Group 4A). Total carbon and sulphur, graphite carbon and organic carbon were analysed by Leco (combustion infrared detection technique) (ACME Group 2A). Results of major elements analysis, together with loss on ignition (LOI) at 1000 °C, and forms of carbon are given in Tab. 1.

The isotopic composition of carbon and nitrogen was determined using a Europa 20–20 continuous flow IRMS ANCA–SL preparation module. 20 mg of homogenized sample was weighed in a tin capsule for nitrogen and 1 mg for carbon analysis. Samples for carbon analysis were pre-treated with 3 molar HCl to remove carbonates. The isotopic composition of nitrogen and carbon was determined after combustion of the capsules in a hot furnace (temperature 1000 °C). Generated products were reduced in a Cu tube (600 °C), where excess O<sub>2</sub> was absorbed. H<sub>2</sub>O was trapped

on a drying column composed of MgClO<sub>4</sub>. Gases were separated on a chromatographic column and ionized. NBS 22 (oil) and IAEA N-1 (ammonium sulfate) reference materials were used to relate the analytical results to the VPDB – Vienna Pee Dee Belemnite (karbonat fosilne školjke *Bellemnitela americana*), and AIR standards as follows:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} (\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}}) = ((R_{\text{sample}} - R_{\text{RM}}) / R_{\text{RM}})$$

Where:

$R_{\text{sample}}$  - ratio <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C in sample (<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N for  $\delta^{15}\text{N}$  in sample)

$R_{\text{RM}}$  - ratio <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C in reference material, ratio <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N for  $\delta^{15}\text{N}$  in reference material

$\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$  in organic rich carbonate rocks (except anthracite sample) could only be measured in samples where beam area was above detection limit. 10 mg of sample was first flushed with He and then transformed to CO<sub>2</sub> by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> acid treatment. CO-1 and NBS 19 were used as reference materials. The carbon isotope composition of carbonate ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$ ) was measured with a Europa Scientific 20-20 continuous flow IRMS ANCA - TG preparation module.

Stable isotope results are expressed in the conventional delta ( $\delta$ ) notation, defined as per mil (‰) deviation from the reference standard VPDB. Precision of working standards was  $\pm 0.2\text{‰}$  for  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ , respectively.

## Description of sampling localities and investigated samples

On the basis of data from the already cited geological map sheets of the Basic Geological Map of Yugoslavia (PLENIČAR et al., 1967, 1970; BUSER, 1969, 1974; GRAD & FERJANČIČ, 1974, 1976; PREMRU, 1983 a,b), and self observations, we submit the following description of the sampling localities that cover the study area in Fig. 1.

### Gorenji Lazi quarry (sample 1)

The Gorenji Lazi quarry is situated about one kilometre to the NW of Žlebič (Fig. 1). The quarried rocks (Fig. 2a,b) are the Upper Permian carbonates (Fig. 3) of the Žažar (Bellerophon) beds (RAMOVŠ, 1978) (or the Žažar Formation). The Upper Permian carbonates in the Gorenji Lazi quarry consist of dark dolomites, limestones, oolitic limestones and marls. From the Gorenji Lazi quarry, sample 1 was taken from a greyish black (N2) dolostone (Figs. 3, 4).

### Črni potok (sample 2)

Črni potok locality (Fig. 1) (S of Velika Slevica) refers to a 600 m high hillock at Jazbine, which is built up of Scythian, Anisian and Cordevolian beds. For our study, especially interesting were the Scythian beds (Fig. 3) that are composed of rosy and yellowish grey, sandy (micaceous), platy and thin-bedded dolomite succession with some interbeds of a dark platy limestone. In the upper-

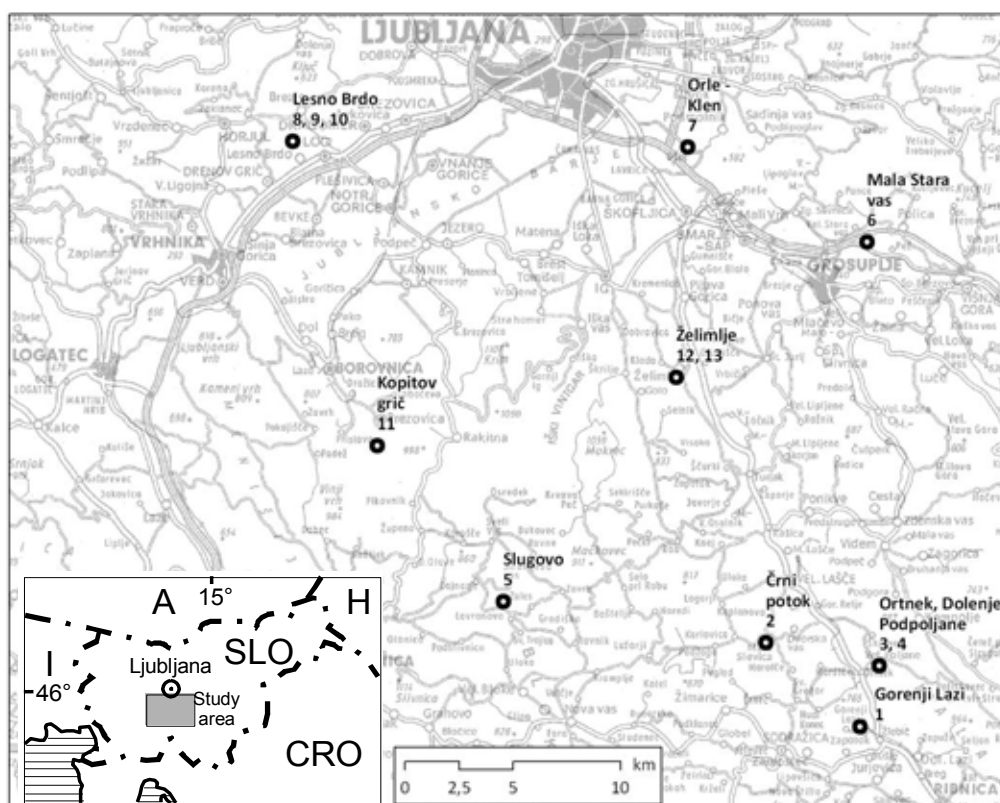


Fig. 1.  
Map of sampling sites  
Sl. 1.  
Karta odvzema vzorcev

most part of the Scythian beds occurs 3.5 to 4.5 m thick bedset of dark grey to black (coaly like) carbonate rocks (mainly dolostone). The uppermost Scythian sedimentary succession is overlain by about 60 m thick sequence of pale yellowish grey bedded and massive Anisian dolomite, covered by thick-bedded medium light grey biointrasparitic and biolithitic limestones of the Cordevolian age. Sample 2 was taken from greyish black Scythian dolostone (Figs. 3, 4).

#### Podpoljane quarry (sample 3)

The Dolenje Podpoljane quarry is situated at the road Velike Lašče – Ortnek (Fig. 1) along which variegated Lower Triassic (Scythian) clastic sediments and dolostones are exposed. Sample 3 was taken from the greyish black dolostone (Figs. 3, 4). Scythian beds in the Podpoljane quarry (Fig. 2c) are tectonically highly deformed. They form a syncline dipping approximately to the north. Ten metres thick synclinal core is built of black platy carbonate sediments (limestone, dolostone, marlstone) intercalated by up to 20 cm thick seams of dark grey to black (coal-like) mudstone (Fig. 2c). This dark grey to black organic matter enriched sequence, underlain by bedded and platy yellowish grey to grey sandy dolostone with a distinctive parallelepiped cleavage (Fig. 3) belongs most probably to the Brinje (Cencenighe) member of the Višnja Gora Formation of the Uppermost Scythian age (DOZET, 2000).

#### Ortnek (sample 4)

At Ortnek, at the cross-road Velike Lašče – Žlebič and Ortnek – Velike Poljane (Fig. 1), exposed are Anisian and overlying Ladinian rocks (Fig. 2d,

3). Thirty metres thick Anisian lithological interval is composed of light massive dolostone. It is concordantly overlain by the Ladinian carbonate sequence that may be separated in two parts. The lower part is composed of greyish black limestones alternating with dark olive grey marlstones (Fassanian), whereas the upper part is composed of rosy and reddish brown bedded intrasparitic limestones with red marlstones, claystones and black limestones (Langobardian). In the described sequence, Ladinian conodonts have been determined. Within the Anisian dolomite succession, a 7.5 m thick horizon of black marlstone and coaly claystone containing several intercalations of black dolomite, dolomitic breccia and up to 25 cm thick seams and bodies of hard coal occurs.

#### Slugovo quarry (sample 5)

The Slugovo quarry is situated in the Cerkišnica valley N of Bloke (Fig. 1). Ladinian dark coloured bedded limestone with dark, organic matter enriched interbeds of platy micritic limestone (mudstone), marlstone and claystone is exposed in this quarry (Fig. 2e). Sample 4 (Figs. 3, 4) was taken from the micritic limestone. In a broader frame, these rocks belong to the lower part of the so called Slugovo Formation (RAMOVŠ, 1994/95; DOZET & BUSER, 2009). The upper unit of the Slugovo Formation is built of medium-grey, grey and medium dark grey, sometimes banded biomicritic, micritic and intramicritic limestone. The uppermost part of the upper unit consists of platy and bedded, dark micritic limestones and interbeds of reddish marlstones and shaly claystones. According to RAMOVŠ (1995), conodonts indicate the Upper Fassanian age of the investigated rocks.



Fig. 2. Photographs of sample sites – for sample position and age see also Fig. 3, and for composition see Tab 1 (all photographs from the years 2005 to 2010):

Sl. 2. Fotografije mest odvzema vzorcev – za položaj vzorcev in starost glej tudi sliko 3, za sestavo pa tabelo 1:



a) Site of **sample 1**: Sample 1 was taken from a lense-like bed, 0.5–1.0 m thick, of greyish-black carbonate mudstone (Tab. 1) within carbonate Upper Permian beds in the Gorenji Lazi quarry at Ortnek.

a) Mesto odvzema **vzorca 1**: vzorec 1 je bil vzet iz 0,5–1,0 m debele lečaste plasti sivo-črnega karbonatnega muljevca (tab. 1) znotraj karbonatnih zgornjepermskih plasti v kamnolomu Gorenji Lazi pri Ortneku.



b) Upper Permian light stromatolitic bedded dolomite above the greyish-black (sample 1) carbonate mudstone (Gorenji Lazi quarry).

b) Zgornjepermski svetli stromatolitni plastnati dolomit nad sivo-črnim karbonatnim muljevcem (vzorec 1).

#### Mala Stara vas (sample 6)

At this locality at Grosuplje (Figs. 1, 2f, 3) were observed alternating black to grey and light strata of limestones of the Carnian age. The black lithological varieties, from which sample 6 was taken (Fig. 4), were found to be prevalingly non-carbonate. Due to tectonic effects, the rock is highly crushed at this locality.

#### Orle–Klen (sample 7)

The Orle–Klen locality is situated about ten kilometres SE of Ljubljana (Figs. 1, 2g). It is a part of the Grosuplje–Orle Formation, a variegated succession of paralic and shallow marine sedimentary rocks between the Cordevolian *Di-*



c) Site of **sample 3**: Several metres thick horizon of platy black limestone with thin black (coaly-like) mudstone layers is lying between two lighter bed-sets of dolomite. Sample 3 is from black mudstone. Age of the whole sequence is Upper Scythian. Locality is the Podpoljane quarry at Velike Lašče.

c) Mesto odvzema **vzorca 3**: Nekaj metrov debelo zaporedje plastnatega in ploščatega črnega apnenca, ki se menjava s plastmi črnega muljevca, leži med dvema paketoma plastnatega dolomita. Vzorec 3 je vzet iz črnega muljevca. Starost plasti v celoti je zgornjeskitijska. Lokacija je kamnolom Podpoljane pri Velikih Laščah.



d) Site of **sample 4**: On the upper right of the photo is black bedded limestone (strongly weathered at the surface), from which sample 4 was taken. Lighter rock below the black limestone and on the left side of the photo is light-grey massive Anisian dolomite. Locality is Ortnek.

d) Mesto odvzema **vzorca 4**: Na desni strani fotografije je črn plastnat apnenec (na površini močno preperel), iz katerega je bil vzet tudi vzorec 4. Pod njim in na levi strani fotografije je viden svetlo-siv anizijski dolomit. Lokalnost je odcep od Ortneka proti Velikim Poljanam pri Ortneku.

*plopura* limestone or/and dolomites and the Main Dolomite Formation. The Grosuplje–Orle Formation is therefore of the Julian–Tuvanian age and is composed of colourful succession of limestones and marlstones interbedded by conglomerates, breccias, sandstones, shales and tuffs (Fig. 3). A particularity of this rock succession is coal of the anthracite rank (Rm%: 4.5 – by HAMRLA, 1987) that lies in the lower part of the Grosuplje–Orle Formation, i.e. in the Julian beds. Coaly matter, black shale and black limestone strata are visible in Fig 2g. As described in the older documentation, coal occurs in the form of up to 1.5 m thick seams as well as in plates and lenses. The thickness of the coal is variable in horizontal and vertical direction. Due to intensive tectonics, the coal thick-



Fig. 2. Photographs of sample sites – for sample position and age see also Fig. 3, and for composition see Tab 1 (all photographs from the years 2005 to 2010):

Sl. 2. Fotografije mest odvzema vzorcev – za položaj vzorcev in starost glej tudi sliko 3, za sestavo pa tabelo 1:



**e)** Site of **sample 5**: This photo shows bedded Ladinian limestone. Very thin beds of dark marlstone and black shale occur as inter-layers at the bottom of the shown sequence. Sample 5 was taken from black shale. Locality is the Slugovo quarry in the Cerknjščica valley N of Bloke.

**e)** Mesto odvzema **vzorca 5**: Slika prikazuje plastnat ladinjski apnenec v kamnolomu Slugovo v dolini Cerknjščice severno od Blok. Zelo tanke med-plasti (lezike) laporja in črnega glinavca nastopajo zlasti v spodnjem delu fotografirane sekvence. Vzorec 5 je bil vzet iz črnega glinavca.



**f)** Site of **sample 6**: Alternation of black and light strata of the Carnian age termed as the Grosuplje-Orle Beds. Sample 6 is from Si-rich black strata. Locality is Mala Stara vas at Grosuplje.

**f)** Mesto odvzema **vzorca 6**: Menjavanje črnih in svetlih karnijskih plasti, imenovanih Grosupeljsko-oreljske plasti. Vzorec 6 je bil vzet iz Si-bogatih temnih plasti. Lokalnost je Mala Stara vas pri Grosupljem na Dolenjskem.

ness can locally enlarge up to 4 m. Coal seams pass laterally and vertically in coaly shales and claystones. At the Klen locality near Orle, three anthracite seams (50, 50 and 120 centimetres thick) were mined in the past (until 1948). Entrance into the mine is still visible (Fig. 2h). Sample 7 – anthracite (Fig. 4) – was taken from a waste dump site close to the mine.

#### Lesno Brdo (samples 8, 9, and 10)

In the Lesno Brdo area, which is situated about 10 km SE from Ljubljana (Fig.1) and N of Drenov Grič, three quarries of limestone are known for



**g)** Site of **sample 7**: Sample 7 is anthracite which occurs in black strata like visible at the right of the photo. The black strata are composed of black shale, black limestone, and of thin beds (< 1 m) and lenses of anthracite of a limited spatial distribution. Anthracite was mined before 1948 in the Orle-Klen mine in the close vicinity. The black formation is underlain by typical platy violet-red jasper-quartz-carbonate sandstone on the left side of the photo. Whole sequence is of the Carnian (Julian-Tuvalian) age with typical macrofauna of this stage.

**g)** Mesto odvzema **vzorca 7**: Vzorec 7 je antracit, ki se nahaja v črnih plasteh, kot jih vidimo na desni strani fotografije. Te črne plasti sestavljajo muljevci, plasti črnega apnenca in leče ter plasti (< 1 m) antracita, ki so ga odkopavali pred letom 1948 v bližnjem rudniku Orle-Klen. Pod »črnimi plastmi«  
leži-  
jo značilne plasti vijolično-rdečega jaspisno-kremenovo-karbonatnega peščenjaka (na levi strani fotografije). Plasti so v celoti karnijske (julsko-tuvalske) starosti z značilno karnijsko makrofavno.



**h)** Entrance into the abandoned coal (anthracite) mine Orle-Klen. Dark limestone in the roof of the mine entrance is Carnian limestone, whereas lighter rock at the left and right of the photo is Cordevolian dolostone.

**h)** Vhod v opuščeni rudnik antracita Orle-Klen. Temen apnenec v stropu rova je karnijski apnenec, svetlejša kamnina na levi in desni strani slike pa je kordevolski dolomit.





**i)** Site of **samples 8, 9 and 10**: Dark bedded limestone with interbeds of black marlstone, limestone (samples 8 and 9) and claystone (sample 10). All three samples are taken from the lowermost three interbeds. Locality is the Lesno Brdo quarry.

**i)** Mesto odvzema **vzorcev 8, 9 in 10**: Temni plastnati apnenec z vmesnimi tankimi plastmi črnega laporja, apnenca (vzorca 8 in 9) in glinavca (vzorec 10). Vsi trije vzorci so odvzeti iz spodnjega dela prikazanega zaporedja plasti.



**j)** Site of **sample 11**: Geological hammer marks a bed-set of black marl and shale with a leaf and splinter disintegration pattern. Black bed-set lies within medium dark grey bedded fine-sparry dolostone of the Upper Triassic age. Sample 11 is taken from shale indicated by a hammer. Locality is Strmec at Borovnica.

**j)** Mesto odvzema **vzorca 11**: Geološko kladivo označuje plasti črnega (do sivega) laporja in glinavca z listasto in iverasto krojivijo, ki ležijo med plastmi srednje-sivega plastnatega drobno-sparitnega dolomita zgornjetriassne starosti. Vzorec 11 je iz glinavca. Lokalnost je Strmec pri Borovnici.

centuries by good quality building and statuary natural stone (VESEL et al., 1992; MIRTIČ et al., 1999). The three quarries extend approximately in the W–E direction. The western one is opened in the Cordevolian limestone of a rosy colour, micritic, and with lenses and nests of red, pur-



**k)** “Main dolomite” (“Hauptdolomit”) i.e. Upper Triassic (Norian and Rhaetian) light dolostone in the Želimlje quarry. It contains very rare and very thin black to dark grey beds or laminae of bituminous carbonate or siliciclastic mudstones. **Samples 12 and 13** were taken from such thin lithologies – sample 12 being a siliciclastic mudstone whereas sample 13 a carbonate mudstone

**k)** Norijsko-retijski »glavni dolomit« v kamnolomu Želimlje. Ta dolomit lahko vsebuje zelo tanke plasti temnega karbonatnega ali pa siliciklastičnega muljevca z vonjem po bitumnu. Iz takih zelo tankih plasti sta bila odvzeta **vzorca 12** (siliciklastični muljevec) in **13** (karbonatni muljevec).

ple and greenish claystone (paleo-carstification). Laterally out of the quarry, and vertically downwards, this limestone transits to a light grey Cordevolian sparitic dolostone and limestone with a typical alga *Diplopora annulata* Schafhäütl. The two quarries to the east are opened in a prevalently dark grey to black micritic limestone beds (Figs. 2i, 3) from which samples 8 and 9 were picked out. In a jargon, these two quarries, which are not actively exploited at the present, were called “the black quarries”. Dark limestone was defined to be of the Julian (middle Carnian) age. However, the basement of this black limestone succession, which lies discordantly upon the Cordevolian dolomite, is composed of yellowish grey, somewhere poorly oolitic claystone passing locally into the iron-rich oolitic bauxite or a transgressive limestone conglomerate with a red clayey and limonitic groundmass. Upwards follows a clastic rock unit, which is about 15 m thick. It is composed of dark marlstone, mudstone and claystone (sample 10) with several seams of anthracite. Between 1900 and 1905, three of four known anthracite seams have been ascertained there with exploration trenches and a shaft. Individual seams were from 1.0 to 1.5 m thick. Between 1901 and 1902, the anthracite was excavated but very soon later the exploitation was stopped. Namely, due to numerous faults and displacements along the fault-surfaces, the coal seams disappeared already at short distances. A great problem was also underground-water. The anthracite-bearing unit is overlain by about 20 m thick sequence of a dark thick-bedded limestone, intercalated by shaly marlstone and claystone.

Borovnica, Kopitov grič, Strmec (sample 11)

Kopitov grič (Fig. 1) is a well known locality by occurrences of Carnian bauxite being formed as the consequence of chemical weathering of aeri-ally exposed carbonate rocks of either Cordevo-

lian or Ladinian and Anisian carbonates (RAMOVŠ, 1953; BUSER, 1965, 1976; DOZET, 1975, 1978, 1979, 2004; CELARC, 2008). It is also known by occurrence of oolitic iron ore. Carnian strata above bauxite horizon are mainly clastites and limestones. Carnian beds pass gradually into the Norian-Rhetian dolostone (Main dolomite Formation). Light and dark, platy and bedded, fine-laminated and fine-stromatolitic dolostones with dark, bituminous marlstone and shale (Fig. 2j) form the »transitional beds« between the »true« Carnian and »true« Norian-Rhetian carbonates (Fig. 3). Sample 11 (Fig. 4) was chosen from a shale. Owing to an intensive weathering, the dark marlstone and shale became yellowish grey. Within marlstone, there occur sporadic inter-beds and lenses of hard coal and coaly shale, and marlstone.

Želimplje quarry (samples 12 and 13)

The Želimplje quarry (Figs. 1, 2k) is opened in a very typical light and bedded Main Dolomite Formation (»Hauptdolomit«) of the Norian age

(Fig. 3). This dolostone is micritic and fine-stromatolitic, respectively. What is interesting for this paper is that it contains about 25 cm thick and 7 m long lens-like seam of a very dark grey marlstone/claystone having an appearance of coaly shale. Samples 12 and 13 (Fig. 4) were analysed from the mentioned black to dark grey lens-like seam.

### Results of chemical and microscopic analyses and discussion

Geologic position of investigated samples is given in Fig. 3. Chemical analysis of major elements (as oxides), is given in Tab. 1. As visible from Fig. 3, only one sample is Permian, whereas all others are Triassic.

Colour of samples varies from black (N1) to medium dark grey (N4) (Fig. 4). Structure of samples is massive to laminar. All samples are well lithified.

Chemical analysis shows that the samples are composed predominantly of either  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  or

STAROST AGE		GEOLOŠKI STOLPEC GEOLOGIC COLUMN	VZOREC SAMPLE	LOKACIJA LOCALITY	LITOLOGIJA LITHOLOGY					
TRIASSIC	ZGORNJI UPPER	SREDNJI MIDDLE	13 12 11 10 9 8	Kamnolom Želimplje Želimplje quarry	Glavni dolomit Main Dolomite ("Hauptdolomit")					
						450 m	Kopitov grič (Borovnica)	Temnosiv dolomit, laporovec Dark grey dolostone, marlstone		
									Lesno Brdo	Temni, plastnati apnenci in ploščasti laporovci
									Orle - Klen	Temni apnenci - Dark limestones
	250-350 m	a) Kamnolom Slugovo Slugovo quarry	Temni apnenci in laporovci Dark limestones and marlstones							
				b) Ortnek	Svetel in temen dolomit, laporovec Light and dark dolostone, marlstone					
	300-350 m	Kamnolom Podpoljane Podpoljane quarry	Temen apnenec, dolomit, laporovec, Dark limestone, dolostone, marlstone							
				300-350 m	Črni potok (Mala Slevica)	Rumenkastov peščen dolomit Yellowish grey sandy dolostone				
	150-350 m	Kamnolom Gorenji Lazi Gorenji Lazi quarry	Temni dolomiti, apnenci, oolitni apnenci in laporovci Dark dolostones, limestones, oolitic limestones and marlstones							

Fig. 3. Compiled litho-stratigraphic column of the studied rock-frame. Signed are positions of studied samples.

Sl. 3. Litostratigrafski stolpec obravnavanih kamnin z označenimi mesti odvzetih vzorcev.



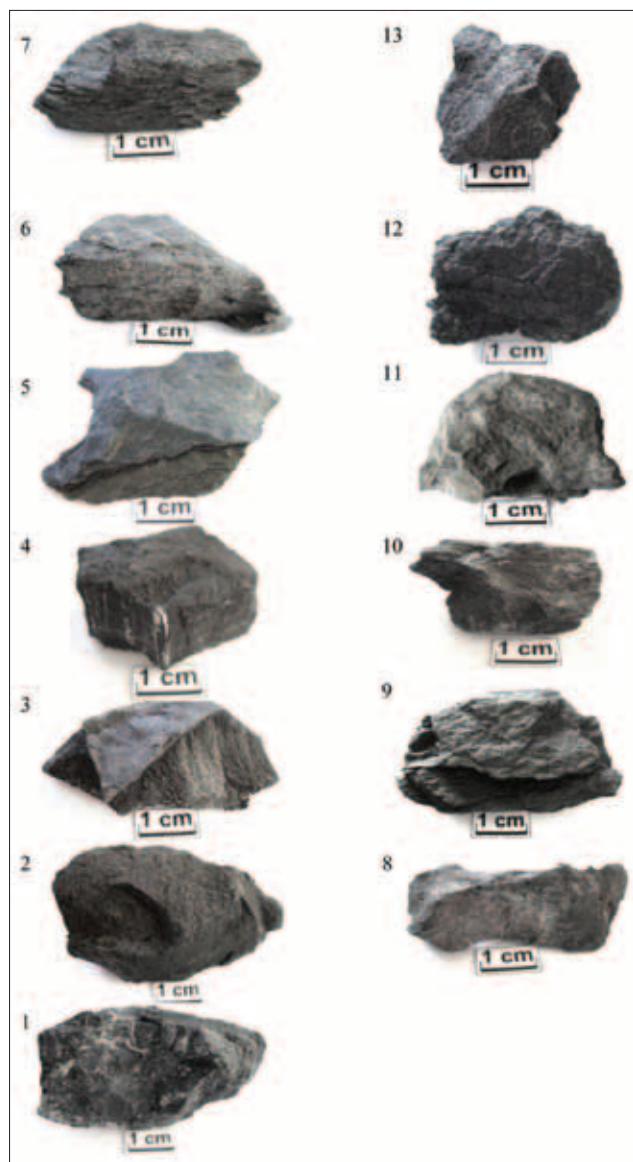


Fig. 4. Photographs of 1-13 samples – note their dark colour (N1 - N4) and structure from massive to laminated.

Sl. 4. Fotografije vzorcev 1-13. Značilna je njihova temna barva (N1-N4) ter tekstura, ki se spreminja od masivne do laminirane.

CaO + MgO components. SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> versus CaO + MgO relation for all samples numbered 1–13 is plotted in Graph 1. Prevaingly SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples are termed mudrocks (mudstones if massive and shales if laminated), whereas prevaingly CaO + MgO are termed carbonate mudrocks, if strongly reacting with a diluted HCl, they are called limestones.

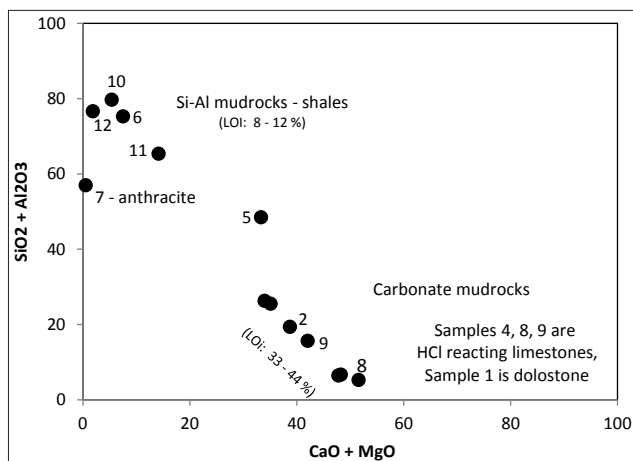
Table 1.

Bulk chemical and isotopic composition of investigated samples 1-13. For location of samples see Figs. 1, 2 and 3. Chemical analyses were done at the ACME Laboratory (Canada), isotopic analyses were done at the Jožef Stefan Institute.

Tabela 1.

Kemična in izotopska sestava preiskanih vzorcev 1-13. Za mesta odvzemov vzorcev glej slike 1, 2 in 3. Kemične analize so bile narejene v laboratoriju ACME (Kanada), izotopske pa na Inštitutu Jožef Stefan.

Age	Samples		HCl react.	Colour	Major Element Analysis (as major oxides) and Loss on Ignition (LOI)													δ <sup>15</sup> N ‰	δ <sup>13</sup> C <sub>CaCO<sub>3</sub></sub> ‰	δ <sup>13</sup> C <sub>org</sub> ‰			
	Pld. No.	No.			SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	MnO %	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	LOI %	TOT/C %				TOT/S %	CaO + MgO %	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %
Upper Triassic	204	13	N3		19.17	7.11	2.79	13.01	20.97	0.08	2.53	0.2	0.03	0.04	<0.002	33.8	9.9	0.51	33.98	26.28	1.9	-24.6	6
	205	12	N1		53.13	23.51	2.96	1.54	0.34	0.17	7.76	0.52	0.08	<0.01	0	9.8	2.35	0.98	1.88	76.64	2.3	-24.5	9.1
	210	11	N4		53.01	12.39	2.47	11.26	2.9	0.23	5.15	0.25	0.02	<0.01	<0.002	12.1	1.22	<0.02	14.16	65.4	0.24	-21.6	n.a.
	201	10	N2	Yes	57.8	21.9	1.1	0.54	4.84	0.48	1.82	0.63	0.03	0.01	0	10.7	2.18	0.12	5.38	79.72	1.06	-24.5	5.1
	202	9	N2	Yes	11.77	3.92	1.07	0.77	41.31	0.13	0.7	0.13	0.25	0.06	0	39.8	14.3	0.23	42.08	15.69	5.36	-34.7	7.7
	203	8	N2	Yes	3.6	1.66	1.61	0.92	50.7	0.06	0.35	0.06	<0.01	0.02	<0.002	40.9	12.2	0.75	51.59	5.26	1.54	-24.8	6.2
	211	7	N1		37.1	19.91	2.83	0.38	0.14	0.2	0.42	0.77	<0.01	<0.01	0.01	38.1	30.6	1.39	0.52	57.01	30.61	-23.5	6.9
	213	6	N4		60.71	14.6	2.36	0.51	6.99	0.48	3.86	1.93	0.02	0.01	0.01	8.2	1.8	0.6	7.5	75.31	0.4	-24	4.6
	206	5	N1		47.36	1.14	0.36	25.0	8.31	0.17	0.33	0.03	<0.01	<0.01	<0.002	16.9	3.42	<0.02	33.35	48.5	0.35	-22	n.a.
	212	4	N1	Yes	4.04	2.39	1.65	16.56	31.22	0.03	0.4	0.08	0.01	0.06	<0.002	43.2	13	0.52	47.78	6.43	1.92	-30.7	6.8
	208	3	N2		18.32	7.19	2.29	14.91	20.21	0.11	2.44	0.24	0.06	0.04	0	33.9	8.94	0.62	35.12	25.51	0.73	-27.6	6
	207	2	N2		12.62	6.77	1.63	14.75	24	0.05	1.13	0.22	0.05	0.05	0	38.4	11	0.12	38.75	19.39	1.84	-29.9	n.a.
	209	1	N2		5.28	1.41	0.58	18.8	29.5	0.03	0.38	0.04	<0.01	0.02	<0.002	43.4	12.6	0.36	48.27	6.69	1.15	-26.5	n.a.



Graph 1. CaO + MgO versus SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio  
 Graf 1. Razmerje CaO + MgO proti SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Clearly limestones are samples number 4, 8 and 9, intensively reacting with 1:10 diluted HCl acid (Tab. 1, Graph 1). These samples are characterized by highly predominant CaO content and high loss on ignition (LOI) – between 40 and 43 %. Their CaO + MgO content is 42–52 %. In the Upper Triassic samples 8 and 9, MgO content is below 1 %, whereas MgO content is relatively much higher in the Middle Triassic sample 4 in which MgO : CaO ratio is close to 1 : 2. All three samples are black to greyish-black (Fig. 4). Sample 9 is outstanding by its C<sub>org</sub> content which amounts to over 5 %. Microphotographs of samples 4 and 9 are shown in Figs. 5a and 5b. Sample 4 in Fig. 5a shows granular structure with more or less grown-together carbonate grains (bright grey colour), which still show euhedral forms up to 10–20 μm in size. Fossils were not found in this sample. Black colour (C<sub>org</sub> ca. 2 %) and pyrite (Fig. 5a – right side) clearly indicate anoxic environment of formation of this black limestone. Black fields of approximately the same size as individual carbonate grains, or somewhat smaller, are pores. They seem to be more or less empty and quite well connected. Porosity, considerably effective, can be estimated to about 30 %. This characteristic can classify this limestone as a good reservoir rock. On the other hand, it might also be a source rock for oil and/or gas generation.

Sample 9 (Fig. 5b) can be classified as a micritic limestone with broken fragments of molluscs. As already mentioned, it contains more than 5 % C<sub>org</sub>. Organic matter is finely dispersed within dark micritic matrix. In addition, fragments of blown-in coal (vitrinite) particles can be found (see highly magnified insert picture in Fig. 5b), but they are very rare (below 1 %). Such rocks might be source rocks for oil and/or gas generation at sometime in the geological past after their deposition.

Also carbonates are samples number 1, 2, 3, and 13, with MgO + CaO varying between 34 and 49 %, CaO and MgO both taking considerable shares. CaO content varies between 20 and 30 % and MgO content between 13 and 19 %. Due to carbonate composition, also these samples exhibit high LOI – between 34 and 43 %. Sample 13 (Fig. 5c) contains fragmental fusinite.

On the contrary to the above described limestones, clearly mudrocks are samples number 6, 10, 11, 12 (all Upper Triassic) (Tab. 1, Graph 1). All these samples contain 65–80 % SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. SiO<sub>2</sub> : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio varies between 2.3 and 4.3 : 1. They are predominantly composed of quartz and clay minerals. Among clay minerals, remarkable MgO and K<sub>2</sub>O contents may indicate small occurrences of chlorite and illite, or, feldspars. They are very poor in organic matter, except for sample 12, which is black (N1) and contains 2.3 % C<sub>org</sub> which is almost equal to C<sub>tot</sub>. Other samples contain less than 1 % C<sub>org</sub>. Samples 10 and 12 are shown in microphotographs in Figs. 5d and 5e.

Sample 5 – Anisian dolomite (silicified) – is the most Mg characterized sample (Graph 1). Its chemical composition (considerable shares of SiO<sub>2</sub>, and MgO, very subordinate CaO and negligible Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) indicates presence of quartz, dolomite and subordinately calcite.

Sample 7 is anthracite from Orle. This anthracite occurs in the Carnian limestone. It was sampled on the waste dump because there was no possibility to gain fresh samples from the interior of the abandoned mine. As visible from Figs. 5f and g, this anthracite is composed of detro- and telovitrinite. Typical are dark oval structured “bodies” filled with clay (note almost exclusive SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composition of the inorganic matter for this sample in Graph 1).

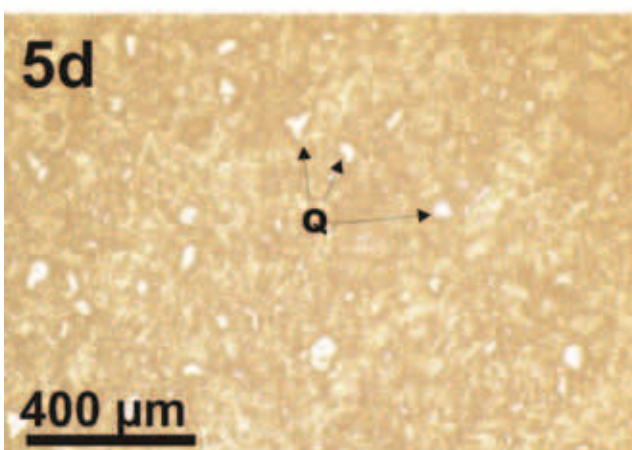
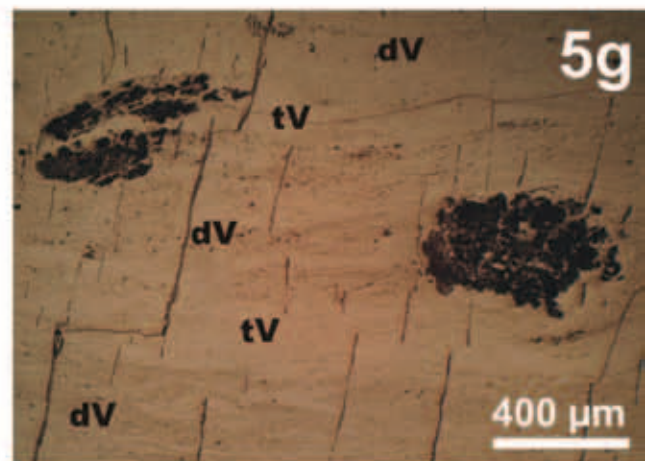
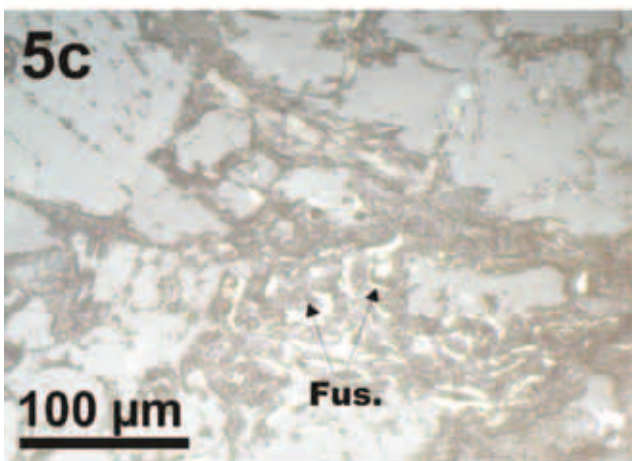
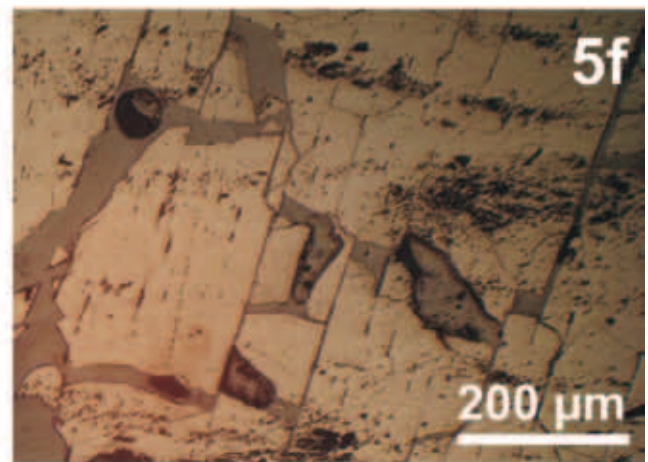
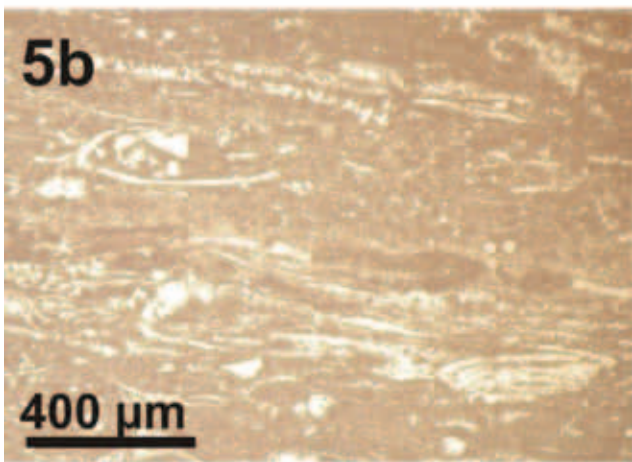
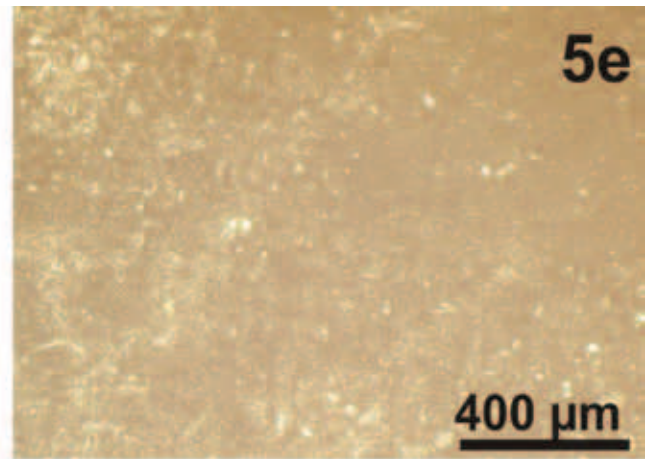
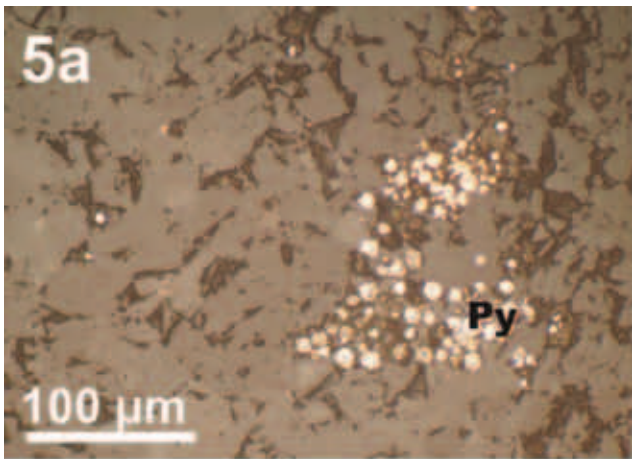
Fig. 5. Microphotographs of selected samples prepared as polished blocks – all in normal white polarized light in air (For sample numbers and chemical composition see Graphs 1-6).

- Sample 4: Limestone (calcite) with framboidal pyrite (Py).
- Sample 9: Micritic limestone with broken shells of molluscs.
- Sample 13: Carbonate rock with fragmental fusinite (Fus).
- Sample 10: Si-Al mudstone with relatively big quartz (Q) grains
- Sample 12: Si-Al mudstone
- Sample 7: Anthracite from Orle
- Sample 7: Anthracite from Orle – telovitrinite (tV) and detrovitrinite (dV)

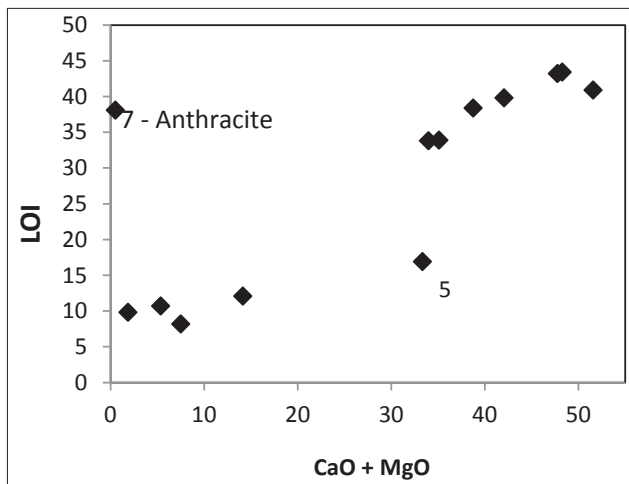
Sl. 5. Mikrofotografije izbranih vzorcev, pripravljenih kot poliranih obruskov – slikano v normalni beli polarizirani svetlobi v zraku.

- Vzorec 4: apnenec s feamboidalnim piritom (Py).
- Vzorec 9: mikritni apnenec z zlomljenimi lupinami moluskov
- Vzorec 13: karbonatna kamnina z odlomki fuzinita (Fus.)
- Vzorec 10: Si-Al glinavec z razmeroma velikimi zrnici kremena (Q)
- Vzorec 12: Si-Al glinavec
- Vzorec 7: antracit z Orel
- Vzorec 7: antracit z Orel – telovitrinit (tV) in detrovitrinit (dV)



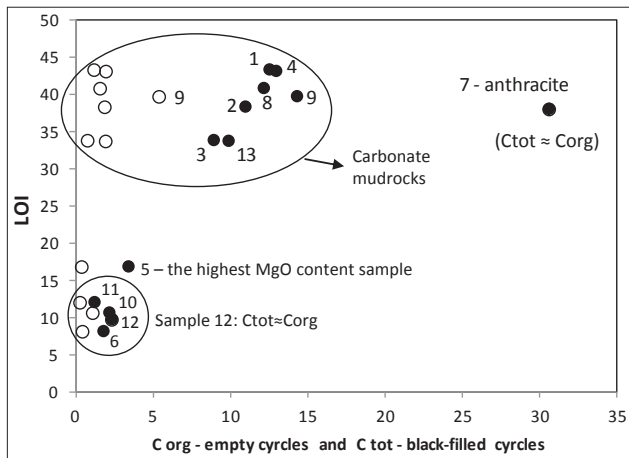






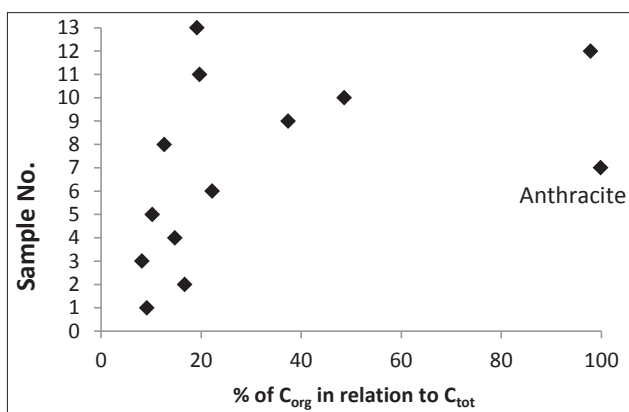
Graph 2. Loss on ignition (LOI) as a function of CaO + Mg content

Graf 2. Žaroizguba kot funkcija vsebnosti CaO + Mg



Graph 3.  $C_{org}$  and  $C_{tot}$  contents, and loss on ignition (LOI)

Graf 3. Vsebnosti organskega ( $C_{org}$ ) in skupnega ( $C_{tot}$ ) ogljika ter žaroizguba (LOI).



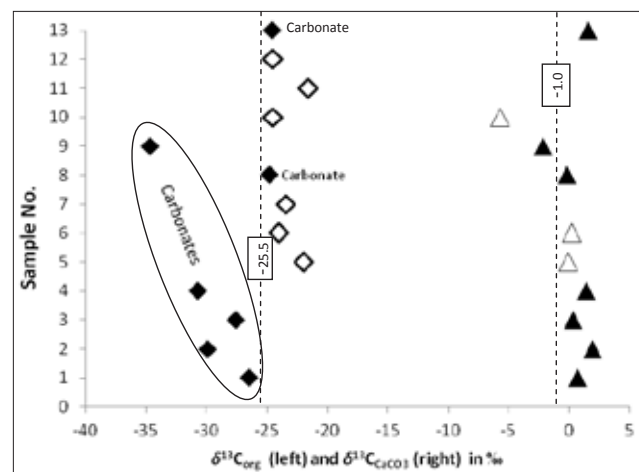
Graph 4. Percent of  $C_{org}$  in relation to  $C_{tot}$  for samples 1-13

Graf 4. Delež (%) vsebnosti  $C_{org}$  v celotnem ogljiku ( $C_{tot}$ )

Because both relatively significant organic matter and carbonate matter were expected to be present in the samples,  $C_{tot}$  and  $C_{org}$  were analysed. In most samples, LOI was found to be primarily dependant on carbonates (Graph 2). Relation between forms of carbon ( $C_{org}$  and  $C_{tot}$ ) and LOI is shown in Graph 3. Percent of  $C_{org}$  in relation to  $C_{tot}$  is shown in Graph 4. In general (nine of thirteen

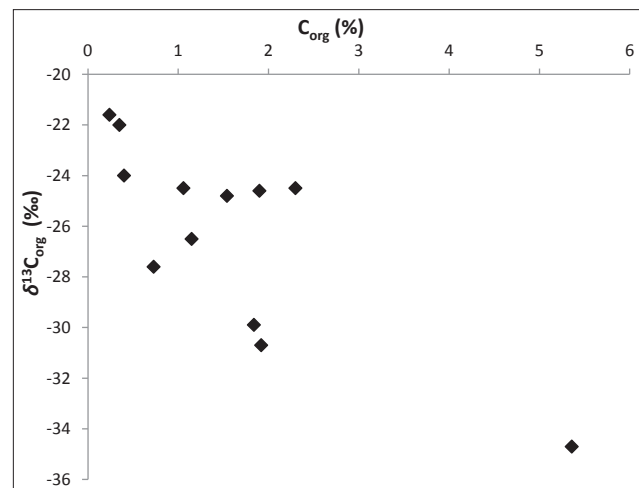
samples), it is below 20–25 %. In two samples, it is around 40 %, and in two samples (7 and 12) it is 98 and 100 %, respectively.

$C_{org}$  varies in all samples from 0.25 to 2.30 %. Only in sample 9 (Carnian limestone), it is 5.36 %, and in the anthracite sample 7, it is 30.61 % (Tab.1, Graph 3). Carnian limestone is regionally well known by its black colour. Due to Alpine tectonics, it is thoroughly folded and fissured, the fissures being filled with calcite. It contains black laminated interbeds and locally hosts even thin beds and lenses of coaly matter. The Orle anthracite (sample 7) (see also introduction) occurs in such beds. Similar occurrences of bituminous



Graph 5. Isotopic composition of organic and of calcite carbon expressed by  $\delta^{13}C_{org}$  and  $\delta^{13}C_{CaCO_3}$  values.

Graf 5. Izotopska sestava organskega in kalcitnega ogljika, izražena z vrednostmi  $\delta^{13}C_{org}$  in  $\delta^{13}C_{CaCO_3}$ .



Graph 6. Relation between  $C_{org}$  content and  $\delta^{13}C_{org}$  value (marked are three outstanding samples).

Graf 6. Relacija med vsebnostjo  $C_{org}$  in  $\delta^{13}C_{org}$  vrednostjo (označeni so trije izstopajoči vzorci).

coal to anthracite are also known at some other localities (Ligojna, Drenov Grič). Further-on, also from previous investigations, Carnian limestone is well known by its outstanding  $C_{org}$  content. Namely, OGORELEC et al. (1996), in their regional study about the Permian and Mesozoic carbonate rocks of W Slovenia as potential source rocks for hydrocarbon generation, clearly show the highest  $C_{org}$

content in the Carnian limestone beds. According to their data (OGORELEC et al., 1996 – their Fig. 2),  $C_{org}$  content in the Carnian limestone considerably exceeds 2 % and is markedly the highest in comparison to all other Permian, Mesozoic and even Paleocene (Liburnian) formations, where it does not exceed 1%.

In organic matter of the investigated samples,  $\delta^{13}C_{org}$  varies between -34.7 and -21.6 ‰ (Graph 5). In most carbonate mudrock samples, except for samples 8 and 13,  $\delta^{13}C_{org}$  is below -25.5 ‰. In more Si-Al mudrocks and the anthracite sample,  $\delta^{13}C_{org}$  is somewhat above -25.5 ‰. Maybe, this slight partition could be attributed to different diagenetic effects of organic matter in different geochemical media, namely carbonate (alkaline) and silico-aluminous (acid), respectively. Alkaline environment is well known to be an enhancer of biochemical transformation of organic matter (e.g. TAYLOR et al., 1998). Another reason could be different types of original organic matter. The most negative  $\delta^{13}C_{org}$  value of -34.7 ‰ was analysed in sample 9, which is the most organic-rich limestone sample. Depletion in  $^{13}C_{org}$  (decreasing in  $\delta^{13}C_{org}$  values to more negative values) correlates quite remarkable with increasing  $C_{org}$  content (Graph 6).

$\delta^{13}C_{org}$  values for our carbonate samples, which are mostly below -25.5 ‰, are comparable to those in DOLENEC & OGORELEC (2001).

Isotopic composition of the calcite carbon ranges from  $\delta^{13}C_{CaCO_3}$  -5.7 to 1.9 ‰, but mostly between -1.0 and 1.9 ‰ (Graph 5). There is almost no dependence in isotopic composition of calcite carbon referring to lithology and bulk chemical composition of the investigated samples. In comparison to results of isotopic composition of calcite carbon in Mesozoic carbonate rocks published by OGORELEC et al. (1999), our samples correspond to their organic-rich limestones, dedolomites and diagenetically altered dolomites, respectively.

Isotopic investigations of nitrogen, expressed by  $\delta^{15}N$  values, also do not express distinctive differences in respect to lithology. They vary between 4.6 and 9.1 ‰. Both extreme values refer to Si-Al rich rock samples 6 and 12 (Tab. 1). The whole range of isotopic composition of nitrogen is comparable to soil material investigated in the watershed of the Idrijca River (KANDUČ et al., 2008).

## Conclusions

This study was performed as a preliminary study to investigate some varieties of so called black mudrocks occurring as more or less thick bed-sets within Upper Permian and Triassic carbonate rocks in the area between Ljubljana and Bloke, recently geologically mapped by the first author. For this purpose, 13 samples of dark grey to black interbeds within mainly carbonate rocks were collected. For all sites of sampling, detailed textual and photographic descriptions with representative citations of previous researchers

are given in this paper. The samples were investigated chemically, microscopically and by isotopic composition of carbon and nitrogen. At the first glimpse, on the field, the samples resembled to coaly materials, but in fact, only one sample was really coaly – the Orle anthracite – in fact authracitic minerite. All other 12 samples were clearly grouped into Si-Al mudrocks with 65–80 %  $SiO_2 + Al_2O_3$  and into carbonate mudrocks with less than 25 %  $SiO_2 + Al_2O_3$ , more than 35 %  $CaO + MgO$  and ca. 35–45 % loss on ignition (at 1000 °C) derived from decomposition of carbonates.  $C_{org}$  of four samples (mostly siliciclastic mudrocks) was below 1 %. It was somewhat higher in carbonate mudrocks, up to 2.3 %, and the highest in sample 9 (HCl reacting limestone) which contained 5.36 %  $C_{org}$ . According to the SCHLUMBERGER Oil Field Glossary, rocks with 1 to 4 %  $C_{org}$  can be termed as fair to good oil/gas source rocks, and those with more than 4 % as very good source rocks. It can be concluded that carbonate mudrocks are better source rocks than Si-Al mudrocks.

Detailed field observations at localities of sampling, broader regional geological information and results of microscopic and chemical analyses indicate in general that the Upper Permian as well as Triassic organic matter enriched carbonate and noncarbonate (siliciclastic) sediments accumulated in relation to transgressive-regressive cycles in restricted shallow lagoonal environments (with more or less intensive water and organic matter influxes from the hinterland terrains).

Isotopic composition of organic carbon slightly differs between Si-Al mudrocks and carbonate mudrocks. In first case,  $\delta^{13}C_{org}$  is somewhat above -25.5 ‰, and in the second case somewhat below -25.5 ‰. The whole range of  $\delta^{13}C_{org}$  values for all samples varies from -34.7 to -21.6 ‰. The reason could be isotopic differentiation due to different diagenetic effects in organic matter in different original litho-geochemical environments – either Si-Al (relatively acid) or carbonate (relatively alkaline).

Isotopic composition of calcite carbon varies between  $\delta^{13}C_{CaCO_3}$  -5.7 and 1.9 ‰. The results did not show dependence on lithological and/or chemical composition of the investigated samples, but are well comparable to organic-rich limestones, dedolomites and diagenetically altered dolomites as thoroughly defined by OGORELEC et al. (1999). Isotopic investigations of nitrogen also did not show distinctive differences in respect to lithology.  $\delta^{15}N$  values varied between 4.6 and 9.1 ‰. Both extreme values were analysed in Si-Al mudrocks.

This study showed some approaches and contributions to previous investigations, especially those of oil and gas potential of carbonate rocks having been carried out by OGORELEC et al. (1996) and RAINER et al., (2002), as well as to previous isotopic studies of Mesozoic carbonate rocks by OGORELEC et al. (1999).

### Acknowledgements

This study was done in the framework of the scientific programme Sedimentology and Mineral Resources P1-0025 (D) financed by the Slovenian Research Agency. A wealth of fundamental geological information of previous investigations was summarized from the Basic Geological Map of Yugoslavia 1 : 100.000 (sheet maps and textual guides for Slovenia). Among our technical collaborators at the Geological Survey of Slovenia, we express our great thanks to Mrs. Duška Živanović, and the young colleagues Sniježana Miletić, and Matjaž Budkovič, to all of them for their graphical support, and to Mrs. Bernarda Bole for the final technical editing of the text and graphics. We are also highly thankful to the reviewers of the paper and their constructive, positive and welcome comments.

### References

- ACME LABS SCHEDULE OF SERVICES & FEES 2009-2010 (www.acmelab.com)
- BUSER, S. 1965: Geološka zgradba južnega dela Ljubljanskega barja. *Geologija*, 8: 34-57.
- BUSER, S. 1969: Osnovna geološka karta SFRJ, list Ribnica 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd.
- BUSER, S. 1974: Tolmač lista Ribnica L 33-76 – Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd: 60 p.
- BUSER, S. 1976: Triasne plasti na listu Ribnica. *Mezozoik v Sloveniji*, 1. faza. Geološki zavod Slovenije: 70 p.
- CELARC, B. 2008: Karnijski boksitni horizont na Kopitovem griču pri Borovnici – ali je v njegovi talnini »pozabljena« stratigrafska vrzel = Carnian bauxite horizon on the Kopitov grič near Borovnica (Slovenia) – is there a »forgotten« stratigraphic gap in its footwall? *Geologija*, 51/2: 147-152, doi:10.5474/geologija.2008.015.
- ČEŠMIGA, I. 1959: Rudarstvo LR Slovenije. Nova proizvodnja 1959 (Glasilo Zveze društev inženirjev in tehnikov LRS): 268 p.
- DOLENEC, M. & OGORELEC, B. 2001: Organic carbon isotope variability across the P/Tr boundary in the Idrija Valley section (Slovenia: a high resolution study) = Variabilnost izotopske sestave organskega ogljika na permsko-triasni meji v dolini Idrije: detajlna študija. *Geologija*, 44/2: 331-340, doi:10.5474/geologija.2001.025.
- DOLENEC, M., OGORELEC, B. & LOJEN, S. 2003: Upper Carboniferous to Lower Triassic carbon isotopic signature in carbonate rocks of the Western Tethys (Slovenia). *Geologica Carpathica*, 54/4: 217-228.
- DOLENEC, M., DOZET S. & LOJEN, S. 2006: Permo-Triassic boundary and Upper Permian as well as Lower Scythian beds in the Southeastern Borderland of the Ljubljana Marsh, Central Slovenia. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 53/2: 229-246.
- DOLENEC, T. & JELEN, B. 1987: Uporaba izotopskih analiz v študiju paleobiologije karnijske školjčne favne na Lesnem Brdu = Application of stable isotope analysis in paleobiological studies of Karnian bivalves from Lesno Brdo. *Geologija*, 30: 449-452.
- DOLENEC, T. & RAMOVŠ, A. 1998: Isotopic changes at the Permian-Triassic boundary in the Idrija Valley (W. Slovenia). *Rudarsko-metalurški zbornik*, 45/3-4: 405-411.
- DOLENEC, T., LOJEN, S. & DOLENEC, M. 1999a: The Permian-Triassic boundary in the Idrija valley (western Slovenia): isotopic fractionation between carbonate and organic carbon at the P/Tr transition. *Geologija*, 42: 165-170, doi:10.5474/geologija.1999.011.
- DOLENEC, T., OGORELEC, B., LOJEN, S. & BUSER, S. 1999b: Meja perm – trias v Masorah pri Idriji. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 46/3: 449-452.
- DOLENEC, T., OGORELEC, B., DOLENEC, M. & LOJEN, S. 2004: Carbon isotope variability and sedimentology of the Upper Permian carbonate rocks and changes across the Permian-Triassic boundary in the Masore section (Western Slovenia). *Facies*, 50/2: 287-299.
- DOZET, S. 1975: Triasne plasti na listu Postojna, 1. faza. *Mezozoik v Sloveniji*. Geološki zavod Slovenije: 110 p.
- DOZET, S. 1978: Biostratigrafski razvoj triasnih plasti na ozemlju lista Postojna. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani-FNT-Oddelek za geologijo: 126 p.
- DOZET, S. 1979: Karnijske plasti južno in zahodno od Ljubljanskega barja = Carnian beds south and west of the Ljubljana Moor. *Geologija*, 22/1: 55-70.
- DOZET, S. 2000: Višnja Gora Formation, Central Slovenia. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 47/2: 137-154.
- DOZET, S. 2002: Grosuplje-Orle paralic shallow-water beds. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 49/4: 571-579.
- DOZET, S. 2004: O karnijskem oolitnem železnatem boksitu Kopitovega griča ter o plasteh v njegovi talnini in krovnini. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 51/4: 2191-2208.
- DOZET, S. & BUSER, S. 2009: Trias = Triassic. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): *Geologija Slovenije*. Geološki zavod Slovenije, 161-214.
- GRAD, K. & FERJANČIČ, L. 1974: Osnovna geološka karta SFRJ, list Kranj 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd.
- GRAD, K. & FERJANČIČ, L. 1976: Tolmač za list Kranj L 33-65 – Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd: 69 p.
- HAMRLA, M. 1987: Optična odsevnost nekaterih slovenskih premogov = Light reflectance of some Slovenian coals. *Geologija*, 28/29 (1985/86): 293-317.
- JELEN, B. 1990: Karnijska školjčna favna na Lesnem Brdu in njen paleobiološki pomen = The Carnian bivalves (Mollusca) from Lesno Brdo, Slovenia, NW Yugoslavia, and their paleobiological significance. *Geologija*, 31/32 (1988/89): 11-127.



- JURKOVŠEK, B. & JELEN, B. 1990: Fossilne školjke iz karnijskih plasti pri Orle = Fossil lamellibranchs from the Carnian beds at Orle. *Geologija*, 31/32 (1988/89): 129-132.
- KANDUČ, T., KOCMAN, D. & OGRINC, N. 2008: Hydrogeochemical and stable isotope characteristics of the River Idrija (Slovenia), the boundary watershed between the Adriatic and Black Seas, *Aquatic geochemistry*, 14: 239-262.
- KOSSMAT, F. 1902: Über die Lagerungsverhältnisse der Kohlenführenden Raibler Schichten von Oberlaibach. *Verh. Geol. R.-A, Wien*: 150-162.
- KOSSMAT, F. 1910: Erläuterungen zur Geologischen Karte Bischoflack-Idria (Wien). *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*.
- KRAMER, E. 1905: *Das Laibacher Moor*, Wien: 205 p.
- MELIK, A. 1959: *Posavska Slovenija*. Slovenska matica, Ljubljana: 595 p.
- MIRTIČ, B., MLADENVIČ, A., RAMOVŠ, A., SENEGAČNIK, A., VESEL, J. & VIZINTIN, N. 1999: Slovenski naravni kamen. Ministrstvo za znanost in tehnologijo: Restavratorski center Republike Slovenije: 131 p.
- OBLAK, K. 2001: Carnian Foraminifera from the Kucler quarry at Lesno Brdo (Slovenia). *Geologija*, 44/2: 305-316, doi:10.5474/geologija.2001.022
- OGORELEC, B., DOLENEC, T. & PEZDIČ, J. 1999: Izo-topaska sestava O in C v mezozojskih karbonatnih kamninah Slovenije – vpliv faciesa in diagenoze = Isotope composition of O and C in Mesozoic carbonate rocks of Slovenia – effect of facies and diagenesis. *Geologija*, 42: 171-205, doi:10.5474/geologija.1999.012.
- OGORELEC, B., JURKOVŠEK, B., ŠATARA, D., BARIĆ, G., JELEN, B. & KAPOVIĆ, B. 1996: Potencialnost karbonatnih kamnin za nastanek ogljikovodikov v zahodni Sloveniji = Carbonate rocks of west Slovenia as potential sources for hydrocarbons. *Geologija*, 39: 215-237.
- PETRASCHECK, W. 1926: Bericht über den Anthrazitbergbau Orle bei Ljubljana. Report archived at Geological Survey of Slovenia.
- PETRASCHECK, W. 1927: Die Kohlanlager südlich der Save in Krain. *Zeitschrift des bereschlesischen Berg-u.Hüttenmännischen Vereins zu Kattowitz*
- PETRASCHECK, W. 1926/29: *Kohlengeologie der Österreichischen Teilstaaten – I. and II. Teil*. Kattowitzer Buchdruckerei – und Verlags-Sp. Akc., Katowice.
- PEZDIČ, J. 1999: Izotopi in geokemijski procesi. Oddelek za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani: 269 p.
- PLACER, L. 2008: Principles of the tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija* 51/2: 205-217, doi:10.5474/geologija.2008.021.
- PLENIČAR, M., BUSER, S. & GRAD, K. 1967: Osnovna geološka karta SFRJ, list Postojna 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd.
- PLENIČAR, M., BUSER, S. & GRAD, K. 1970: Tolmač za list Postojna L 33-70 – Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd: 62 p.
- PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (ur./eds.) 2009: *Geologija Slovenije = Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije: 615 p.
- PREMRU, U. 1983a: Osnovna geološka karta SFRJ list Ljubljana 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd.
- PREMRU, U. 1983b: Tolmač za list Ljubljana L 33-66 – Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd: 75 p.
- PREMRU, U. 2005: *Tektonika in tektogeneza Slovenije*. Geološki zavod Slovenije: 518 p.
- RAINER, T., HERLEC, U., RANTITSCH, G., SACHSENHOFER, R. F. & VRABEC, M. 2002: Organic matter maturation versus clay mineralogy: A comparison for Carboniferous to Eocene sediments from the Alpine – Dinaride junction (Slovenia, Austria). *Geologija*, 45/2: 513-518.
- RAKOVEC, I. 1955: Geološka zgodovina ljubljanskih tal. V: *Zgodovina Ljubljane I*. Državna založba Slovenije: 11-107.
- RAMOVŠ, A. 1953: O stratigrafskih in tektonskih razmerah v Borovniški dolini in njeni okolici. *Geologija*, 1: 90-110.
- RAMOVŠ, A. 1978: *Geologija*. Univerza v Ljubljani: 197 p.
- RAMOVŠ, A. 1994/95: Oberfassenische (mitteltriassische) Conodonten aus Kalken südlich von Slugovo, Südslovenien. *Geologija*, 37/38: 141-151.
- RCCC – Rock-Color Chart Committee, 1970: *Rock-Color Chart*. Distributed by The Geological Society of America, Boulder, Colorado. Printed by Huyskes-Enschede.
- SCHLUMBERGER Oilfield Glossary <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=total%20organic%20carbon>
- SEDLAR, J., PETROV, S. I. & ČADEŽ, N. 1948: Poročilo o geološkem kartiranju terena Orle - Pleše. Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije: 61 p.
- ŠPOLJARIČ, A. 1917: Bemerkungen der Beurteilung speziell der Kohlen und Erzablagerung zur Orle and Javor. Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije.
- TAYLOR, G. H., TEICHMÜLLER, M., DAVIS, A., DIESEL, C. F. K., LITTKER, R. & ROBERT, P. 1998: *Organic Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin: 704 p.
- VESEL, J., STRMOLE, D., SENEGAČNIK, A., PAVŠIČ, J. & PAVLOVEC R. 1992: *Naravni kamen: kamnarsko geološki leksikon*. Geološki zavod Ljubljana – Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, Združenje slovenske kamnarske industrije in Univerza v Ljubljani – Odsek za geologijo: 100 p.
- ŽLEBNIK, L. & GRAD, K. 1953: O geološkem kartiranju wengenskih in rabeljskih plasti med Drenovim Gričem, Šentjoštom in Butajnovom. Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije: 21 p.



# Mineral chemistry of monazite-(Nd), xenotime-(Y), apatite, fluorite and zircon hosting in lamprophyre dyke in Abu Rusheid area, South Eastern Desert, Egypt

Mohamed A. ALI

Nuclear Materials Authority P. O. Box: 530 El-Maadi, Cairo, Egypt; e-mail: dr\_mohamed1966@yahoo.com

Prejeto / Received 14. 3. 2011; Sprejeto / Accepted 30. 3 2012

*Key words:* Mineralized lamprophyre dyke, REE-minerals, REE-bearing minerals, mineral chemistry, South Eastern Desert, Egypt.

## Abstract

The studied mineralized lamprophyre dyke in Abu Rusheid area is trending NNW-SSE, and occurs within Abu Rusheid mineralized shear zone, measuring 0.2 - 1.0 m in width and 0.5 - 1.0 km in length. It was emplaced parallel with the Abu Rusheid shear zone. The dyke is mainly composed of plagioclases, amphiboles, mica (muscovite and biotite), relics of pyroxenes with K-feldspars and quartz derived from surrounding country rocks as phenocrysts embedded in fine-grained groundmass. The lamprophyre dyke hosts REE-minerals monazite-(Nd), xenotime-(Y), and REE-bearing minerals apatite, fluorite, zircon-(Hf), rutile with inclusions of xenotime and iron oxides. The emplacement of lamprophyre dyke caused heating in the mineralized shear zone of Abu Rusheid area. The lamprophyre dyke was subsequently affected by hydrothermal alterations (e.g. chlorite-carbonate, muscovitization, fluoritization). The REE were remobilized from the mineralized shear zones by hydrothermal solutions and re-precipitated as REE-minerals xenotime-(Y) and monazite-(Nd) around fluorapatite, fluorite, zircon and rutile. The solid solutions between monazite-(Nd) and xenotime-(Y) were formed as a product precipitation from hydrothermal solutions. Also, the apatite mineral in the lamprophyre dyke was subjected to the heating during the emplacement, which lead to its alteration and breakdown with concomitant precipitation of xenotime-(Y) and monazite-(Nd). The chemistry of monazite-(Nd) and xenotime-(Y) obtained by scanning electron microscopy (SEM), and electron probe microanalysis (EPMA), showed that these minerals are enriched in U and Th. The monazite-(Nd) associated with fluorapatite in the studied dyke is poor in Th ( $0.02 \leq \text{Th} \leq 0.81$  wt%), but usually rich in U ( $0.92 \leq \text{U} \leq 2.91$  wt%), which indicates that monazite formed as a result of fluorapatite metasomatism.

## Introduction

The Abu Rusheid area is one of the most important areas in the South Eastern Desert of Egypt, especially in rare-metal mineralization and is included in wadi Sikait and wadi El Gemal area. It lies about 97 km southwest of Marsa Alam town and is accessible from the Red Sea through wadi El-Gemal desert track (Fig. 1).

The area is located in the huge fault systems of Sikait-Nugrus environ. The age of the leucogranites in the Sikaite-Nugrus (Abu Rusheid granites) area is  $610 \pm 20$  Ma determined by Rb-Sr method (MOGHAZI et al., 2004). The Abu Rusheid area lies to the NE of the major shear zone known as the Nugrus thrust fault (GREILING et al., 1988) or Nugrus strike-slip fault (FRITZ et al., 2002). This shear zone separates high-temperature metamorphic rocks of the Hafafit complex in the SW from mainly low grade ophiolitic and arc volcanic assemblages to the NE (BENNETT & MOSLEY, 1987). Shear zones are known to form important mechanical weaknesses that affect the geology of the continental lithosphere as a kinematic response to deformation (BUTLER et al., 1995). GREILING

et al. (1993) believe that shear zones in the Pan African basement of the Eastern Desert may be related to compressional, as well as extensional stresses; however, both types of deformation led to antiformal structures on a regional scale. ABDEL-MONEM & HURELY (1979) estimated the age date of psammitic gneisses by zircon detrital age, which ranges between 1120 Ma and possibly 2060 Ma suggesting that this basement may be the so called Nile Craton.

HASSAN (1964) studied geology and petrography of the radioactive minerals and rocks in wadi Sikait and wadi El Gemal area. Also, HASSAN (1973) and HILMY et al. (1990) studied geology, geochemistry and mineralization of radioactive columbite-bearing psammitic gneisses of wadi Abu Rusheid. EL-GEMMIZI (1984), SALEH (1997) and IBRAHIM et al. (2004) studied the Abu Rusheid area and recorded several types of mineralization, such as Ta-Nb minerals, zircon, thorite, and secondary uranium minerals. RASLAN (2005) identified columbite, Hf-rich zircon and dark Li-mica (zinnwaldite) in Abu Rusheid mineralized gneiss. The latter author has further been able to identify mineral ishikawaite in Abu Rusheid minera-



lized gneiss (RASLAN, 2008). DAWOOD (2010) studied the mineral chemistry and genesis of uranyl minerals associated with psammitic gneisses of Abu Rusheid area, and concluded that the composition and genesis of uranyl mineralization provide additional information about the behavior of radionuclides in arid environments and at very oxidizing conditions. ALI et al. (2011) studied the mineralogy and geochemistry of Nb-, Ta-, Sn-, U-, Th-, and Zr-bearing granitic rocks in Abu Rusheid shear zones, and proved, on the basis of field evidence, textural relations, and compositions of the ore minerals, that the main mineralizing event was magmatic ( $629 \pm 5$  Ma, CHIME monazite), with later hydrothermal alteration and local remobilization of high-field-strength elements.

IBRAHIM et al. (2007a) recorded the occurrence of REE up to (1.5 %) in the studied lamprophyre dykes. Also, IBRAHIM et al. (2007b) studied the base-metal mineralization hosting uranium and geochemistry of the lamprophyres within the shear zones of Abu Rusheid area.

The present study shows the detailed mineral chemistry of REE-minerals (monazite-(Nd), xenotime-(Y)) and REE-bearing minerals (apatite, fluorite, and zircon) within mineralized lamprophyre dyke, and also discusses the genesis of these minerals.

### Geological setting

The basement rocks sequence of the Precambrian rocks at Abu Rusheid area are arranged as follows: (1) ophiolitic mélangé, consisting of ultramafic rocks and layered metagabbros with a metasedimentary matrix; (2) cataclastic rocks (peralkalic granitic gneisses) in the core of the granitic pluton, which are composed of protomylonites, mylonites, ultramylonites, and silicified ultramylonites, (3) mylonitic granites; and (4) post-granitic dykes and veins (IBRAHIM et al., 2004). The rare-metal peralkalic granitic gneisses and cataclastic to mylonitic rocks (ALI et al., 2011) are highly foliated and contain primary mineralization of uraninite, thorite and zircon minerals. These rocks are intruded by two mica (muscovite-biotite) granites. The cataclastic rocks are cross-cut by NNW-SSE trending altered and mineralized shear zone with  $>1$  km in length and 0.5 - 5 m in width (Fig.1).

The lamprophyre dyke of 0.2 - 0.5 m in width and  $> 1$  km in length was emplaced along the altered and mineralized shear zone. Lamprophyre

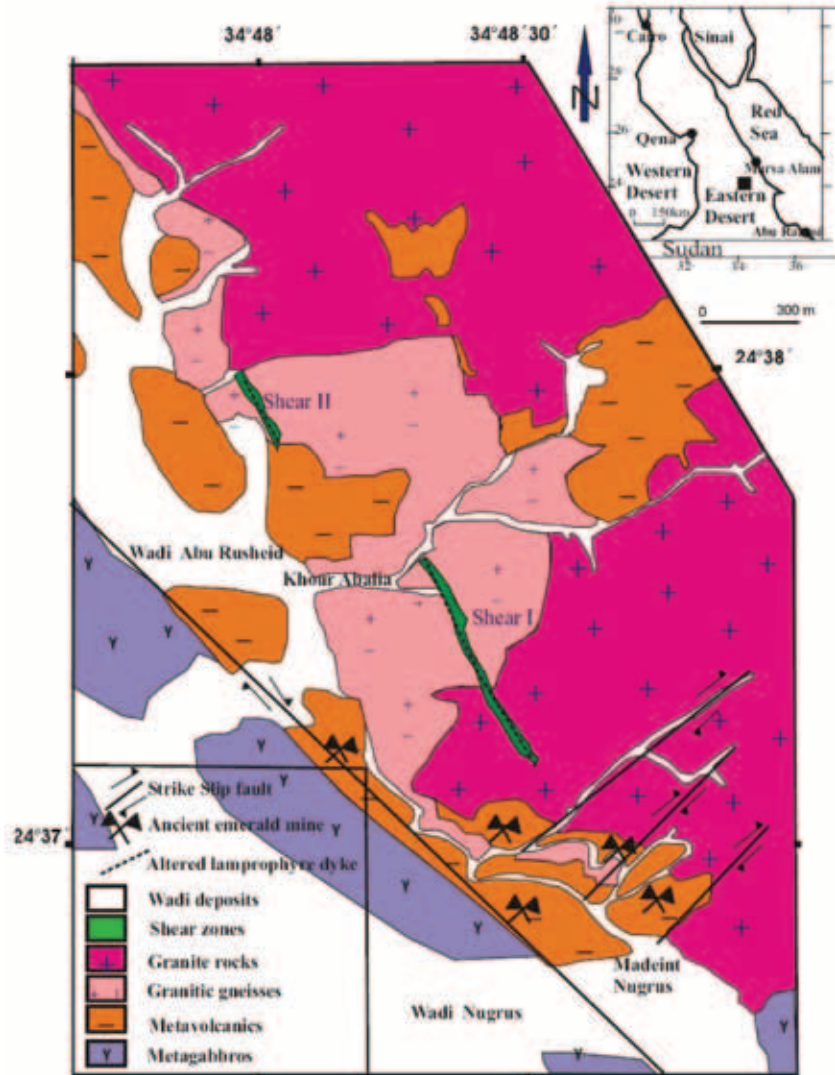


Fig. 1. Geological map of Abu Rusheid area showing the studied altered lamprophyre dyke, cutting mineralized shear zone (modified after IBRAHIM et al. 2004).

dyke is fine-to medium-grained, highly fractured parallel to the mineralized shear zone and characterized by dark grayish to black colors. Iron oxides, fluorite and carbonatite are present as

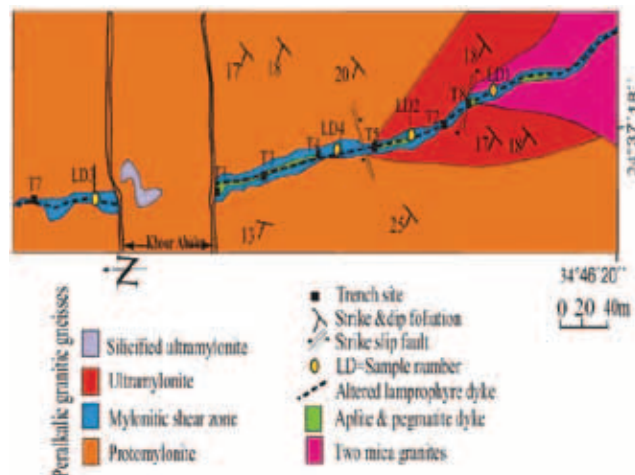


Fig. 2. Sketch map of the shear zone I showing the studied altered lamprophyre dyke, and sampling locations (●), (modified after IBRAHIM et al. 2007a).

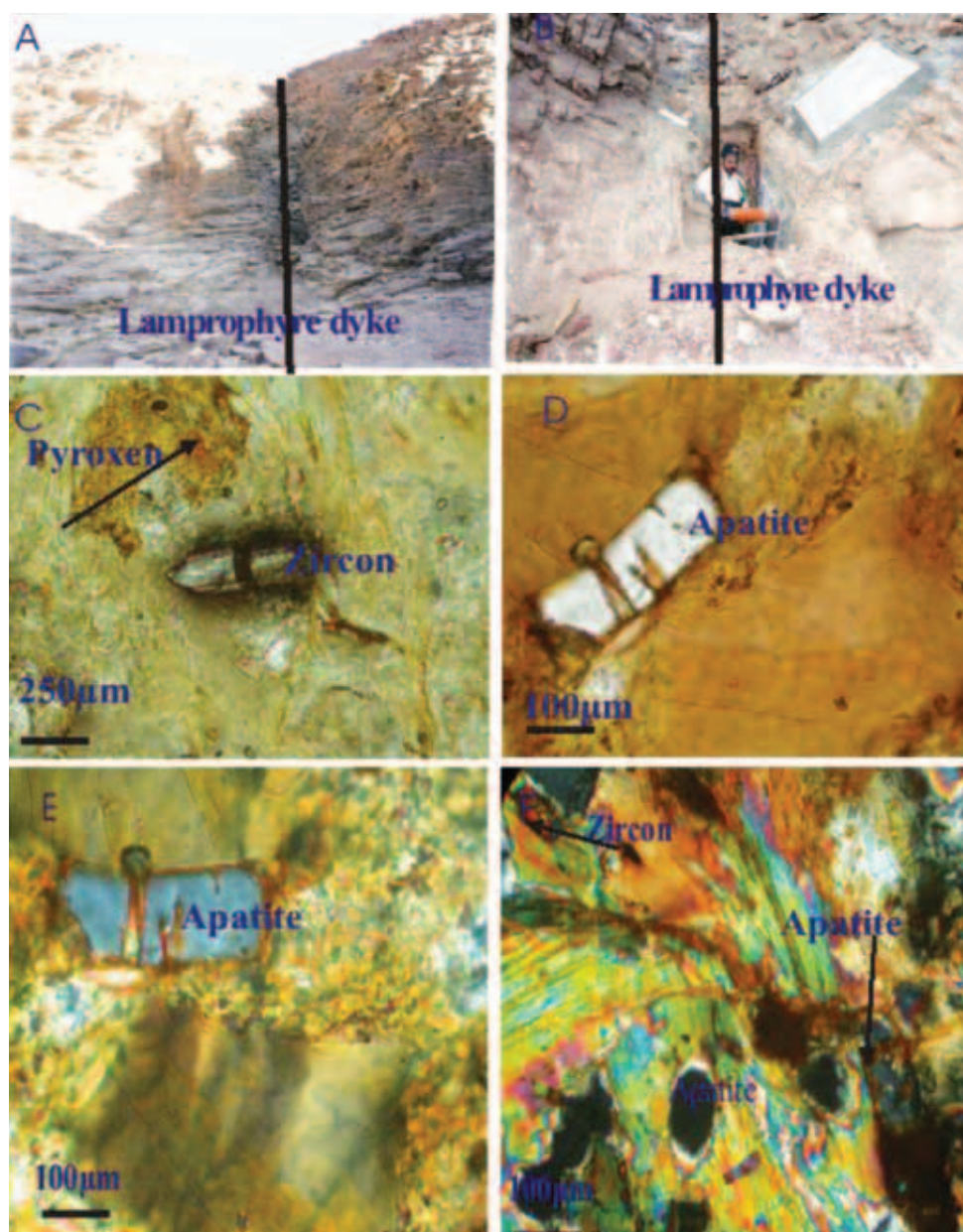


Fig. 3 a) Photo of NNW-SSE trending of lamprophyre dyke in the Abu Rusheid area, b) detailed photo of the lamprophyre dyke cutting the mineralized shear zone in the Abu Rusheid area, c) The pyroxene is altered to amphiboles and iron oxides, notice large zircon crystal within lamprophyre dyke, d) large apatite crystal in the P. L. (Polarized Light), e) and under C. N. (Crossed Nichols), and f) numerous crystal of apatite and zircon associated with muscovite and iron oxides (P. L.).

fillings in fracture planes. The studied dyke is completely altered and cross-cuts rare-metal peralkalic granitic gneisses and cataclastic mylonitic rocks in the Abu Rusheid mineralized shear zone in the direction of NNW-SSE (Figs. 2, 3b).

Petrographically, the altered lamprophyre dyke is mainly composed of plagioclases, amphiboles, relics of pyroxenes and secondary muscovite after biotite. The pyroxene is altered to amphiboles and iron oxides (Fig. 3c), while the biotite is altered to muscovite and iron oxides. K-feldspars and quartz are found in the lamprophyre dyke as phenocrysts embedded in the fine-grained groundmass. They were formed from xenoliths and relics of mineralized shear zone (granitic gneisses). Numerous apatite and zircon crystals, associated with muscovite and iron oxides were found. Apatite, fluorite, monazite, xenotime and zircon occur as accessory minerals (Fig. 3d to f). Carbonate, chlorite, epidote, sericite, iron oxides and muscovite are secondary minerals.

### REE-minerals and REE-bearing minerals

Due to their large ionic radii and charge, the REE, as well as U and Th, behave incompatibly during magmatic processes. The LREE tend to be concentrated in highly fractionated basic rocks, such as carbonatites (FÖRSTER, 2000), whereas HREE and especially Y tend to be concentrated in fractionated acidic rocks, such as alkaline granites and pegmatites. Concerning the heavy REE (HREE), HANSON (1978) invoked zircon as the major source of HREE in granitic rocks, while JEFFERIES (1984) considered partitioning of HREE between zircon, xenotime, and apatite. MINEYEV (1963) reported that the HREE can easily form sodium fluoro-complexes (e.g.,  $\text{Na}(\text{REE})\text{F}_4$ ) under hydrothermal conditions. These complexes form preferably with HREE of smaller ionic radii (HUMPHRIS, 1984).

The crystal structures of many of REE-minerals are poorly known because the phases are metamict in nature (Th and U commonly sub-



stitute for REE in minerals, as mentioned above). The smaller HREE, or Y-group, exhibits irregular coordination numbers with oxygen most commonly of 8, whereas the larger light REE (LREE), or Ce-group, exhibits larger coordination numbers, most commonly of 9 (e.g., MIYAWAKI & NAKAI, 1987). The LREE have relatively large ionic radii similar to those of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Th}^{4+}$ . The trivalent LREE (Ce-group) are very similar crystal-chemically to  $\text{Ca}^{2+}$ , and they commonly substitute for Ca in rock-forming minerals. Substitution of a trivalent REE cation for divalent Ca is achieved by compensation of charge through a coupled substitution.

The REE-orthophosphate minerals monazite and xenotime are known from a wide range of magmatic (BEA, 1996; FÖRSTER, 1998a, b; VISKUPIC & HODGES, 2001) and metamorphic rocks (HEINRICH et al., 1997), especially rocks characterized by mildly to strongly peraluminous compositions. Monazite ( $\text{LREE}(\text{PO}_4)$ ) is a monoclinic mineral, with the space group  $P2_1/n$ , which is isostructural to huttonite, the high-P high-T polymorph of  $\text{ThSiO}_4$ . The most common of the monazite series is monazite-(Ce), which is widespread in granites (mainly S-type), alkaline rocks (syenites, carbonatites), pegmatites, metapelites to metapsammites, hydrothermal veins or occurs as authigenic mineral in clastic sediments. Monazite-(La), monazite-(Nd), and monazite-(Sm) occur less frequently (GRAESER & SCHWANDER, 1987; GAINES et al., 1997; ANTHONY et al., 2000; MASSAU et al., 2002). Xenotime (Y, HREE( $\text{PO}_4$ )) is tetragonal, with the space group  $I4_1/amd$ , and is isostructural to thorite, which is the low-P low-T polymorph of  $\text{ThSiO}_4$  (PABST & HUTTON, 1951). Both atomic arrangements are based on chains of alternating phosphate tetrahedra and REE polyhedra along [001] where the REE ions are 8-fold coordinated in xenotime and 9-fold in monazite (NI et al., 1995). Minor emphasis has been given to xenotime, which also incorporates relatively high amounts of U and, to a minor extent, also Th. It is known from natural assemblages (FRANZ et al., 1996) that Th and U are incorporated in monazite and xenotime by two exchange mechanisms. In natural rocks, coexisting monazite-xenotime pairs suggest that Th is preferentially incorporated into monazite as brabantite ( $\text{CaTh}(\text{PO}_4)$ ) (ROSE, 1980) and U into xenotime as coffinite ( $\text{USiO}_4$ ) component (FRANZ et al., 1996); however, quantitative relationships are unknown. ANDREHS & HEINRICH (1998) found that the monoclinic structure preferentially incorporates the LREE, whereas the tetragonal structure incorporates preferentially the HREE.

Zircon is an important member of REE-bearing minerals and a common accessory mineral in plutonic igneous rocks, especially those of granite group. It is generally present as small early formed crystals often enclosed in later minerals, but may form large well developed crystals in granites and pegmatites (DEER et al., 1966). HUSSEIN (1978) and ABADALLA et al. (2008) stated that the radioactive zircons are usually zoned. The

radioactive zircon is also characterized by metamictization. The explanation for the origin of the "Metamict State" is that the internal order of the originally crystalline form has been destroyed by  $\alpha$ -particles bombardment from radionuclides within the structure. Zircon may be partially or completely modified giving amorphous zircon with a more isotropic character. Such minerals are called metamict zircon.

### Analytical methods

Four samples of the altered lamprophyre dyke were studied in detail using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and electron probe microanalysis (EPMA). Polished thin sections were studied under reflected and transmitted light of an optical microscope in order to determine mineral associations and paragenesis. Backscattered electron images (BEI) were collected with the scanning electron microscope (JEOL 6400) at the Microscopy and Microanalyses Facility, University of New Brunswick (UNB), New Brunswick, Canada. Chemical compositions of minerals were determined on the JEOL JXA-733 Super probe at 15 kV, a beam current of 50 nA and peak counting times of 30 second for all elements. Standards used for the EPMA analysis were jadeite, kaersutite, quartz, and apatite for Na, Al, Si, and P, and Ca, respectively,  $\text{SrTiO}_3$  for Ti,  $\text{CaF}_2$  for F, pure metals were used for Fe, Nb, Hf, Ta, Sn, Th, and U, YAG for Y, cubic zirconia for Zr, (La, Ce, Nd, Sm, Pr, Er, Gd, Eu, Tb, Dy, and Yb)-bearing Al-Si glass for La, Ce, Nd, Sm, Pr, Er, Gd, Eu, Tb, Dy, and Yb and crocoite for Pb.

### Mineralogical investigations

Results of detailed mineralogical examination of REE-minerals and REE-bearing minerals in altered lamprophyre dyke are briefly presented in the following sections.

#### REE-minerals

##### Monazite-Nd ((Nd, Ce, La, Sm, Th) $\text{PO}_4$ )

Monazite-(Nd) occurs as euhedral to subhedral crystals in mineralized lamprophyre dyke in the Abu Rusheid area. The monazite crystals are generally light gray in color and range in size from 5 to 30  $\mu\text{m}$  (Fig. 4a, c). Monazite was found associated with iron oxides and xenotime, rimming apatite and fluorite, as inclusions in the zircon, and in the fractures and fissure track in the dyke. Monazite in the studied lamprophyre dyke is frequently heterogeneous. This means that the same crystal of monazite consists of two distinct parts; which appear dark gray and light gray in SEM (BEI) images (Figs. 5c,d). Chemical composition of these distinct parts in monazite,



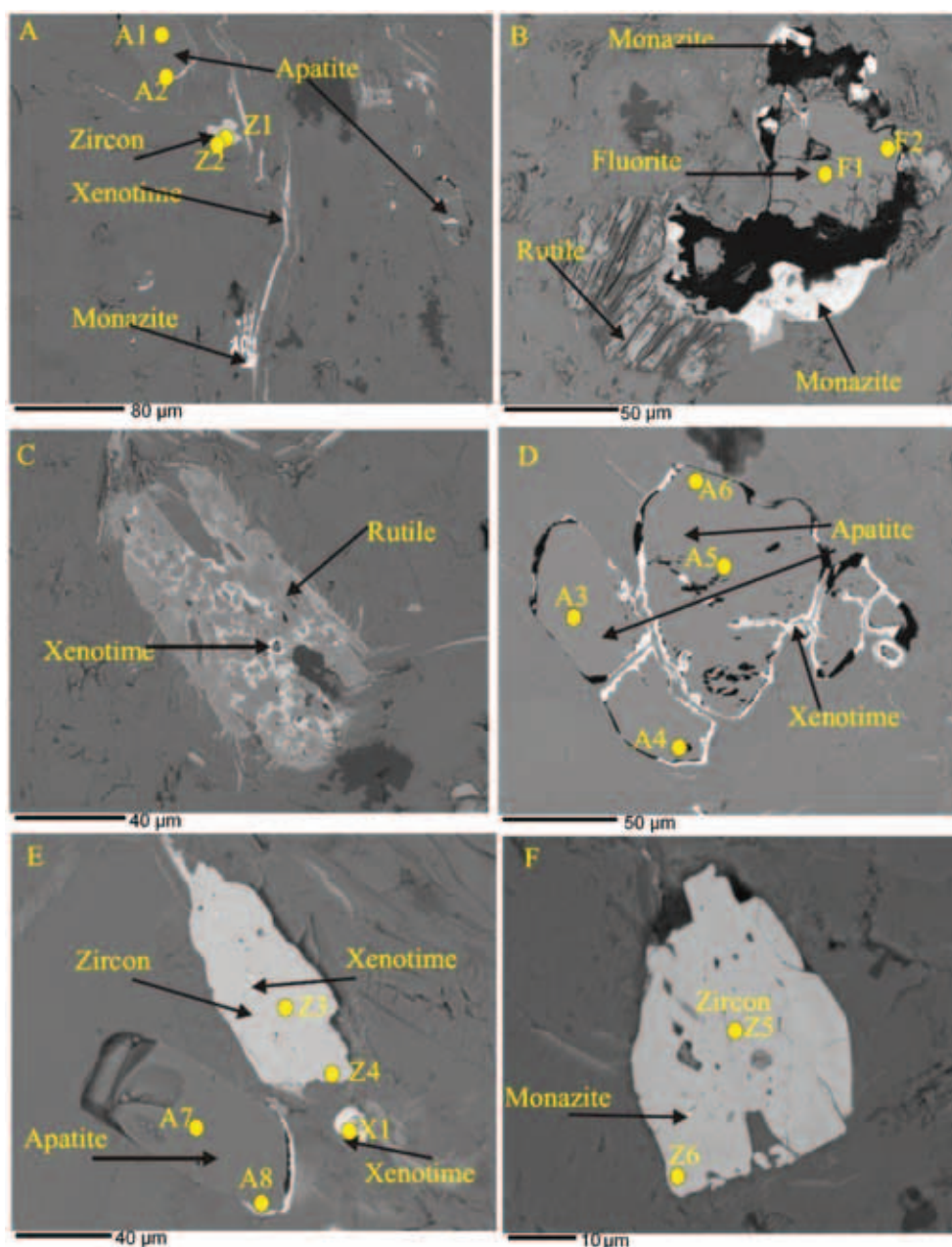


Fig. 4. SEM-BSE images of a) monazite and xenotime minerals filling fractures and fissures in the lamprophyre dyke, b) fluorite associated with monazite and rutile, c) rutile with inclusions of xenotime in the lamprophyre dyke, d) large euhedral apatite rimmed by xenotime, and e) and f) zircon with inclusions of xenotime and monazite.

obtained by the EPMA analysis, are given in Table 1 and shown in Figures 6 and 7. The results showed that contents of the major oxides in the darker part of monazite are:  $P_2O_5$  (22.99 to 26.11 wt%),  $Nd_2O_3$  (12.72 to 19.73 wt%),  $Ce_2O_3$  (2.31 to 16.37 wt%),  $La_2O_3$  (3.02 to 4.23 wt%),  $Pr_2O_3$  (5.15 to 6.30 wt%),  $Sm_2O_3$  (3.75 to 4.59 wt%),  $Gd_2O_3$  (3.82 to 4.75 wt%),  $Dy_2O_3$  (5.45 to 6.18 wt%),  $ThO_2$  (0.02 to 0.21 wt%),  $UO_2$  (0.71 to 1.18 wt%), while the lighter part consists of  $P_2O_5$  (20.40 to 24.26 wt%),  $Nd_2O_3$  (13.01 to 17.12 wt%),  $Ce_2O_3$  (10.18 to 16.42 wt%),  $La_2O_3$  (3.30 to 6.15 wt%),  $Pr_2O_3$  (3.46 to 4.68 wt%),  $Sm_2O_3$  (0.97 to 2.96 wt%),  $Gd_2O_3$  (2.94 to 4.01 wt%),  $Dy_2O_3$  (5.05 to 6.16 wt%),  $ThO_2$  (0.21 to 0.81 wt%),  $UO_2$  (0.92 to 2.91 wt%). It can be inferred from these results that the darker part of monazite-(Nd) is enriched in HREE and depleted in LREE, Th, and U; while the lighter part is depleted in HREE, Y and Ca, and enriched in Th and U. Monazite and xenotime in the Abu Rusheid lamprophyre dyke also occur in the mo-

nozite-xenotime solid solution, which indicates presence of hydrothermal solutions enriched in REE, Y, P, U, F, and Zr. The emplacement of the lamprophyre dyke in the mineralized shear zone heated the wall rocks of the shear zone, which enriched in REE, Y, P, U, F, and Zr. These elements were remobilized by hydrothermal solutions and re-precipitated in the fractures and fissure tack in the lamprophyre dyke as REE-minerals, such as monazite-(Nd), xenotime-(Y) and REE-bearing minerals, such as apatite, fluorite, zircon, rutile with inclusions of xenotime and iron oxides.

Hydrothermal and igneous monazite can be distinguished by the  $ThO_2$  content, which is generally  $< 1$  wt% for hydrothermal monazite and  $3$  to  $> 5$  wt% for igneous monazite (SCHANDL & GORTON, 2004). Also, monazites formed under high-grade metamorphic conditions show a wide range of  $ThO_2$  concentrations and are strongly zoned with respect to Th. The studied monazite is relatively heterogeneous and strongly zoned

with respect to Th. The Th content in the studied monazite is low and is consistent with its hydrothermal origin (Table 1).

### Xenotime-Y ((Y, HREE)PO<sub>4</sub>)

Xenotime in lamprophyre dykes occurs as euhedral to subhedral crystals associated with apatite, monazite, rutile, fluorite, and zircon minerals. In places, it can also be found as anhedral rims around apatite, fluorite and rutile. In the altered lamprophyre dykes, however, xenotime occurs, in the fractures and fissure track and is associated with apatite and rutile. Xeno-

time in the studied mineralized lamprophyre dykes is frequently homogeneous. Xenotime grains are present in the form of subhedral to anhedral crystals and range in size from 2 to 10  $\mu\text{m}$  or 5 to 30  $\mu\text{m}$  (Figs. 4a, b). The average contents of major oxides in xenotime (Table 2), obtained by the EPMA analysis, are: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (34.87 wt%), Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (34.11 wt%), Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6.21 wt%), Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5.30 wt%), Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2.31 wt%), Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.92 wt%), Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.7 wt%), Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.47 wt%), UO<sub>2</sub> (1.13 wt%), ThO<sub>2</sub> (0.79 wt%). The results of EPMA analysis showed that the studied xenotime is enriched in HREE (especially Yb, Er, Dy, Gd), Y, Th, and U (Table 2).

Table 1. Composition of selected monazite from the Abu Rusheid lamprophyre dyke, obtained by EPMA

Sample no.	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	Average	Average
Mineral	Monazite	Monazite	Monazite	Monazite	Monazite	Monazite	Monazite	Monazite	Monazite	Monazite
Oxides (wt%)	dark	light	dark	light	dark	light	dark	light	dark	light
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	N=4	N=4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.82	0.03	0.13	0.25	0.11	0.22	1.0	0.03	0.51	0.13
SiO <sub>2</sub>	0.29	0.53	0.24	0.19	0.20	0.17	0.35	0.24	0.27	0.28
CaO	5.19	5.03	5.82	4.58	5.49	4.00	6.22	6.01	6.18	4.91
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.98	9.25	7.30	6.99	9.06	8.72	8.43	7.01	9.94	7.99
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	23.0	20.4	25.3	23.9	25.7	24.3	26.1	23.9	25.5	23.6
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.46	5.99	3.02	3.78	3.25	3.30	4.23	6.15	3.49	4.81
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.31	10.52	15.33	15.42	16.37	14.33	2.82	10.18	9.21	12.86
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.15	4.58	4.78	4.68	3.97	4.08	6.30	3.46	5.05	4.20
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.35	16.10	16.73	15.91	13.72	13.01	16.77	17.12	16.14	15.54
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.75	2.96	0.000	2.106	0.000	0.966	4.59	1.28	2.09	1.58
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.94	3.56	4.75	4.01	3.94	2.91	3.82	3.45	4.11	3.49
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.16	6.09	5.45	5.05	6.18	6.15	5.54	5.12	5.83	5.60
PbO	0.50	1.1	0.35	0.66	0.29	0.58	0.61	1.28	0.43	0.90
ThO <sub>2</sub>	0.02	0.42	0.21	0.42	0.09	0.81	0.02	0.30	0.08	0.49
UO <sub>2</sub>	0.97	0.92	0.86	2.91	0.71	2.54	1.08	1.18	0.93	1.86
<b>Total</b>	<b>83.87</b>	<b>87.48</b>	<b>90.30</b>	<b>90.91</b>	<b>89.06</b>	<b>86.04</b>	<b>87.89</b>	<b>86.68</b>	<b>87.78</b>	<b>87.78</b>
<b>Cation proportions (based on 4 oxygen atoms)</b>										
Al	0.026	0.001	0.003	0.007	0.004	0.008	0.031	0.001	0.016	0.004
Si	0.009	0.017	0.006	0.005	0.008	0.006	0.011	0.008	0.009	0.009
Ca	0.130	0.126	0.145	0.100	0.137	0.115	0.156	0.150	0.281	0.223
Y	0.270	0.193	0.189	0.182	0.152	0.146	0.217	0.146	0.207	0.167
P	0.718	0.638	0.792	0.748	0.802	0.811	0.816	0.746	0.912	0.844
La	0.072	0.125	0.068	0.069	0.063	0.079	0.088	0.128	0.073	0.100
Ce	0.048	0.219	0.319	0.299	0.319	0.289	0.059	0.212	0.192	0.268
Pr	0.107	0.095	0.083	0.085	0.100	0.098	0.131	0.072	0.105	0.088
Nd	0.320	0.335	0.348	0.331	0.286	0.271	0.349	0.357	0.336	0.324
Sm	0.078	0.062	0.000	0.020	0.000	0.023	0.096	0.027	0.044	0.033
Gd	0.082	0.074	0.082	0.061	0.099	0.084	0.080	0.072	0.086	0.073
Dy	0.128	0.127	0.129	0.128	0.114	0.105	0.115	0.107	0.122	0.117
Pb	0.005	0.011	0.003	0.006	0.004	0.007	0.006	0.013	0.005	0.009
Th	0.001	0.008	0.004	0.008	0.002	0.026	0.001	0.004	0.030	0.033
U	0.016	0.016	0.015	0.049	0.012	0.015	0.018	0.020	0.016	0.032
$\Sigma$ REE	40.12	49.8	46.43	44.78	53.06	50.96	44.07	46.77	45.92	48.08
$\Sigma$ REE+Y	53.1	59.05	55.49	53.5	60.36	57.95	54.5	53.78	55.86	56.18
$\Sigma$ LREE	30.02	40.15	36.31	34.72	42.86	41.90	34.71	38.19	35.98	38.74
$\Sigma$ HREE	10.1	9.65	10.12	9.09	10.2	9.06	9.36	8.58	9.95	9.10
Th / U	0.02	0.46	0.24	0.07	0.13	0.32	0.02	0.25	0.04	0.28
$\Sigma$ A+B	2.01	2.09	2.16	2.08	2.15	2.04	2.19	2.08	2.13	2.07

N= number of samples

Table 2. Composition of selected xenotime from the Abu Rusheid lamprophyre dyke, obtained by EPMA

Sample no.	X 1	X 2	X 3	X 4	X 5	Average
Mineral	Xenotime	Xenotime	Xenotime	Xenotime	Xenotime	Xenotime
Oxides (wt%)						N=5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	0.68	0.000	0.000	0.000	0.22
SiO <sub>2</sub>	1.33	1.32	2.22	2.98	1.01	1.77
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.19	0.00	0.00	0.00	0.04
CaO	0.16	0.64	0.01	0.05	0.05	0.18
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.92	41.24	33.99	31.72	32.67	34.87
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	31.36	41.41	34.35	33.12	34.12	34.11
ZrO <sub>2</sub>	0.04	0.16	0.00	0.35	0.36	0.18
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.48	0.93	0.00	0.00	0.00	0.28
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	0.38	0.31	0.13	0.13	0.19
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.21	0.22	0.09
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.08	0.00	0.12	0.01	0.05
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.45	0.21	1.67	0.47
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.60	0.41	0.68	0.11	0.66	0.47
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.35	1.39	1.97	1.62	3.22	2.31
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.56	0.47	0.56	0.64	1.38	0.92
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.18	1.23	4.08	6.85	7.06	5.30
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.31	0.23	0.42	1.34	1.41	0.70
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.49	1.56	5.11	7.81	8.05	6.21
HfO <sub>2</sub>	0.40	0.00	0.00	0.50	0.52	0.28
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.12	0.00	0.55	0.56	0.25
PbO	0.06	0.40	0.45	0.43	0.45	0.36
ThO <sub>2</sub>	0.12	0.30	1.12	1.18	1.22	0.79
UO <sub>2</sub>	0.95	0.99	1.25	1.21	1.24	1.13
Total	88.00	93.90	87.07	91.12	96.00	91.22
<b>Cation proportions (based on 4 oxygen atoms)</b>						
Al	0.015	0.024	0.000	0.000	0.000	0.008
Si	0.042	0.041	0.069	0.093	0.032	0.055
As	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.001
Ca	0.007	0.029	0.001	0.002	0.002	0.008
Y	0.644	0.859	0.708	0.661	0.681	0.711
P	0.782	1.03	0.859	0.828	0.853	0.816
Zr	0.001	0.003	0.000	0.007	0.008	0.004
Nb	0.010	0.019	0.000	0.000	0.000	0.006
Nd	0.002	0.008	0.006	0.003	0.003	0.004
Sm	0.000	0.000	0.000	0.004	0.005	0.002
Eu	0.001	0.017	0.000	0.003	0.001	0.004
Gd	0.000	0.000	0.009	0.004	0.035	0.010
Tb	0.013	0.009	0.014	0.001	0.014	0.010
Dy	0.07	0.029	0.041	0.034	0.067	0.048
Ho	0.032	0.01	0.012	0.013	0.029	0.019
Er	0.15	0.026	0.087	0.143	0.147	0.111
Tm	0.006	0.000	0.009	0.028	0.029	0.014
Yb	0.177	0.033	0.106	0.163	0.168	0.129
Hf	0.008	0.000	0.000	0.011	0.011	0.004
Ta	0.000	0.002	0.000	0.011	0.012	0.005
Pb	0.001	0.008	0.009	0.009	0.009	0.007
Th	0.002	0.061	0.02	0.022	0.022	0.025
U	0.016	0.017	0.021	0.021	0.021	0.019
∑HREE	21.58	5.54	13.67	19.15	23.8	16.75
∑HRE+Y	52.5	46.78	47.66	50.87	56.47	50.86
Th / U	1.06	1.29	2.37	2.38	2.46	1.91
Zr / Hf	0.44	0.16	0.00	0.86	0.88	0.47
∑A+B	1.91	2.18	1.96	2.04	2.08	2.03

N = number of samples

## Xenotime and monazite stability

The studied monazite is strongly zoned, as observed by SEM. According to HEINRICH et al. (1997), prograde zoning of metamorphic monazite and the partitioning of REE between monazite and xenotime are a function of temperature and pressure. It would appear that the U-Th partitioning between coexisting monazite and xenotime is also temperature and pressure dependent and that crystals might be zoned in respect to their U/Th ratios. Xenotime can thus be used as a sensitive trace element geothermometer, both within monazite-xenotime pair (ANDREHS & HEINRICH, 1998). The data obtained by EPMA analyses of the studied monazite-(Nd) and xenotime-(Y) were plotted on the CePO<sub>4</sub>-YPO<sub>4</sub>-ThSiO<sub>4</sub> ternary system at different temperatures (Fig. 8), according to GRATZ & HEINRICH (1997) and SEYDOUX-GUILLAUME et al. (2002). It can be inferred from the diagram that the studied xenotime from Abu Rusheid lamprophyre dyke formed at a temperature around 600 °C, while monazite formed at temperatures between 600 and 1100 °C (Fig. 8).

## REE bearing minerals

### Apatite (Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>F<sub>2</sub>)

Apatite mainly occurs in the form of massive, euhedral to subhedral grains with size ranging from 10 to 40 μm (Figs. 4a, d, e, 5a). The apatite crystals are generally light gray to black in color under the transmitted light of an optical microscope (Figs. 3d - f). Chemical composition of apatite, obtained by EPMA, corresponded to fluorapatite (Table 3). The EPMA analyses (Table 3) also showed that the contents of major oxides and elements in the core of fluorapatite are: CaO (52.93 to 56.6 wt%), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (39.78 to 42.12 wt%), and F (3.18 to



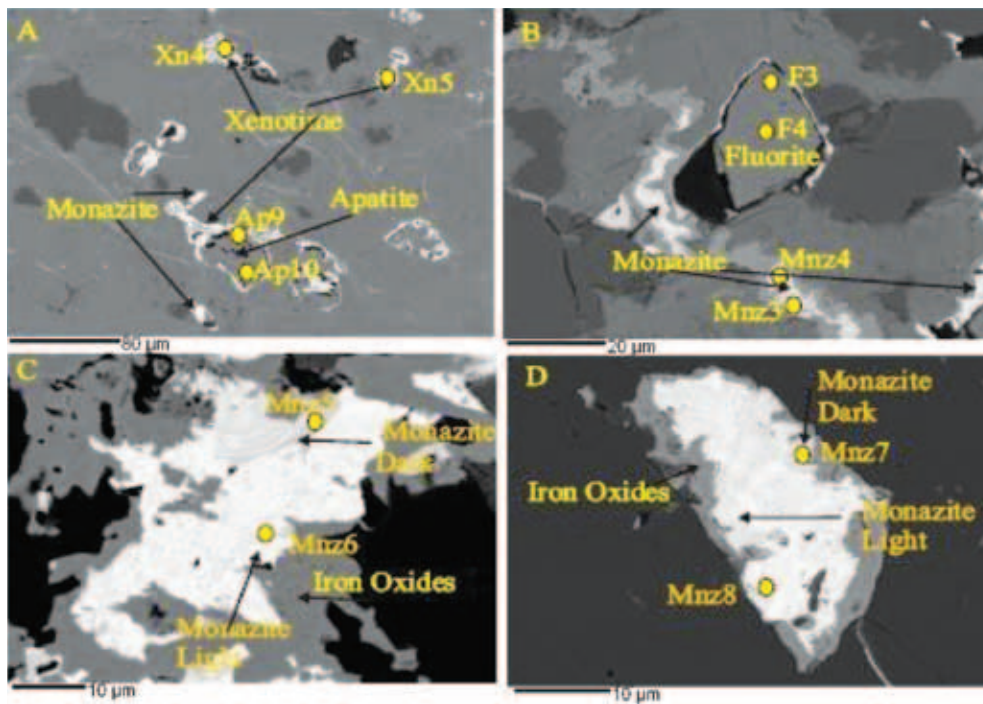


Fig. 5. SEM-BSE images of a) apatite altered and broken-down to xenotime and monazite on the rim of apatite b) fluorite rimmed by monazite and xenotime on a rime, c) and d) heterogeneous monazite grain with darker and lighter parts, associated with iron oxides.

4.15wt %), while in the rim of fluorapatite their values are: CaO (54.97 to 57.2 wt%), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (38.66 to 42.39wt %), and F (3.55 to 3.7wt %). Minor amounts of LREE, Y, Fe, U, Sr and Si were also found as substituents in apatite, especially in the rim of apatite (Fig. 5b, Table 3). Uranium usually substitutes for Ca in apatite.

As pointed out by ZHU & SVERJENSKY (1991), the formation of apatite with a composition of environments is F-rich, even though the activity of Cl in the fluid is much higher than that of F. The formation of the studied apatite is similar. In some carbonatitic apatite (HOGARTH, 1989), F appears to overfill the site, especially when significant CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> is present (PICCOLI & CANDELA, 2002). However, carbonatitic apatite contains very high Sr (commonly > 2500 ppm) and low Y contents (commonly < 400 ppm) (BELOUSOVA et al., 2002). The EPMA data (Table 3) show that studied apatite from the Abu Rusheid lamprophyre dykes are similar to other Kiruna type apatite occurrences and would seem to exclude a carbonatitic affinity.

### Zircon (ZrSiO<sub>4</sub>)

Zircon is found as the most abundant accessory mineral in the studied lamprophyre dykes of the Abu Rusheid area. Zircon occurs as subhedral prismatic to anhedral crystals of 20 to 50 μm in size. In the studied dykes, zircon is characterized by inclusions of xenotime and monazite (Figs. 4e, f). The core of zircon in the mineralized lamprophyre dyke contains inclusions of xenotime and monazite but has lower Hf and HREE contents than the rim of the studied zircon. Zircon crystals in the studied mineralized granites are mainly characterized by considerable metamictization, due to presence of uranium. The EPMA analyses of these crystals confirmed the zircon composi-

tion (Table 4). The EPMA analyses of these crystals confirmed the zircon composition (Table 4). The EPMA analyses (Table 4) indicate that the major oxides in the core of zircon are ZrO<sub>2</sub> (59.93 to 65.22 wt%), SiO<sub>2</sub> (31.71 to 33.12wt %), HfO<sub>2</sub> (0.89 to 1.23 wt%), and HREE (0.36 to 0.47 wt%) with significant amounts of ThO<sub>2</sub> (0.32 to 0.34 wt%), UO<sub>2</sub> (0.022 to 0.84wt %), FeO (0.03 to 2.18wt %), and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.14 to 0.43 wt%). In the rim of zircon, contents of major oxides are mainly ZrO<sub>2</sub> (40.86 to 64.93 wt%), SiO<sub>2</sub> (23.55 to 34.70 wt%), HfO<sub>2</sub> (1.77 to 2.15wt %), and HREE (2.73 to 3.12 wt%) with significant amounts of ThO<sub>2</sub> (0.03 to 2.91 wt%), UO<sub>2</sub> (0.21 to 2.21 wt%), FeO (0.14 to 1.59 wt%), and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8.89 to 9.47 wt%) in (Table 4).

### Fluorite (CaF<sub>2</sub>)

The fluorite occurs as large euhedral to subhedral crystals with sizes ranging from 10 - 40 μm (Figs. 4b, 5b). Fluorite is commonly associated with zircon and thorite. The presence of fluorite accompanying the mineralization indicates alteration processes due to hydrothermal activity. The EPMA analyses (Table 5) indicate that the major oxides and elements in fluorite are CaO (68.75 wt%), and F (45.83 wt%). Significant amounts of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2.7 wt%), REE (2 wt %), Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.7 wt%), ThO<sub>2</sub> (0.2 wt%), and UO<sub>2</sub> (0.02 wt%), were also found in fluorite Ce, Y, U, Th, and REE probably occur as substitutions in fluorite.

### Rutile (TiO<sub>2</sub>)

Rutile was only found as a small crystal in the lamprophyre dyke in the Abu Rusheid area, which contains inclusions of xenotime. Generally, it is altered to xenotime in the fissure tracks of the rutile (Fig. 4c).

Table 3 Composition of selected apatite from the Abu Rusheid lamprophyre dyke, obtained by EPMA

Sample no.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Average	Average
Mineral	Apatite	Apatite	Apatite	Apatite	Apatite	Apatite	Apatite	Apatite	Core	Rim
Oxides (wt%)	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	N=4	N=4
F	3.68	3.18	3.58	3.92	3.55	3.61	3.7	4.15	3.63	3.72
SiO <sub>2</sub>	0.24	0.42	0.12	0.16	0.08	0.16	0.12	0.19	0.14	0.23
MgO	0.01	0.07	0.02	0.04	0.00	0.00	0.03	0.04	0.01	0.04
CaO	55.38	54.97	56.60	57.20	55.65	53.99	56.38	52.93	56.00	54.77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40.96	38.66	41.81	42.39	42.12	39.48	42.4	39.78	41.82	40.08
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.46	0.63	0.51	0.48	0.49	0.71	0.49	0.66	0.49	0.62
SrO	0.45	0.09	0.09	0.10	0.08	0.03	0.09	0.03	0.18	0.06
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.38	0.00	0.00	0.40	0.63	0.00	1.23	0.10	0.56
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	0.00	0.06	0.09	0.06	0.16	0.07	0.00	0.11	0.06
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28	0.00	0.05	0.16	0.00	0.09	0.03	0.00	0.09	0.06
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.11	0.15	0.09	0.08	0.04	0.00	0.00	0.06	0.06
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.00	0.12	0.06	0.00	0.27	0.01	0.10	0.07	0.11
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.06	0.00	0.19	0.00	0.12	0.11	0.18	0.03	0.14
PbO	0.05	0.19	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01	0.06
ThO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.010
UO <sub>2</sub>	0.18	0.13	0.02	0.14	0.00	0.05	0.18	0.22	0.10	0.13
Total	99.92	97.57	101.62	103.37	101.01	97.83	101.72	97.84	101.07	99.15
<b>Cation proportions (based on 4 oxygen atoms)</b>										
F	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Mg	0.001	0.003	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Si	0.007	0.013	0.031	0.005	0.002	0.005	0.004	0.006	0.011	0.007
P	1.01	0.967	1.05	1.06	1.05	0.987	1.05	0.999	1.04	1.00
Cl	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ca	0.938	0.948	0.976	0.986	0.959	0.931	0.972	0.913	0.961	0.945
Fe	0.014	0.020	0.016	0.015	0.015	0.022	0.015	0.021	0.015	0.020
Sr	0.016	0.004	0.003	0.004	0.003	0.001	0.003	0.001	0.006	0.003
Y	0.000	0.008	0.000	0.000	0.008	0.013	0.000	0.026	0.002	0.012
La	0.005	0.000	0.001	0.002	0.001	0.003	0.001	0.000	0.002	0.001
Ce	0.006	0.000	0.001	0.003	0.000	0.002	0.001	0.000	0.002	0.001
Pr	0.001	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.002	0.002
Nd	0.003	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001
Sm	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Gd	0.000	0.001	0.000	0.004	0.000	0.002	0.002	0.004	0.001	0.003
Pb	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
Th	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
U	0.003	0.002	0.001	0.002	0.000	0.001	0.003	0.004	0.002	0.002
LREE	0.81	0.172	0.371	0.588	0.145	0.681	0.218	0.283	0.39	0.99
LREE+Y	0.000	0.557	0.000	0.000	0.544	1.312	0.000	1.508	0.49	1.55

---- not calculated

N = number of samples

### Iron oxides

Iron oxides are most common and very important in the mineralized lamprophyre dyke especially in the fractures and fissure tracks (Fig. 3f). They are associated with monazite, xenotime, apatite, fluorite, zircon, and rutile with inclusions of xenotime.

### Discussion

The field observation shows that the mineralized lamprophyre dyke cuts the mineralized

shear zone of Abu Rusheid area. The NNW-SSE faults along the shear zone itself acted as channel ways for the movement and focusing of hydrothermal fluids. Consequently, the lamprophyre dyke was subjected to the intense alteration processes (ferrugination, fluoritization, and carbonatization), brecciation and mineralization.

The mixing of volatile fluids with meteoric water and fluid-wall rock interactions caused changes in pH and oxygen activity and resulted in deposition of base metals. Precipitation of iron oxides probably decreased the pH of the solution thus giving rise to acidic fluids. The sudden

Table 4. Composition of selected zircon from the Abu Rusheid lamprophyre dyke, obtained by EPMA

Sample no.	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Average	Average
mineral	Zircon	Zircon	Zircon	Zircon	Zircon	Zircon	Zircon	Zircon
Oxides (wt%)	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core N=3	Rim N=3
SiO <sub>2</sub>	31.71	34.72	32.68	23.55	33.12	31.97	32.50	30.08
ZrO <sub>2</sub>	59.93	40.86	61.46	43.59	65.22	64.93	62.20	49.79
HfO <sub>2</sub>	0.89	1.77	1.12	2.15	1.23	2.02	1.08	1.98
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.61	0.43	0.47	0.29	0.56	0.30	0.55
CaO	0.34	2.24	0.34	2.09	0.01	1.44	0.23	1.92
FeO	1.82	1.60	2.18	0.99	1.03	1.14	1.67	1.24
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	8.89	0.43	9.47	0.31	6.89	0.30	8.42
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.85	0.03	1.09	0.06	0.08	0.06	0.68
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.08	0.00	0.15	0.05	0.25	0.02	0.16
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	1.47	0.24	0.96	0.02	0.09	0.13	0.84
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	1.67	0.07	1.77	0.02	0.43	0.12	1.29
PbO	0.02	0.01	0.08	0.15	0.00	0.02	0.03	0.06
ThO <sub>2</sub>	0.34	2.91	0.33	2.41	0.02	0.03	0.23	1.78
UO <sub>2</sub>	0.84	2.21	0.71	2.16	0.10	0.22	0.55	1.53
Total	96.65	99.97	100.1	99.99	99.85	98.89	98.87	99.62
<b>Cation proportions (based on 4 oxygen atoms)</b>								
Si	0.991	1.085	1.021	0.736	1.035	0.999	1.02	0.94
Zr	0.936	0.638	0.960	0.681	1.02	1.01	0.97	0.78
Hf	0.012	0.024	0.015	0.029	0.017	0.020	0.015	0.024
P	0.005	0.015	0.011	0.012	0.000	0.001	0.005	0.009
Ca	0.009	0.062	0.009	0.058	0.000	0.000	0.006	0.04
Fe	0.057	0.050	0.068	0.031	0.001	0.001	0.042	0.027
Y	0.003	0.185	0.009	0.197	0.000	0.000	0.004	0.127
Ce	0.002	0.018	0.001	0.023	0.001	0.002	0.001	0.014
Tb	0.000	0.002	0.000	0.003	0.001	0.000	0.001	0.002
Dy	0.002	0.031	0.005	0.002	0.001	0.000	0.003	0.011
Yb	0.005	0.035	0.002	0.037	0.000	0.009	0.002	0.027
Pb	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001
Th	0.006	0.053	0.006	0.044	0.001	0.001	0.004	0.036
U	0.014	0.038	0.012	0.037	0.002	0.004	0.009	0.026
Zr/ Hf	67.41	23.10	54.68	20.30	53.02	45.41	58.37	29.60
Th / U	0.41	1.32	0.47	1.11	0.23	0.14	0.37	0.857
ΣA+B	2.04	2.28	2.10	1.89	2.08	2.05	2.07	2.07

N = number of samples

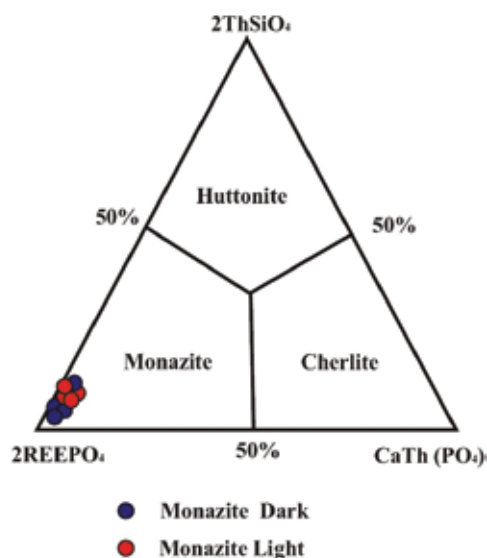
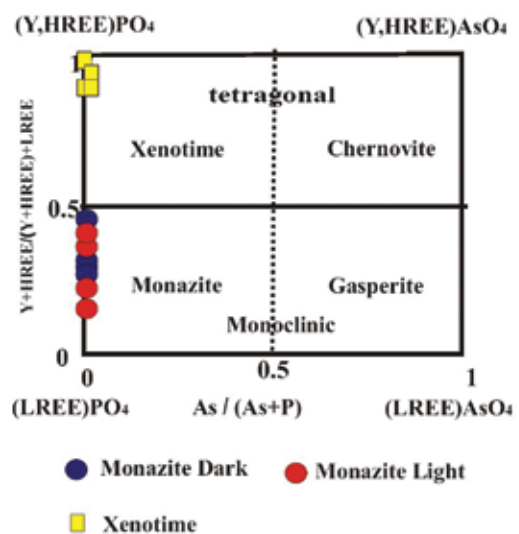
Fig. 6. Nomenclature diagram for the system monazite (2REEPO<sub>4</sub>), cheralite (CaTh (PO<sub>4</sub>)) and huttonite (2ThSiO<sub>4</sub>) (after LINTHOUT, 2007).Fig. 7. Compositions of monazite-gasparite and xenotime-chernovite solid solutions in quadrilateral classification diagram of the (Y,REE)AsO<sub>4</sub>-(Y,REE)PO<sub>4</sub> system (after ONDREJKA et al., 2007).



Table 5. Composition of selected fluorite from the Abu Rusheid lamprophyre dyke, obtained by EPMA

Sample no.	F1	F2	F3	F4	Average	Average
Mineral	Flourite	Flourite	Flourite	Flourite	Core	Rim
Oxides (wt%)	Core	Rim	Core	Rim	N=2	N=2
F	46.21	44.43	44.87	39.80	45.54	42.12
Na <sub>2</sub> O	0.93	0.46	0.32	0.12	0.62	0.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.46	1.46	0.46	2.25	0.46	1.86
SiO <sub>2</sub>	0.81	0.46	1.40	0.65	1.11	0.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	1.48	0.29	2.51	0.23	1.99
CaO	67.72	64.85	64.43	59.97	66.08	62.41
FeO	0.87	2.65	0.47	1.59	0.67	2.12
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.63	3.19	0.06	2.16	0.35	2.68
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.14	0.03	0.13	0.05	0.13
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.72	0.61	0.37	0.14	0.55	0.38
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.07	0.15	0.05	0.09	0.06
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12	0.11	0.11	0.05	0.12	0.08
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.06	0.01	0.00	0.02	0.03
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	0.18	0.05	0.26	0.08	0.22
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12	0.22	0.11	0.22	0.11	0.22
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24	0.41	0.05	0.13	0.15	0.27
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35	1.82	0.38	2.16	0.36	1.99
PbO	0.01	0.08	0.02	0.25	0.01	0.16
ThO <sub>2</sub>	0.19	0.37	0.07	0.24	0.13	0.31
UO <sub>2</sub>	0.13	0.23	0.10	0.13	0.11	0.18
<b>Total</b>	<b>101.4</b>	<b>100.5</b>	<b>103.2</b>	<b>105.2</b>	<b>102.3</b>	<b>102.8</b>
<b>Cation proportions (based on 4 oxygen atoms)</b>						
F	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Na	0.029	0.014	0.010	0.004	0.02	0.009
Al	0.009	0.030	0.010	0.047	0.01	0.039
Si	0.025	0.014	0.044	0.020	0.035	0.017
P	0.004	0.037	0.007	0.063	0.006	0.05
Ca	1.69	1.62	1.61	1.51	1.65	1.57
Fe	0.027	0.083	0.015	0.050	0.021	0.066
Y	0.013	0.066	0.001	0.045	0.007	0.056
La	0.001	0.003	0.001	0.003	0.001	0.003
Ce	0.015	0.013	0.008	0.003	0.012	0.008
Pr	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001
Nd	0.003	0.002	0.002	0.001	0.003	0.002
Sm	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001
Eu	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001
Gd	0.002	0.004	0.001	0.005	0.002	0.005
Dy	0.002	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005
Er	0.005	0.009	0.001	0.003	0.003	0.006
Yb	0.007	0.038	0.008	0.045	0.008	0.042
Pb	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Th	0.004	0.007	0.001	0.004	0.003	0.006
U	0.002	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003
$\Sigma$ HREE	0.80	2.63	0.59	2.77	0.69	2.70
$\Sigma$ REE	1.77	3.63	1.25	3.13	1.51	3.38
$\Sigma$ REE+Y	2.4	6.82	1.32	5.29	3.06	6.06
Th / U	0.32	0.60	0.17	0.37	0.25	0.49

----- not calculated

N = number of samples

change in the pH and temperature of the fluids lead to destabilization of base metal complexes favouring their deposition in the lamprophyre

dykes (ALEXANDROV et al., 1985). The emplacement of the lamprophyre dykes in the host rocks was accompanied by high temperature and CO<sub>2</sub> and caused heating of the host rock. This led to leaching of trace elements from minerals and their remobilization through the foliation, joints, fractures and shear zones, accompanied by hydrothermal solutions, rich in Cu, Y, Pb, W, V, Zn, and U. The rare-metals precipitated from saline and reduced fluids, originating from the two mica granites, in the form of sulfides due to cooling, fluid mixing and wall rock reactions (IBRAHIM et al., 2007b). The lamprophyres, together with hydrothermal solutions and alterations, play an important role in the concentration and formation of the minerals in shear zones. The lamprophyres formed from CO<sub>2</sub>-rich magma. The CO<sub>2</sub> is characterized by its ability to fix all mineralization. So the lamprophyres are considered as a chemical trap for mineralization (IBRAHIM et al., 2007b).

Crystallization of fluorite, galena, and pyrite in the mineralized shear zone of Abu Rusheid area reflects the important role of F and S. Zr, Hf, Th, and Ti are typical high field strength elements (HFSE), which are generally considered immobile during hydrothermal water-rock interaction. Experimental and natural evidence, however, have demonstrated that Zr, Ti, and Th may become mobile especially in high-temperature magmatic or hydrothermal environments containing strong complexing agents such as F, S, and others (KEPPLER, 1993). The fact that F may play a prominent role in the hydrothermal mobilization of HFSE has been indicated for Zr, Th and REE (MOINE & SALVI, 1999). Also, fluoride complexes, e.g., (Zr, F) (REE, F<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, are known to be stable under hydrothermal conditions (MINEYEV, 1963). The abundantly detected zircon and Th-bearing minerals, demonstrably of hydrothermal origin, can be attributed to the role of F-rich fluids. Thus, although Zr and Th are generally considered as highly immobile elements, the occurrence of zircon indicates that significant concentrations of Zr and Th can be transported via specified F-rich fluids.

Monazite associated with fluorapatite is poor in Th (0.00 ≤ ThO<sub>2</sub> ≤ 1.1 wt%), but usually rich in U (0.3 ≤ UO<sub>2</sub> ≤ 2.5 wt%), and the Th/U ratio is always lower than unity and ave-

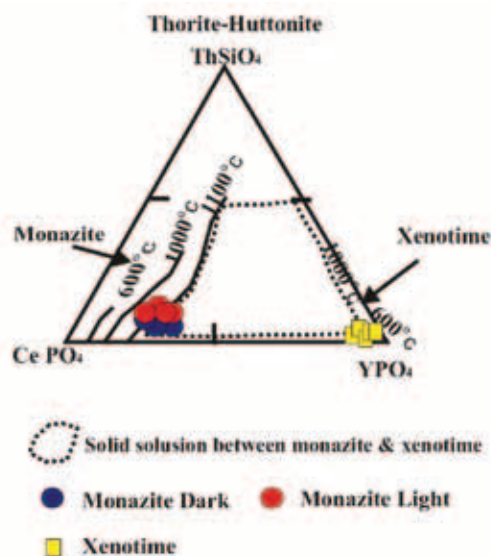


Fig. 8. Compositions of monazite and xenotime plotted in the  $\text{CePO}_4\text{-ThSiO}_4\text{-YPO}_4$  ternary diagram (after GRATZ & HEINRICH, 1997). Dashed lines represent monazite compositions at the respective temperatures at 200 MPa (SEYDOUX-GUILLAUME et al., 2002).

rages to 0.09. In this type of monazite, spatial relations and compositional features, suggest that the Th-poor, U-rich monazite-(Ce) formed as result of fluorapatite metasomatism (ZIEMANN et al., 2005). The studied monazite-(Nd) in the Abu Rusheid dyke, which is associated with fluorapatite, is poor in Th ( $0.02 \leq \text{ThO}_2 \leq 0.81$  wt%) and rich in U ( $0.92 \leq \text{UO}_2 \leq 2.91$  wt%), with the Th/U ratio always lower than unity, averaging 0.16. This indicates that monazite-(Nd) also formed as a result of fluorapatite metasomatism.

### Conclusions

1. The mineralized lamprophyre dyke in the Abu Rusheid area, occurs in a great fracture systems trending in NNW-SSE direction. It cuts cross the cataclastic mylonite and mineralized granitic gneisses. The rocks are intruded by a huge intrusion of muscovite-biotite granites. The dyke in the Abu Rusheid area is characterized by HREE-minerals, such as xenotime-(Y) and monazite-(Nd), and REE-bearing minerals, such as apatite, fluorite, zircon, rutile with inclusions of xenotime and iron oxides.
2. The studied monazite-(Nd) in the lamprophyre dyke is frequently heterogeneous. There are two distinct parts in the same crystal. The part, which appears dark gray in BEI image, is enriched in HREE and depleted in LREE, Ca, Th and U, while the lighter gray part is depleted in HREE, Y and Ca and enriched in Th and U. The studied monazite is also characterized by low Th contents and shows strong zoning that reflects its hydrothermal origin.
3. The solid solutions between monazite and xenotime indicate that they formed at high temperatures from hydrothermal solutions. Composition of the studied monazite-(Nd) and

xenotime-(Y), plotted on the  $\text{CePO}_4\text{-YPO}_4\text{-ThSiO}_4$  ternary system indicated that the studied monazite and xenotime formed at a temperature around 600 °C.

4. The studied monazite-(Nd) in the Abu Rusheid dyke, which is associated with fluorapatite, is poor in Th ( $0.02 \leq \text{ThO}_2 \leq 0.81$  wt%), but usually rich in U ( $0.92 \leq \text{UO}_2 \leq 2.91$  wt%), and the Th/U ratio is always lower than unity and averages to 0.16. This indicates that the monazite formed as a result of fluorapatite metasomatism. The event most likely responsible for metasomatism of the fluorapatite is documented by the associated monazite-(Nd).
5. Apatite was formed by magmatic fractionation and was affected by hydrothermal solutions enriched in REE, P and Y.
6. The emplacement of lamprophyre dykes within the mineralized shear zones was accompanied by high temperatures and  $\text{CO}_2$ . Presence of hydrothermal solutions, heated by the lamprophyre dykes, caused leaching and remobilization of REE, P, Zr, F, Y, and Ti from minerals in the wall rocks, which were then re-precipitated as the REE-minerals monazite-(Nd) and xenotime-(Y) in the fractures and fissure tacks in the apatite, fluorite, rutile, zircon and iron oxides. Fluorite and galena also indicate the displacement of REE, P and Y by hydrothermal solution and re-deposition in the fracture and fissure tack in the apatite, fluorite, rutile, zircon and iron oxide minerals.
7. The studied lamprophyre dyke in the Abu Rusheid area contains high concentrations of REE, P, U, F, Zr, Ti, and Fe, especially in the form of HREE minerals, such as xenotime-(Y), monazite-(Nd), and REE-bearing apatite, fluorite, zircon, and rutile with inclusions of xenotime. Accordingly, the mineralized lamprophyre dyke in the Abu Rusheid area could represent a very good source of REE-minerals, especially HREE.

### Acknowledgments

The author wishes to thank Dr. Douglas Hall and Prof. Dr. David Lentz, for their assistance and providing SEM and EPMA analyses at University of New Brunswick (UNB), Canada. The electron probe microanalyses were carried out during my post-doctoral fellowship at the University of New Brunswick (UNB), Canada.

### References

- ABADALLA, H. M., HELBA, H. & MATSUEDA, H. 2008: Chemistry of zircon in rare metal granitoids and associated rocks, Eastern Desert, Egypt, *Resource Geology*, 59/1: 51-68, doi:10.1111/j.1751-3928.2008.00079.x.
- ABDEL-MONEM, A. A. & HURLEY, P. M. 1979: U-Pb dating of zircons from psammitic gneisses, Wadi Abu Rusheid-Wadi Sikeit area, Egypt. *Inst. Applied. Geology, Jeddah, Bull.*, 3: 165-170.

- ALEXANDROV, I. V., KRASOV, A. M. & KOCHNOVA, L. N. 1985: The effects of K, Na and F on rock-forming mineral assemblages and the formation of tantaloniobate mineralization in rare-element granite pegmatites. *Geochemistry International*, 22: 85-92.
- ALI, M. A. LENTZ, D. R. & HALL, D.C. 2011: Mineralogy and geochemistry of Nb-, Ta-, Sn-, U-, Th-, and Zr-bearing granitic rocks from Abu Rusheid Shear Zones, South Eastern Desert, Egypt, *Chinese Journal of Geochemistry*, 30: 1-28.
- ANDREHS, G. & HEINRICH, W. 1998: Experimental determination of REE distributions between monazite and xenotime: potential for temperature-calibrated geochronology. *Chemical Geology*, 149: 83-96, [http://doi:10.1016/S0009-2541\(98\)00039-4](http://doi:10.1016/S0009-2541(98)00039-4).
- ANTHONY, J. W., BIDEAUX, R. A., BLADH, K. W. & NICHOLS, M. C. 2000: *Handbook of Mineralogy. Arsenates, Phosphates, Vanadates*, Mineral Data Publishing, Tucson, IV: 680 p.
- BEA, F. 1996: Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protholiths; implications for the chemistry of crustal melts. *J. Petrol.*, 37: 521-552.
- BELOUSOVA, E. A., GRIFFIN, W. L., O'REILLY, S. Y. & FISHER, N. I. 2002: Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type. *Journal of Geochemical Exploration*, 76: 45-69, [doi:10.1016/S0375-6742\(02\)00204-2](http://doi:10.1016/S0375-6742(02)00204-2).
- BENNETT, J. D. & MOSLEY, P. N. 1987: Tectonics and evolution, Eastern Desert and Sinai, Egypt. In: MATHEIS, G. & SCHANDELMEIER, H. (eds.) *Current research in African Earth Sciences*. Balkema, Rotterdam, 79-82.
- BUTLER, C. A., HOLDSWORTH, R. E. & STACHAN, R. A. 1995: Evidence for Caledonian sinistral strike-slip motion and associated fault zone weakening, outer Hebrides fault zone, NW Scotland. *Journal of Geological Society*, 152: 743-746, [doi:10.1144/gsjgs.152.5.0743](http://doi:10.1144/gsjgs.152.5.0743).
- DAWOOD, Y. H. 2010: Mineral chemistry and genesis of uranyl minerals associated with psammitic gneisses, Abu Rusheid area, South Eastern Desert of Egypt. *JKAU: Earth Sci.*, 21/1: 137-169, [doi:10.4197/Ear.21-1.6](http://doi:10.4197/Ear.21-1.6).
- DEER, W. A., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. 1966: *An introduction to rock forming minerals*. Longmans, London: 517 p.
- EL-GEMMIZI, M. A. 1984: On the occurrence and genesis of mud zircon in the radioactive psammitic gneisses of Wadi Nugrus, Eastern Desert, Egypt. *Journal University of Kuwait (Sci.)*, 2: 285-294.
- FÖRSTER, H. J. 2000: Cerite-(Ce) and thorian synchysite-(Ce) from Niederbobritsch (Erzgebirge, Germany): implications for the differential mobility of Th and the LREE during granite alteration. *Canadian Mineralogist*, 38: 67-79, [doi:10.2113/gscanmin.38.1.67](http://doi:10.2113/gscanmin.38.1.67).
- FÖRSTER, H. J. 1998a: The chemical composition of REE-Y-Th-U rich accessory minerals in peraluminous granites of the Erzgebirge-Fichtelgebirge region, Germany, Part I: The monazite-(Ce)-brabantite solid solution series. *Am. Mineral.*, 83: 259-272.
- FÖRSTER, H. J. 1998b: The chemical composition of REE-Y-Th-U rich accessory minerals in peraluminous granites of the Erzgebirge-Fichtelgebirge region, Germany, Part II: xenotime. *Am. Mineral.*, 83: 1302-1315.
- FRITZ, H., DALLMEYER, D. R., WALLBRECHER, E., LOIZENBAUER, J., HOINKES, G., NEUMAYR, P. & KHUDEIR, A. A. 2002: Neoproterozoic tectono-thermal evolution of the Central Eastern Desert, Egypt: A slow velocity tectonic process of core complex exhumation [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 34: 137-155, [doi:10.1016/S0899-5362\(02\)00014-3](http://doi:10.1016/S0899-5362(02)00014-3).
- GAINES, R., SKINNER, H.C.W., FOORD, E., MASON, B. & ROSENSWEIG, A. 1997: *Dana's New Mineralogy*, 8th Edition. John Wiley and Sons, New York: 1906 p.
- GRAESER, S. & SCHWANDER, H. 1987: Gasparite-(Ce) and monazite-(Nd): two new minerals to the monazite group from the Alps. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 67: 103-113.
- GRATZ, R. & HEINRICH, W. 1997: Monazite-xenotime thermobarometry: experimental calibration of the miscibility gap in the binary system CePO<sub>4</sub>-YPO<sub>4</sub>. *Am. Mineral.*, 82: 772-780.
- GREILING, R. O., EL-RAMLY, M. F., RASHWAN, A. A. & KAMAL EL-DIN, G. M. 1993: Towards a comprehensive structural synthesis of the (Proterozoic) Arabian Nubian Shield in Egypt. In: THORWEIHE, U. & SCHANDELMEIER, H. (eds.): *Geoscient. Res. Northeast Africa*. Balkema, Rotterdam, 15-19.
- GREILING, R. O., KRÖNER, A., EL-RAMLY, M. F. & RASHWAN, A. A. 1988: Structural relationships between the southern and central parts of the Eastern Desert of Egypt: details of a fold and thrust belt. In: EL-GABY, S. & GREILING, R. O. (eds.): *The Pan-African belt of Northeast Africa and adjacent areas*. Vieweg, Wiesbaden, 121-146.
- HANSON, G. N. 1978: Application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 39: 26-43.
- HASSAN, M. A. 1973: Geology and geochemistry of radioactive columbite-bearing psammitic gneiss of Wadi Abu Rusheid. South Eastern Desert, Egypt [J]. *Annals of Geological Survey* 3: 207 p.
- HASSAN, M. A. 1964: *Geology and Petrographical Studies of the Radioactive Minerals and Rocks in Wadi Sikait-Wadi El-Gemal Area, Eastern Desert, Egypt*, M. Sc. Thesis, Cairo University: 165 p.
- HEINRICH, W., ANDREHS, G. & FRANZ, G. 1997: Monazite-xenotime miscibility gap thermometry: I. An empirical calibration. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 3-17.
- HILMY, M.E., EL-BAYOUMI, R. M. & EID, A. S. 1990: Geology, geochemistry and mineralization of



- the psammitic gneiss of the Wadi Abu Rusheid, Eastern Desert, Egypt. *J. African Earth Science*, 11: 197–205, doi:10.1016/0899-5362(90)90088-V
- GARTH, D. D. 1989: Pyrochlore, apatite and amphibole: distinctive minerals in carbonatite. In: BELL, K. (ed.): *Carbonatites Genesis and Evolution*. Unwin Hyman, London, 105–148.
- HUMPHRIS, S. E. 1984: The mobility of the REE in the crust. In HENDERSON, P. (ed.): *REE Geochemistry [M]*. Elsevier, Amsterdam, 317–342.
- IBRAHIM, I., SALEH, G. M., AMER, T., MAHMOUD, F., ABU EL HASSAN, A., ALI, M. A., AZAB, M. S., RASHED, M., KHALEAL, F. & MAHMOUD, M. 2004: Uranium and Associated Rare Metals Potentials of Abu Rusheid Brecciated Shear Zone II, South Eastern Desert, Egypt [M]. Nuclear Materials Authority, Internal Report, Cairo: 182 p.
- IBRAHIM, I., SALEH, G. M., HASSAN, M. A., EL-TOKHI, M. M. & RASHED, M.A. 2007a: Geochemistry of lamprophyres-bearing Uranium Mineralization, Abu Rusheid Area, South Eastern Desert, Egypt [C]. The 10<sup>th</sup> Int. Min. Petr. & Metal. Eng. Conf. Mining, 41–55.
- IBRAHIM, I., SALEH, G. M. & RASHED, M.A. 2007b: Base Metal Mineralization in Lamprophyre Dyke at Abu Rusheid Area, South Eastern Desert, Egypt [C]. The 10<sup>th</sup> Int. Min. Petrol. & Metal. Eng. Conf. Mining, 31–40.
- JEFFERIES, N. L. 1984: The distribution of the rare earth elements within the Carnmeneltis Pluton, Cornwall. *Mineralogical Magazine*, 49: 495–504.
- KEPPLER, H. 1993: Influence of fluorite on the enrichment of high field strength trace elements in granitic rocks. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 114: 479–788.
- MASSAU, M., ČERNÝ, P., COOPER, M. A., CHAPMAN, R. & GRICE, J. D. 2002: Monazite-(Sm), a new member of the monazite group from the Annie Claim #3 granitic pegmatite, south-eastern Manitoba. *Canadian Mineralogist*, 40: 1649–1655.
- MINEYEV, D. A. 1963: Geochemical differentiation of the rare earth geochemistry (USSR), *International Geochemistry*, 12: 1129–1149.
- MIYAWAKI, R. & NAKAI, I. 1987: Crystal structures of rare-earth minerals. *Rare Earths (Kidorui)*, 11:1–133.
- MOGHAZI, A. M., HASSANEN, M. A., MOHAMED, F. H. & ALI, S. 2004: Late Neoproterozoic strongly peraluminous leucogranites, South Eastern Desert, Egypt-petrogenesis and geodynamic significance. *Mineral. Petrol.*, 81/2: 19–41, doi:10.1007/s00710-003-0021-5.
- MOINE, B. & SALVI, S. 1999: Role of fluorine-rich fluids in the hydrothermal transport of “immobile” elements (Th, Zr, REE, Zl). *Bull. De liaison de la Societe Francaise de Mineralogie et de Cristallographie (S. F. M. C.)* 11: 90–92.
- NI, Y., HUGHES, J. M. & HUGHES, J. M. 1995: Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures. *American Mineralogist*, 80: 21–26.
- ONDREJKA, M., UHER, P., PRŠEK, J. & OZDÍN, D. 2007: Arsenian monazite-(Ce) and xenotime-(Y), REE arsenates and carbonates from the Tisovec-Rejkovo rhyolite, Western Carpathians, Slovakia: Composition and substitutions in the (REE,Y)XO<sub>4</sub>. *Lithos*, 95: 116–129, doi:10.1016/j.lithos.2006.07.019
- PABST, A. & HUTTON, C. O. 1951: Huttonite a new monoclinic thorium silicate. *Am. Mineral.*, 36: 60–69.
- PICCOLI, P. M. & CANDELA, P. A. 2002: Apatite in igneous systems. In: KOHN, M. J. et al. (eds.): *Phosphates: Geochemical, Geobiological, and Materials Importance. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48, Mineralogical Society of America, Washington, D.C. 255–292.
- RASLAN, M. F. 2005: Mineralogy and physical upgrading of Abu Rusheid radioactive gneiss, South Eastern Desert, Egypt. The 9<sup>th</sup> International Mining, Petroleum, and Metallurgical Engineering Conference February, Faculty of Engineering- Cairo University, Mining 27: 43–52.
- RASLAN, M. F. 2008: Occurrence of Ishikawaite (Uranium-rich Samarskite) in the mineralized Abu Rusheid gneiss, South Eastern Desert, Egypt. *International Geology Review* 50/12: 1132–1140, doi:10.2747/0020-6814.50.12.1132
- ROSE, D. 1980: Brabantite, CaTh[PO<sub>4</sub>]<sub>2</sub>, a new mineral of the monazite group, *N. Jahrb. Miner. Monatsh.*, 247–257.
- SALEH, G. M. 1997: The potentiality of uranium occurrences in Wadi Nugrus area, South Eastern Desert, Egypt. Ph. D. Thesis, Mansuora University, 171 p.
- SCHANDL, E. S. & GORTON, M. P. 2004: A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: Criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 99/5: 1027–1035, doi:10.2113/gsecongeo.99.5.1027.
- SEYDOUX-GUILLAUME, A. M., WIRTH, R., HEINRICH, W. & MONTEL, J. M. 2002: Experimental determination of Thorium partitioning between monazite and xenotime using analytical electron microscopy and X-ray diffraction Rietveld analysis. *Eur. J. Mineral.*, 14/5: 869–878, doi:10.1127/0935-1221/2002/0014-0869.
- ZHU, C. & SVERJENSKY, D. A. 1991: Partitioning of FCl-OH between minerals and hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55:1837–1858.
- ZIEMANN, M. A., FÖRSTER, H. J., HARLOV, D. E. & FREI, D. 2005: Origin of fluorapatite-monazite assemblages in a metamorphosed, sillimanitebearing pegmatoid, Reinbolt Hills, East Antarctica. *Eur. J. Mineral.*, 17: 567–579.

# Prostorski model visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju

## Perched aquifers spatial model: a case study for Ljubljansko polje (central Slovenia)

Dejan ŠRAM<sup>1</sup>, Mihael BRENČIČ<sup>1,2</sup>, Andrej LAPANJE<sup>1</sup> & Mitja JANŽA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geološki zavod Slovenije, Oddelek za hidrogeologijo, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana;

e-mail: dejan.sram@geo-zs.si; mihael.brencic@geo.ntf.uni-lj.si; andrej.lapanje@geo-zs.si; mitja.janja@geo-zs.si

Prejeto / Received 21. 3. 2012; Sprejeto / Accepted 11. 6. 2012

*Ključne besede:* viseči vodonosnik, geostatistično modeliranje, Ljubljansko polje, medzrnski vodonosnik

*Key words:* perched aquifer, geostatistical modeling, Ljubljansko polje, intergranular aquifer

### Izvleček

Vodonosnik Ljubljanskega polja je eden izmed največjih in najpomembnejših vodonosnikov v Sloveniji. V večjem delu je vodonosnik odprt, na nekaterih območjih, v jugozahodnem delu pa se pojavljajo slabše prepustne plasti, kjer nastanejo viseči vodonosniki. Na podlagi obdelave litoloških podatkov iz vrtin je bil s pomočjo geostatističnega modeliranja s sekvenčno indikatorsko simulacijo izdelan hidrogeološki model zahodnega dela Ljubljanskega polja s poudarkom na prepustnosti litoloških enot. Iz hidrogeološkega modela so bile izločene slabše prepustne plasti s koeficientom prepustnosti  $K < 10^{-6}$  m/s in površino večjo od 0,07 km<sup>2</sup>, ki so potencialna območja za pojav visečih vodonosnikov. Rezultati modela kažejo največjo koncentracijo slabše prepustnih plasti pod vznožjem Šišenskega in Grajskega hriba.

### Abstract

Ljubljansko polje aquifer is one of the biggest and most important aquifers in Slovenia. In general it is an unconfined aquifer, but locally, on the SW part, layers with low hydraulic conductivity appear and on those areas perched aquifers are formed. Based on lithological data from boreholes (emphasizing hydraulic conductivity of lithological units) and use of geostatistical method Sequential Indicator Simulation (SIS) hydrogeological model of western part of Ljubljansko polje was made. In the model layers with hydraulic conductivity  $K < 10^{-6}$  m/s and area larger than 0.07 km<sup>2</sup> were defined as potential areas of perched aquifers. The majority of them are located on the foothills of Šišenski and Grajski hrib.

### Uvod

Vodonosnik Ljubljanskega polja je eden izmed največjih vodonosnikov v Sloveniji. Iz njega se s pitno vodo oskrbuje preko 300.000 prebivalcev Ljubljane in okolice, zato je njegova zaščita in poznavanje njegovih geoloških lastnosti izjemnega pomena.

Vodonosnik je tema raziskav že vse od konca 19. stoletja in je zaradi tega že zelo dobro raziskan, njegove karakteristike in možnosti izkoriščanja so dobro opredeljene, kljub temu pa je zaradi pestre geologije še veliko neznanega oziroma neraziskanega. Med slabo raziskane pojave spadajo tudi viseči vodonosniki.

Vodonosnik je razvit v kotlini, ki je zasuta s kvartarnim rečnim prodom in peskom z vmesnimi lečami melja, gline in konglomerata (ŽLEBNIK, 1971). Slabše prepustne plasti med bolj prepustnimi plastmi omogočajo nastanek visečih vodonosnikov. Iz dosedanjega poznavanja hidrogeoloških lastnosti vodonosnika Ljubljanskega polja se do-

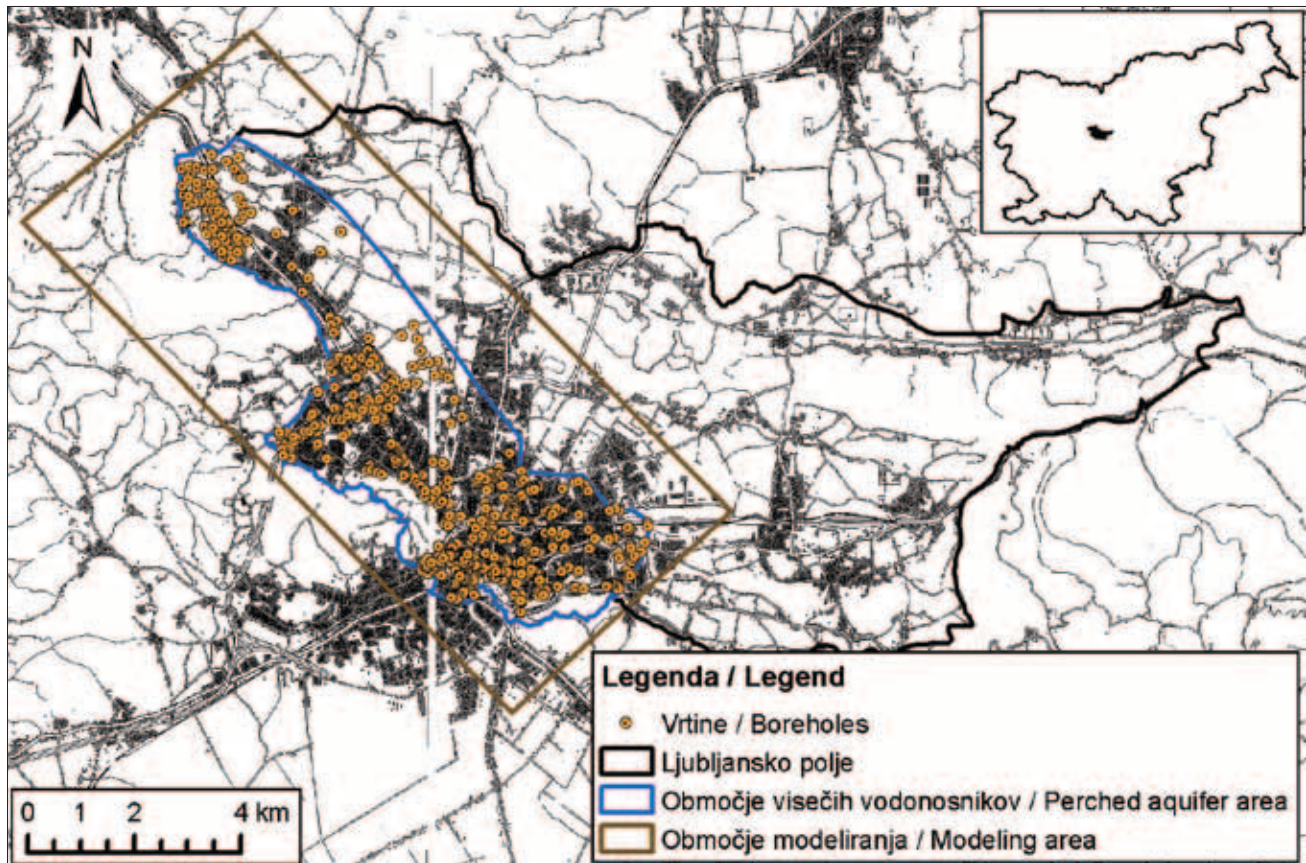
mneva, da je porazdelitev visečih vodonosnikov pomembna s stališča vpliva na kemijsko stanje podzemne vode in na razširjanje onesnaževal, vendar pa je njihovo trenutno poznavanje relativno omejeno.

Namen izdelave prostorskega modela visečih vodonosnikov je določitev razprostiranja slabše prepustnih plasti znotraj dobro prepustnega nezasičenega dela vodonosnika v zahodnem delu Ljubljanskega polja. Na podlagi obstoječih podatkov o že znanih visečih vodonosnikih in litoloških popisov vrtin so bila določena potencialna območja visečih vodonosnikov.

### Obravnavano območje

Obravnavano območje se nahaja v osrednji Sloveniji in je del Ljubljanske kotline. Razteza se v smeri od severozahoda proti jugovzhodu. Severno in severovzhodno mejo predstavljajo Šmarna gora (669 m), Soteški hrib (406 m) in Videmski hrib





Sl. 1. Ljubljansko polje, območje visečih vodonosnikov, območje modeliranja ter lokacije vrtin

Fig. 1. Ljubljansko polje, perched aquifer area, modeling area and boreholes locations

(371 m). Na zahodu območje meji na Polhograjsko hribovje, ki se južno nadaljuje v Šišenski hrib (429 m) ter Grajski hrib. Na jugu in jugovzhodu je območje omejeno z reko Ljubljanico ter zahodnim Posavskim hribovjem (sl. 1).

Območje modeliranja je omejeno glede na znane podatke, kjer se pojavljajo viseči vodonosniki in sicer na zahodni del Ljubljanskega polja tj. Šiška, Vižmarje ter center mesta Ljubljane do Most (sl. 1).

Podlago Ljubljanskega polja sestavljajo karbonske in permske kamnine, ki jih tvorijo kremeni konglomerati, peščenjaki, meljevci in glinasti skrilavci (ŽLEBNIK, 1971; PREMUR, 1983; KOLAR-JURKOVŠEK & JURKOVŠEK, 2007). Največja globina do predkvartarne podlage je 105 m (BRAČIČ-ŽELEZNIK et al., 2005).

V pleistocenu in holocenu so Ljubljansko udorino s svojimi nanosi zapolnjevale številne reke in potoki, od tega največji delež pripada prodno peščenim naplavinam reke Save (BRAČIČ-ŽELEZNIK et al., 2005). Prod in pesek sta pogosto sprijeta v konglomerat.

Med pleistocenskimi sedimenti prevladujejo karbonatni konglomeratni in prodni zasipi (PREMUR, 1983). Sedimentacijo, erozijo in razvoj Ljubljanske kotline je podrobno preučil ŽLEBNIK (1971), ki je na območju ločil tri konglomeratne zasilne in zgornji prodni zasip, ki oblikujejo visoke terase. Nad vsakim zasipom se na več mestih pojavljajo glinene plasti s preperelimi prodniki. Absolutna starost zasipov ni določena. Relativno

datiranje je možno le na podlagi lege glin, ki se nahajajo med zasipi.

#### Viseči vodonosnik

Viseči vodonosnik je pojav podzemne vode v pretežno nezasičenem delu vodonosnika nad regionalno gladino podzemne vode v odprtem vodonosniku. Do nastanka visečega vodonosnika pride, ko voda med vertikalnim tokom skozi nezasičeno območje naleti na zelo slabo prepustne plasti, kot so na primer leče gline. Zaradi tega se voda nabere nad glineno plastjo in prične odtekati horizontalno do roba slabo prepustne plasti, ko se ponovno prične precejati v vertikalni smeri (sl. 2). Obseg visečega vodonosnika in debelina omočenega dela sta sezonsko zelo spremenljivi.

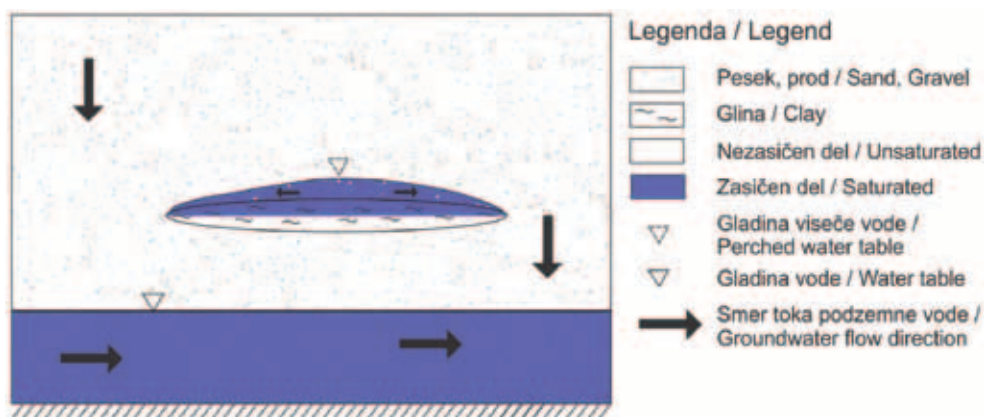
#### Metode

Prostorski model visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju je bil izdelan na podlagi:

- klasifikacije litoloških podatkov,
- izdelave tridimenzionalnega strukturnega modela,
- geostatistične analize.

Klasifikacija litoloških podatkov izhaja iz popisov vrtin, ki so bili poenoteni s pomočjo geomehanske AC klasifikacije ter uporabi koncepta hidrofaciesa. Arthur Casagrande (AC) klasifikacija





Sl. 2. Viseči vodonosnik (prirejeno po HISCOCK, 2005)  
Fig. 2. Perched aquifer (modified after HISCOCK, 2005)

razvršča zemljine v posamezne razrede, glede na velikost njihovih delcev in plastičnost. Posamezni hidrofacies zajema sedimente, ki so nastali v enotnem sedimentacijskem okolju in imajo primerljive hidrogeološke lastnosti (ANDERSON, 1989). Na podlagi teh izhodišč je bilo določenih pet skupin. Prve štiri skupine predstavljajo hidrofaciesi (tab. 1), v zadnjo, peto skupino so uvrščene vse ostale enote AC klasifikacije.

Primerno urejeni podatki so bili nato vključeni v programski paket Jewel Suite 2011 (JOA OIL & GAS, 2011), kjer se je izvedla geostatistična interpolacija.

Tridimenzionalni strukturni model je namenjen opredelitvi meje modeliranega območja. V tem modelu se določi površje in podlago modela.

Geostatistična analiza predstavlja najbolj kompleksen del izdelave prostorskega modela visečih vodonosnikov. Izvedena je bila s programskim paketom Jewel Suite 2011, ki omogoča izdelavo zahtevnih tridimenzionalnih strukturnih in geoloških modelov. Programska oprema za geostatistično analizo je bila izbrana glede na dostopne programe in ocenjeno primernost metod. Za izdelavo porazdelitve slabše prepustnih plasti je bil preizkušen tudi program Rockworks, ki se je izkazal za manj uporabnega od Jewel Suite 2011 (ŠRAM, 2011). Rockworks uporablja interpolacijsko metodo »lithological blending«, ki deluje po principu najbližjih znanih enot. Interpolacija poteka tako, da program radialno iz celice z znano

vrednostjo pripiše enako vrednost vsaki naslednji celici, vse dokler nimajo vse celice v modelu določene vrednosti. Ta interpolacijska metoda se je izkazala za neprimerno predvsem na območjih, kjer ni veliko podatkov saj tam posledično dobimo na relativno velikem območju samo vrednosti ene točke. Jewel Suite 2011 za interpolacijo ponuja vrsto metod, ki so uporabne za parametrične spremenljivke. Za neparametrične spremenljivke pa je primerna sekvenčna indikatorska simulacija, ki je bila uporabljena za izdelavo opisanega modela visečih vodonosnikov.

### Semivariogram

Prvi korak pri uporabi geostatističnih metod je analiza povezanosti prostorskih spremenljivk. To pomeni, da se mora najprej določiti funkcija, ki opiše prostorsko odvisnost spremenljivk. Statistika, ki podaja odvisnost prostorske spremenljivke od položaja v prostoru, se imenuje semivarianca:

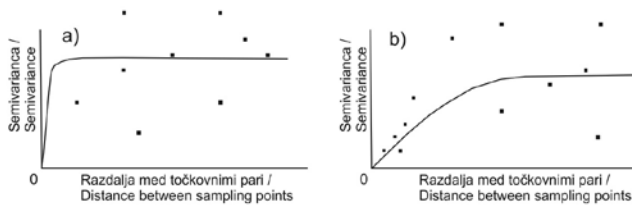
$$\gamma = \frac{(X_i - X_j)^2}{2}$$

kjer je X vrednost spremenljivke v točkah  $i$  in  $j$ . Za točki na istem mestu ( $i = j$ ) bo vrednost semivariance enaka nič. Ko oddaljenost med njima narašča, prav tako narašča vrednost semivariance ( $\gamma \geq 0$ ) (MCKILLUP & DYAR, 2010) (sl. 3).

Tabela 1. Osnovne značilnosti hidrofaciesov (JANŽA, 2009)

Table 1. Attributes of the hydrofacies (JANŽA, 2009)

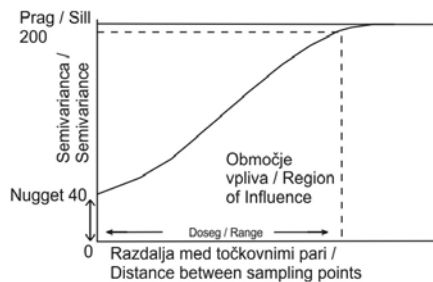
Hidrofaciesi / Hydrofacies	Geološke interpretacije / Geologic interpretations	Pogosti opisi / Common descriptions
<i>P – Prod / Gravel</i>	Sedimenti rečnih kanalov / Channel deposits	Prod, peščen prod, sortiran pesek / Gravel, sandy gravel, pebbles, well sorted sand
<i>MGP – Melj in glina s prodrom / Silt and clay with gravel</i>	Produkt pedogenih procesov, zapolnitev prostora med prodniki z drobno frakcijo, sedimenti gravitacijskih tokov / Products of pedogenic processes, fine grained sediments, filled pore space between pebbles, debris flow sediments	Meljast ali glinen prod, melj ali glina s prodniki / Silty or clayey gravel, silt and clay with gravel
<i>MG – Melj in glina / Silt and clay</i>	Sedimenti poplavnih ravnin, produkt pedogenih procesov / Flood plain sediments, products of pedogenic processes	Melj, glina, glinast melj, slabo sortiran pesek / Silt, clay, clayey silt, poorly graded sand
<i>Ko – Konglomerat / Conglomerate</i>	Litificirani rečni sedimenti (predvsem rečnih kanalov) / Lithified river sediments (mainly channel sediments)	Konglomerat, konglomerat z vložki proda ali peska / Conglomerate, conglomerate with intercalations of gravel or sand



Sl. 3. Teoretični semivariogram: (a) brez regionalne odvisnosti in (b) z regionalno odvisnostjo (prirejeno po MCKILLUP & DYAR, 2010).

Fig. 3. The theoretical semivariogram: (a) No regional dependence and (b) with regional dependence (modified after MCKILLUP & DYAR, 2010).

Semivarianca se z večanjem razdalje med točkami povečuje, posledično pa se zmanjša regionalna odvisnost. Semivarianca narašča samo do določene meje, ki ji pravimo doseg oziroma območje vpliva (sl. 4). Doseg določa sosesčino, znotraj katere so vrednosti med seboj odvisne. Največja dosežena vrednost semivariance znotraj dosega se imenuje prag (ang. sill) (sl. 4) in predstavlja zgornjo mejo semivariance. Ko teoretični semivariogram preseže vrednost praga, točke nimajo več medsebojnega vpliva (MCKILLUP & DYAR, 2010).



Sl. 4. Teoretični semivariogram (prirejeno po MCKILLUP & DYAR, 2010).

Fig. 4. Theoretical semivariogram (modified after MCKILLUP & DYAR, 2010).

## Krigiranje

Osnovno krigiranje je ena izmed bolj pogosto uporabljenih interpolacijskih metod, ki nam poda neznano vrednost ( $Z$ ) v eni ( $x_0$ ) ali več točkah ali na večjih površinah z malo znanimi vrednostmi, in sicer glede na znane vrednosti v njeni okolici in ustrezen semivariogram (WEBSTER, 2007):

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i),$$

kjer je  $\lambda_i$  utežnostni koeficient, katerega izračunamo na podlagi oddaljenosti točk, ki se nahajajo znotraj semivariograma (MALVIĆ, 2008).

Za pravičen izračun krigirane vrednosti je potrebno vpeljati in rešiti še dodatno enačbo (DAVIS, 2002; BOHLING, 2005):

$$\hat{\sigma}^2(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_n \gamma(x_n - x) - \mu_n,$$

kjer je

- $\hat{\sigma}^2(x)$  varianca napake,
- $\lambda_n$  utežnostni koeficient,
- $\gamma$  semivarianca,
- $\mu_n$  Langrageov multiplikator.

## Indikatorsko krigiranje

Osnovno krigiranje ocenjuje vrednost regionalne parametrične spremenljivke (koncentracije, gladina podzemne vode, ...) na neznanem območju. Velikokrat pa se pojavijo potrebe po oceni neparametričnih spremenljivk (npr. litološki podatki). Na tem mestu je priročno indikatorsko krigiranje, ki uporablja binarne spremenljivke oz. indikatorje. V indikatorje je moč spremeniti tudi zvezne spremenljivke, kadar želimo imeti informacije o prekoračitvi mejne vrednosti (WEBSTER, 2007):

$$\omega(x) = \begin{cases} 1; & z(x) \leq z_c, \\ 0; & \text{drugače} \end{cases}$$

kjer je  $z_c$  mejna vrednost.

Indikatorsko krigiranje je z vpeljavo indikatorjev rešljivo s preprostim krigiranjem:

$$\hat{\Omega}(x_0; z_c) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \omega(x_i; z_c) + \left\{ 1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i \right\} (\bar{\omega}; z_c),$$

kjer je

$\hat{\Omega}$  indikatorska funkcija,

$\lambda_i$  utež,

$\omega$  indikator,

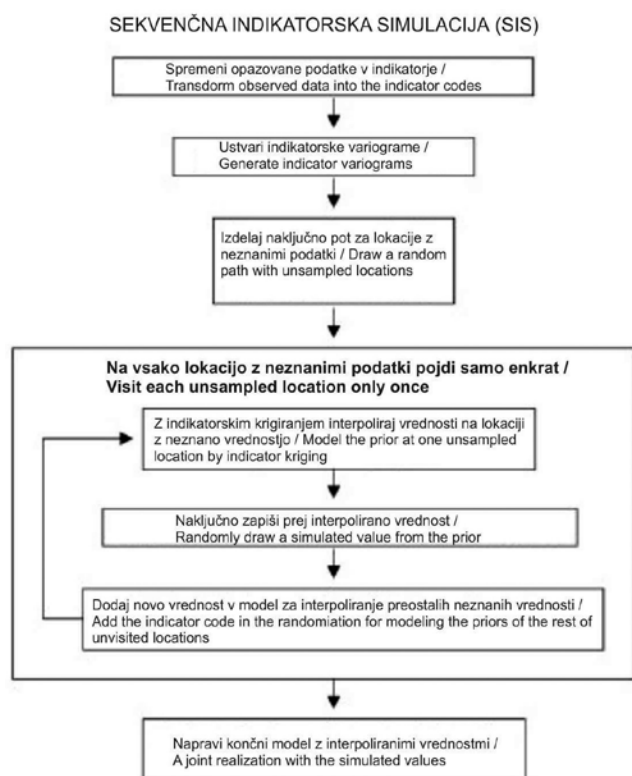
$\bar{\omega}$  povprečje indikatorja

$z_c$  mejna vrednost.

## Sekvenčna indikatorska simulacija

Sekvenčna indikatorska simulacija je metoda, ki združuje parametrične in neparametrične interpolacijske metode za oceno neznanih vrednosti. Temelji na zaporednih simulacijah in indikatorskem krigiranju (sl. 5). Vključuje vse podatke v dosegu, določene na semivariogramu, originalne podatke in že prej simulirane vrednosti (JUANG et al., 2004) in uporablja algoritem, ki temelji na vsaki celici posebej (DEUTSCH, 1999). Je metoda, ki spada med naključne (stohastične) simulacije. Krigiranje, kot deterministična metoda teži k srednji vrednosti podatkov, kar pomeni, da podcenjuje najvišje vrednosti in precenjuje najnižje vrednosti, medtem ko stohastične metode ne uporabljajo srednje vrednosti in podajajo rezultate v celotnem razponu vrednosti vhodnih podatkov (WEBSTER, 2007).

Sekvenčno indikatorsko simulacijo so uporabili mnogi raziskovalci, tako za dvodimenzionalno (JUANG et al., 2004) kot za tridimenzionalno modeliranje (CABELLO, 2007; ZAPPA et al., 2006).



Sl. 5. Potek sekvenčne indikatorske simulacije (prirejeno po JUANG et al., 2004).

Fig. 5. Sequential indicator simulation flow chart (modified after JUANG et al., 2004).

Hierarhična sekvenčna interpolacija je metoda, ki s pomočjo sekvenčne indikatorske simulacije izdeluje parcialne modele, kateri se na koncu združijo v končni model. CABELLO et al. (2007) ter ZAPPA et al. (2006) ugotavljajo njene prednosti, saj zaradi heterogenosti litoloških enot ni primerno uporabiti enotnih parametrov za celoten model. Jewel Suite 2011 omogoča izdelavo semivariograma za vsako spremenljivko posebej v horizontalni in vertikalni smeri, kar omogoča uporabo hierarhične sekvenčne simulacije. Priprava semivariograma in izbira najbolj ustreznega modela za semivariogram sta ključnega pomena pri interpolacijski metodi. V primeru napačne izbire parametrov semivariograma, so rezultati lahko popačeni ali celo napačni.

Sekvenčna indikatorska simulacija je interpolacijska metoda, s katero je moč dobiti različne, vendar enako verjetne modele iz enakih vhodnih podatkov. Predstavljen hidrogeološki model je ena izmed možnih realizacij metode.

Za izdelavo prostorskega modela so bile potrebne poenostavitve podatkov, prav tako pa so v modelu vključeni že predhodno obdelani podatki (popis jeder vrtin). Zanesljivost modela je tako odvisna od kakovosti litološkega popisa jedra vrtin (JANŽA, 2009), določitev pravilne razdalje za povprečeneje podatkov pri izdelavi semivariograma, ter pravilne izbire teoretičnega modela za indikatorski semivariogram.

## Rezultati

### Klasifikacija litoloških podatkov

Pri izdelavi hidrogeološkega modela so izhodišče predstavljali popisi jeder vrtin na izbranem območju (sl. 1). Obdelanih je bilo 1138 vrtin s skupno dolžino opisanih odsekov 20944 m. Pri obdelavi so se uporabili vsi dostopni podatki iz poročil arhiva Geološkega zavoda Slovenije, kjer se nahajajo informacije o visečih vodonosnikih.

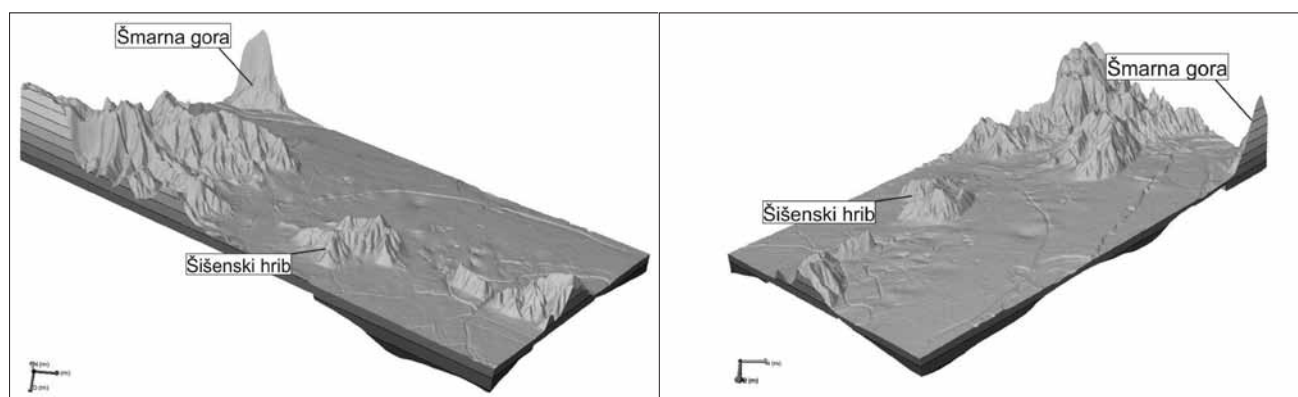
Litološki podatki iz vrtin so bili v prvem koraku razvrščeni po geomehanski AC klasifikaciji. V nadaljevanju pa je bilo 34 razredov AC klasifikacije združenih v pet skupin, štiri hidrofaciese, ki temeljijo na sedimentoloških ter hidroloških kriterijih in dodatno skupino, kamor so bile uvrščene vse ostale kategorije (humus, nasip, predkvartarna podlaga, šota, ...).

### Strukturni tridimenzionalni model

Strukturni model (sl. 6) je omejen s:

- horizontalnima ploskvama, ki določata spodnjo in zgornjo mejo modela in
- tridimenzionalno mrežo, ki določa horizontalno raztezanje v x, y in z smeri.

Za zgornjo ploskev v modelu je bil uporabljen digitalni model višine (DMV) (MOP – GURS, 2009) z ločljivostjo 12,5 \* 12,5 m. Spodnjo plo-



Sl. 6. Tridimenzionalni strukturni model zahodnega dela Ljubljanskega polja (povečava v vertikalni smeri je 5x)

Fig. 6. 3D structural model of Western part of Ljubljano polje (vertical exaggeration is 5x)



skev modela predstavlja rastrska datoteka s podatki o nadmorski višini predkvartarne podlage v ločljivosti 200 \* 200 m (JAMNIK et al., 2001). Model je omejen na že prej določeno območje, tj. zahodni del Ljubljanskega polja. Velikost celice v modelu je 25 m v horizontalni smeri ter 1 m v vertikalni smeri.

### Hidrogeološki tridimenzionalni model

#### Semivariogram

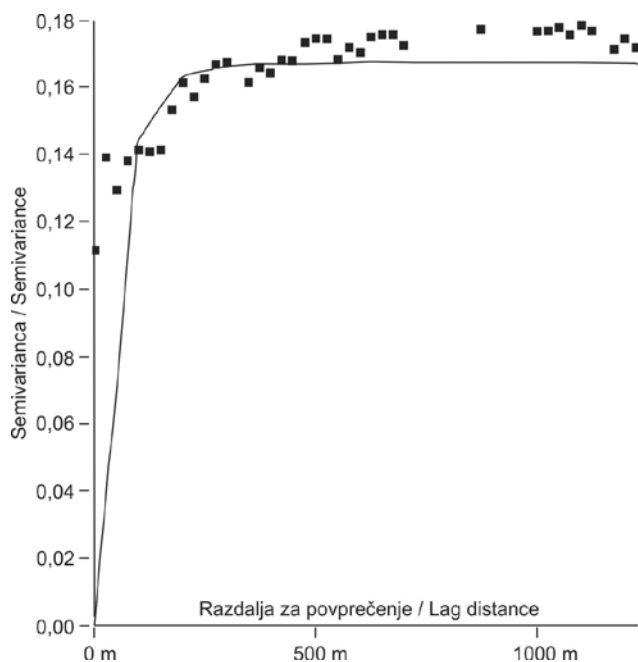
Tridimenzionalni hidrogeološki model je bil izdelan s pomočjo interpolacije litoloških podatkov – hidrofaciesov iz vrtin.

Zaradi ogromnega števila podatkov, se je v prvem koraku določila razdalja za povprečenje. Razdalja za povprečenje zajema vse vrednosti v določenem radiju, katerih povprečna vrednost predstavlja eno točko v semivariogramu. Določitev razdalje je za povprečenje pomembna, saj z njo dobimo povprečne semivariance za točke z enako medsebojno razdaljo. V programski opremi Jewel Suite 2011 se je tako za vsak hidrofacies pripravil najbolj ustrezen semivariogram z razdaljo za povprečenje (ang. lag distance) 25 m v horizontalni ter 2 m v vertikalni smeri (sl. 7). Ko so bili pripravljene vsi semivariogrami, je bila uporabljena hierarhična sekvenčna simulacija. S pomočjo sekvenčne indikatorske simulacije so se izdelali parcialni hidrogeološki modeli, ki so bili postopoma združeni v končni hidrogeološki model.

### Prepustnost

Eden izmed pogojev za nastanek visečega vodonosnika je pojav slabo prepustne plasti nad glavnim vodonosnikom. Za lažjo interpretacijo hidrogeološkega modela so bili zbrani dostopni podatki iz literature (PRESTOR et al., 2002; KRIVIC, 2009; HERIČ, 2010; Internet 1) o prepustnosti litoloških enot na celotnem Ljubljanskem polju. Za vsak hidrofacies je podanih več različnih vrednosti, saj vsak črpalni poskus odraža prepustnost litološke enote na eni izmed lokacij na Ljubljanskem polju. Za vsak hidrofacies se je izračunala povprečna vrednost, ki se je nato vključila v hidrogeološki tridimenzionalni model (tab. 2). Zaradi relativno velike količine podatkov in velikosti območja, so se plasti s podatki o prepustnosti debeline 1 m, povprečile na debelino 5 m (sl. 8).

Za izločitev potencialnih območij visečih vodonosnikov iz tridimenzionalnega hidrogeološkega modela sta bila postavljena naslednja pogoja:



Sl. 7. Izbira primerne semivariograma (primer za hidrofacies 2 v horizontalni smeri)

Fig. 7. Semivariogram fitting (example for hydrofacies 2 in lateral direction)

- plast mora imeti koeficient prepustnosti  $K \leq 1 \times 10^{-6}$  m/s in
- plast mora imeti minimalno površino 0,07 km<sup>2</sup>.

Koeficient prepustnosti plasti, ki predstavljajo viseče vodonosnike na Ljubljanskem polju ni enoten na celotnem območju, prav tako so to plasti različnih litoloških enot. Vendar pa je dejstvo, da so to drobnozrnati sedimenti s koeficientom prepustnosti  $K < 10^{-6}$  m/s. Najverjetneje so to sedimenti poplavnih ravnin ali opuščeni rečni rokavi reke Save, ki so nastali z nanašanjem drobnozrnatega materiala ob višjih vodostajih ali poplavih. V modelu so tako bile uporabljene litološke enote, ki so uvrščene v hidrofaciesa Melj in glina s prodom ter Melj in glina, ki imata koeficient prepustnosti  $K < 10^{-6}$  m/s.

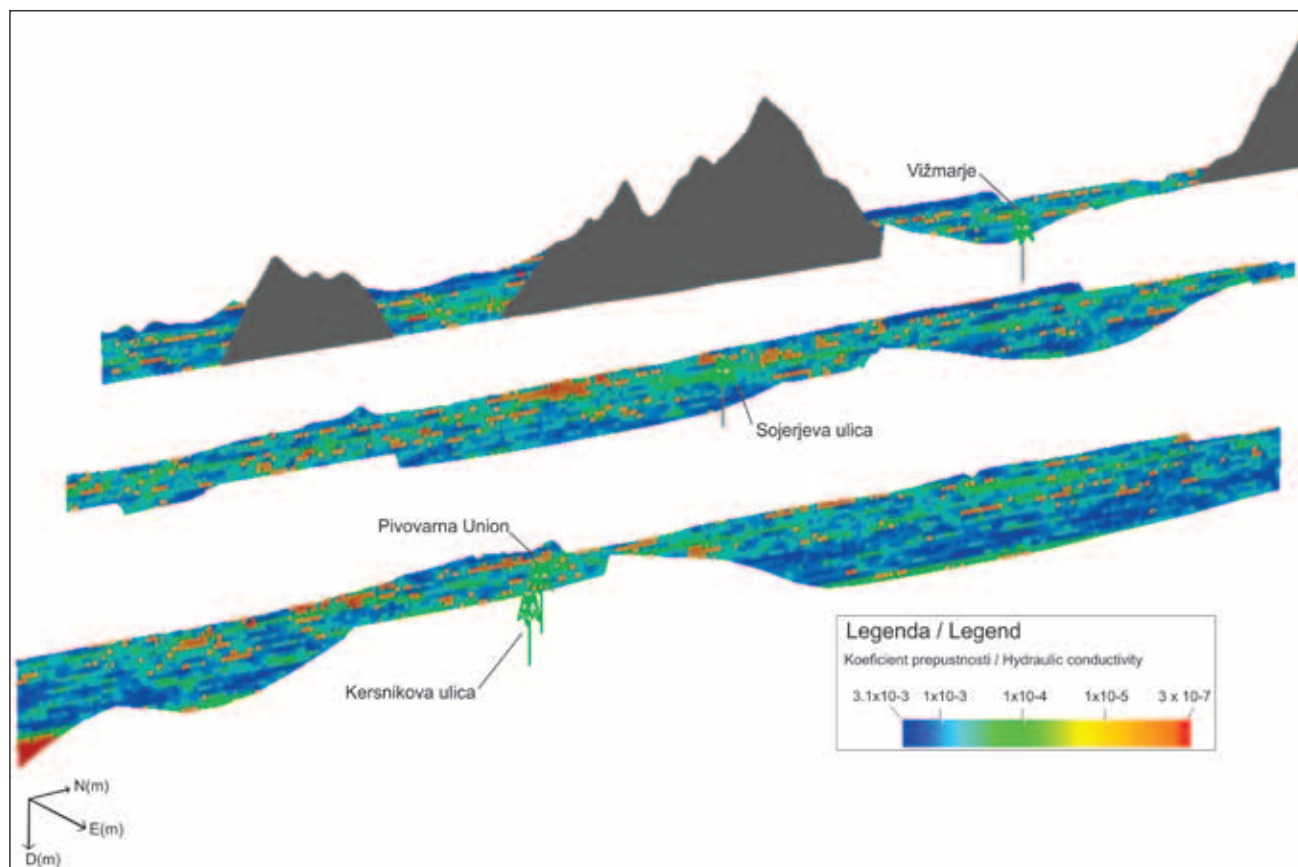
Podatkov o horizontalni velikosti visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju ni, zato je robni pogoj minimalne velikosti plasti za nastanek visečega vodonosnika (0,07 km<sup>2</sup>) določen kot ocena. Za oceno velikost se je privzela površina najmanjše plasti, na območjih, kjer so točkovno dokazani viseči vodonosniki.

Na podlagi robnih pogojev so bile iz modela izdvojene dovolj velike slabše prepustne plasti, ki predstavljajo podlago za nastanek visečih vodonosnikov. Iz dobljenih rezultatov (sl. 9) je moč

Tabela 2. Prepustnost hidrofaciesov

Table 2. Hydraulic conductivity of hydrofacies

HIDROFACIES / HYDROFACIES	K (m/s) – P – Prod / Gravel	K (m/s) – MGP – Melj in glina s prodom / Silt and clay with gravel	K (m/s) – MG – Melj in glina / Silt and clay	K (m/s) – Ko – Konglomerat / Conglomerate	K (m/s) – O – Ostalo / Other
$\bar{K}$ (m/s)	$3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-6}$	$3,25 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-6}$



Sl. 8. Prečni izseki iz modela prepustnosti (povečava v Z smeri je 5x)

Fig. 8. Vertical cross-section from Hydraulic conductivity model (Z exaggeration is 5x)

sklepati, da je največ slabše prepustnih plasti med Grajskim in Šišenskim hribom. Na tem območju se pojavijo slabše prepustne plasti v več horizontih, in sicer tik pod površjem (296 m.n.v.) do globine 32 m (264 m.n.v.). Druga največja koncentracija slabše prepustnih plasti je na severnem, severovzhodnem vznožju Šišenskega hriba, kjer se plasti pojavijo prav tako tik pod površjem (306 m.n.v.) ter do globine 25 m (281 m.n.v.). Na ostalem območju modela se slabše prepustne plasti pojavijo do globine 10 m, na jugovzhodnem delu modela je manjša koncentracija slabše prepustnih plasti na globini okoli 20 m.

Gladina podzemne vode glavnega vodonosnika na Ljubljanskem polju je med 274 m (Obrije) ter 282 m (Vižmarje). Za nastanek visečega vodonosnika se mora slabše prepustna plast pojaviti v nezasičenem delu vodonosnika, zato so iz tridimenzionalnega modela bile izdvojene samo plasti v nezasičenem delu vodonosnika (sl. 9).

### Razprava

Tridimenzionalni hidrogeološki model zahodnega dela Ljubljanskega polja je prvi predstavljeni model s poudarkom na opredelitvi prostorske lege slabo prepustnih plasti, ki predstavljajo podlago za potencialne viseče vodonosnike.

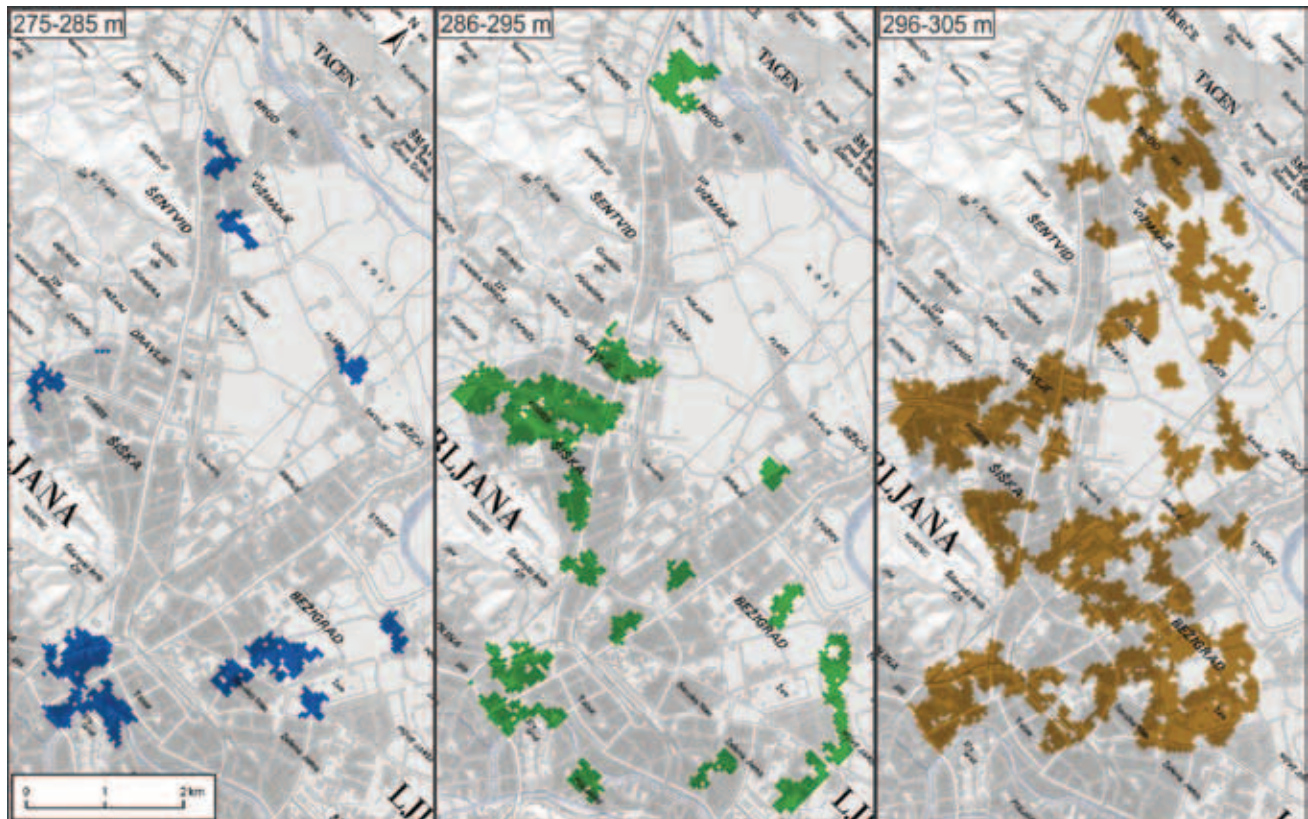
Točkovno dokazani viseči vodonosniki se po do sedaj znanih podatkih pojavljajo na severozahodnem delu mesta Ljubljane. Na severni strani

Šišenskega hriba se med sedimenti reke Save pojavijo plasti glin z delci preperlega gruščja in proda. V Kosezah je Rakovec opisal tri horizonte viseče podzemne vode (DROBNE & TOVORNIK, 1961). Viseči vodonosniki so dokazani z meritvami v vodnjakih na Sojerjevi ulici v Dravljah ter na Bravničarjevi ulici (SAVIĆ, 2009). Na območju Pivovarne Union sta VESELIČ in VIŽINTIN (2002) postavila konceptualni hidrogeološki model, kjer sta določila zgornji in spodnji vodonosnik; zgornji vodonosnik sta opredelila kot viseč vodonosnik. Viseči vodonosniki se pojavijo tudi v centru mesta Ljubljane na območju Ville Urbane, Komenskega ulice in Kongresnega trga (PRESTOR, 2000; PRESTOR et al., 2006; 2008a; 2008b) ter med Prežihovo in Beethovnovno ulico (DROBNE & TOVORNIK, 1961).

Izdelani prostorski model kaže dobro ujemanje s podatki v literaturi. Model podaja slabše prepustne plasti ( $K < 10^{-6}$  m/s) povsod tam, kjer so točkovno že dokazani viseči vodonosniki. Izjema je območje Bravničarjeve ulice, kljub temu pa model napove slabše prepustne plasti v neposredni bližini (ŠRAM, 2011).

Pomemben vir negotovost modela predstavljajo nekateri subjektivno določeni parametri. Tako je skupina sedimentov, ki so uvrščeni pod *Drugo* zelo heterogena in združuje različne litološke enote. Povprečna prepustnost skupine, ustreza prepustnosti podlage visečih vodonosnikov, kar je vplivalo na določitev potencialnih visečih vodonosnikov. Ker pa so v skupino vključene tudi enote, ki ne morejo tvoriti podlage visečih vodonosni-





Sl. 9. Raztezanje slabše prepustnih plasti v nezasičenem delu vodonosnika (debelina plasti je 5 m).

Fig. 9. Areas of layers with low hydraulic conductivity in unsaturated zone of the aquifer (layer thickness is 5 m).

kov (enote predkvartarne podlage ter enote, ki so blizu površja in so antropogenega izvora) obstaja verjetnost, predvsem na površini modela, da so bile nekatere plasti določene kot podlaga visečega vodonosnika, čeprav to dejansko niso.

Horizontalno raztezanje plasti je pogojeno s parametri določenimi v semivariogramu. Za horizontalno raztezanje je najpomembnejši parameter »doseg«, ki določa do katere meje so vrednosti regionalno odvisne in tako posledično določa velikost plasti; večja je regionalna odvisnost, večje in bolj zvezne bodo plasti na modeliranem območju in obratno, manjša kot je odvisnost, manjše so plasti. Zaradi ogromno prepletajočih se procesov na Ljubljanskem polju, je težko oceniti realno regionalno odvisnost litoloških podatkov iz vrtin. Iz dostopnih podatkov se je na semivariogramu določila najbolj ustrezna krivulja, ki opisuje regionalno odvisnost med litološkimi podatki iz vrtin. Vendar pa, obstaja verjetnost, da izbrana velikost visečih vodonosnikov v horizontalni smeri odstopa od realne vrednosti in da obstajajo tudi manjši oziroma samo večji in bolj zvezni viseči vodonosniki. Brez dodatnih terenskih raziskav obstoja teh vodonosnikov ni mogoče določiti.

### Sklep

Izdelava tridimenzionalnih geoloških modelov z uporabo geostatističnih metod je zahtevna naloga, saj dober model zahteva veliko podatkov, dobro poznavanje modeliranega območja ter kritičen pristop do rezultatov. Podatke pridoblje-

ne s pomočjo geostatistične interpolacije je potrebno obravnavati z veliko mero previdnosti, saj je potrebno upoštevati dejstvo, da nobena metoda ne more popolnoma rekonstruirati številnih zapletenih in prepletajočih se procesov, ki so se odvijali v geološki preteklosti.

Predstavljeni prostorski model je prvi poskus geostatistične določitve razporeditve potencialnih visečih vodonosnikov na zahodnem delu Ljubljanskega polja. V modelu so potencialna območja visečih vodonosnikov določena na podlagi obdelave podatkov iz vrtin s pomočjo dveh pogojev, prepustnostjo in površino slabše prepustnih sedimentov. Tako imajo plasti potencialnih visečih vodonosnikov prepustnost velikost  $K = 10^{-6}$  m/s ali manj, površino vsaj 0,07 km<sup>2</sup> ter minimalno debelino 5 m, ki je pogojena s parametri iz modela. Sedimenti nezasičenega dela vodonosnika, ki predstavljajo slabše prepustne plasti so melj, glina, melj ali glina s prodrom ter slabo sortiran pesek.

Študija je bila izdelana v raziskovalne namene, kjer je bil namen pridobiti generalno sliko razprostiranja slabše prepustnih plasti na Ljubljanskem polju. Tako rezultati študije nudijo koristne informacije za prihodnje raziskave vodonosnika Ljubljanskega polja in lahko služijo kot pomoč pri načrtovanju novih vrtin. Zanesljivost modela za načrtovanje novih vrtin pa je odvisna od gostote in globine vrtin na izbranem območju. Pomoč, ki jo lahko nudijo rezultati modela so orientacijskega značaja, predvsem zaradi velikosti modeliranega območja ter manjše vertikalne ločljivosti modela. Z novimi vrtinami na območjih potencialnih vi-



sečih vodonosnikov in spremljanjem gladin podzemne vode bo možno oceniti zanesljivost modela in ga nadgraditi.

Podatki iz modela imajo pomembno vlogo pri ugotavljanju smeri toka podzemne vode in razširjanju onesnaževal s površja. Zatorej se lahko uporabijo kot nadgradnja že obstoječih modelov toka podzemne vode ter nudijo osnovo za njihovo izboljšanje.

Izdelava geostatističnega modela ni prinesla samo novih rezultatov, temveč je odprla tudi nova vprašanja. Omejili smo območja, predvsem v centru Ljubljane, med Grajskim hribom in Rožnikom, kjer bo potrebno izdelati natančnejše modele. Na teh območjih se lahko s pridobljenim znanjem in podatki izvede več variant geostatističnega modeliranja. Z natančno analizo časovnih nizov višine gladine podzemne vode ter količine padavin in uporabo novih modelov bo mogoča natančnejša opredelitev raztezanja visečih vodonosnikov.

### Zahvala

Študija je bila delno sofinancirana iz projekta INCOME-LIFE07 ENV/SLO/000725 ter iz raziskovalnega programa Podzemne vode in geokemija (št. P1-0020), ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Hvala Dragomirju Skabernetu za pomoč pri interpretaciji rezultatov in Jožetu Rateju za natančen pregled članka ter konstruktivne predloge za izboljšanje članka.

### Literatura in viri

- ANDERSON, M.P. 1989: Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. *Geological Society of America Bulletin*, April, v. 101, p. 501-511
- BOHLING, G. 2005: Geostatistics in Three Easy Lessons.: <http://people.ku.edu/~cgbohling/cpe940/> (22.8.2011)
- BRAČIČ-ŽELEZNIK, B., PINTAR, M. & URBANC, J. 2005: Naravne razmere vodonosnika. Podtalnica Ljubljanskega polja: 17-26.
- CABELLO, P., CUEVAS, J. L. & RAMOS, E. 2007: 3D modelling of grain size distribution in quaternary deltaic deposits (Llobregat delta, NE Spain). *Geologica acta: and international earth science journal*, 5: 231-241.
- DAVIS, C. J. 2002: *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York: John Wiley & Sons, Inc: 257 p.
- DEUTSCH, C. V. 1999: Reservoir modeling with publicly available software. *Computer&Science*: 355-363.
- DROBNE, F. & TOVORNIK, S. 1961: Obvestilo o raziskavah geoloških pogojev za gradnje na območju mesta Ljubljana. *Geologija*, 7: 269-274.
- HERIČ, J. 2010: Idejna zasnova in hidrogeološke strokovne osnove raziskovalno piezometričnih vrtin Pincome-2/10, Pincome-3/10, Pincome-4/10 in Pincome-5/10, Ljubljansko polje. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 24 str.
- HISCOCK, K. M. 2005: *Hydrogeology: principles and practice*. Blackwell Science Ltd, Padstow: 405 p.
- JAMNIK, B., REFSGAARD, A., JANŽA, M. & KRISTENSEN, M. 2001: Water resources management model for Ljubljana City. Rasterski sloj: digitalni model predkvartarne podlage na Ljubljanskem polju. Geološki zavod Slovenije.
- JANŽA, M. 2009: Modeliranje heterogenosti vodonosnika Ljubljansko polje z uporabo Markovih verig in geostatistike. *Geologija*, 52/2: 233-240, doi:10.5474/geologija.2009.023.
- JOA OIL & GAS 2011: priročnik Jewel Suite 2011. Delft: 953 p.
- JUANG, K-W., CHEN, Y-S. & LEE, D-Y. 2004: Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils. *Environmental Pollution*, 127: 229-238.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JURKOVŠEK, B. 2007: Zgor-njekarbonska flora Grajskega hriba v Ljubljani. *Geologija*, 50/1: 9-18, doi:10.5474/geologija.2007.001.
- KRIVIC, J. 2009: Strokovna opredelitev največje dopustne globine gradnje objektov na območju »ROG«. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 14 str.
- MALVIĆ, T. 2008: Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka. Zagreb: INA – industrija nafte d.d., 97 str.
- MCKILLUP, S. & DYAR, D. M. 2010: *Geostatistics Explained: an Introductory Guide for Earth Scientists*. Cambridge: Cambridge University press: 414 p.
- MOP – GURS 2009: Digitalni model višine 12.5 \* 12.5 m. Ljubljana.
- PREMRU, U. 1983: Osnovna geološka karta SFRJ. Tolmač lista Ljubljana: L 33-66. Zvezni geološki zavod, Beograd: 111 p.
- PRESTOR, J. 2000: Hidrogeološko mnenje o stanju podzemnih voda za lokacijo CO 1/5 Komenskega v Ljubljani. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 3 str.
- PRESTOR, J., URBANC, J., JANŽA, M., RIKANOVIC, R., BIZJAK, M., MEDIĆ, M. & STROJAN, M. 2002: Preverba in dopolnitev strokovnih podlag za določitev varstvenih pasov vodnih virov centralnega sistema oskrbe s pitno vodo v MOL – Ljubljansko polje. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 101 str.
- PRESTOR, J., STROJAN, M., HÖTZL, M., MATOZ, T. & MEDIĆ, M. 2006: Določitev prepustnosti tal in hitrosti toka podzemne vode na območju gradbene jame Villa Urbana v Ljubljani. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 8 str.
- PRESTOR J., BIZJAK, M. & STROJAN, M. 2008a: Hidrogeološko poročilo o pogojih gradnje objekta na Kongresnem trgu v Ljubljani. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 8 str.
- PRESTOR, J., JANŽA, M. & BENČINA, D. 2008b: Analiza tveganja zaradi gradnje objekta na območju Kongresnega trga v Ljubljani. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 21 str.
- SAVIĆ, V. 2009: Analiza podatkov opazovanj in optimizacija merilne mreže glede na različne

- potrebe izkoriščanja vode: diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana: 115 str.
- ŠRAM, D. 2011: Hidrogeologija visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju: diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 83 str.
- VESELIČ, M. & VIŽINTIN, G. 2002: Raziskave za zaščito vodnega vira pivovarne Union, D.D. Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani: 57–67.
- ZAPPA, G., BERSEZIO, R., FELLETTI, F. & GIUDICI, M. 2006: Modeling heterogeneity of gravel-sand, braided stream, alluvial aquifers at the facies scale. *Journal of Hydrology*, 325: 134–153, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.10.016.
- ŽLEBNIK, L. 1971: Pleistocen Kranjskega, Sorškega in Ljubljanskega polja. *Geologija*, 17: 477–491.
- WEBSTER, R. 2007: *Geostatistics for Environmental Scientists*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.; 332 p.
- Internet 1: [http://www.pivo-union.si/si/files/default/Ponudba/tehnichni-podatki/zala\\_union\\_hidrogeoloska\\_karta\\_in legenda.pdf](http://www.pivo-union.si/si/files/default/Ponudba/tehnichni-podatki/zala_union_hidrogeoloska_karta_in legenda.pdf) (14.8.2011)

# Možnosti proizvodnje elektrike iz geotermalne energije v Sloveniji v naslednjem desetletju

## Possibilities for electricity production from geothermal energy in Slovenia in the next decade

Dušan RAJVER, Andrej LAPANJE & Nina RMAN

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija;  
e-mail: dusan.rajver@geo-zs.si; andrej.lapanje@geo-zs.si; nina.rman@geo-zs.si

Prejeto / Received 20. 4. 2012; Sprejeto / Accepted 4. 6. 2012

*Ključne besede:* geotermalni visokotemperaturni vir, geotermalna elektrarna, hidrotermalni vir, HDR, EGS, termična učinkovitost, naftna in plinska industrija, severovzhodna Slovenija, Panonski bazen.

*Key words:* high temperature resources, geothermal power plant, hydrothermal resources, HDR, EGS, thermal efficiency, oil and gas industry, Northeastern Slovenia, Pannonian basin

### Izvleček

Članek je namenjen ozaveščanju zainteresirane javnosti s ciljem, da lahko vsak presodi resničnost in pravilnost zapisov, ki se o možnostih izrabe geotermalne energije pojavljajo v medijih. Obravnava namreč celovit pregled geotermalnih sistemov, potencial hidrotermalnih in izboljšanih geotermalnih sistemov, nadalje mehanizme in značilnosti srednje- do visokotemperaturnih geotermalnih virov ter način njihove pretvorbe v elektriko. Predstavljeni so glavni elementi, ki vplivajo na uspešnost pretvorbe geotermalne v električno energijo. Podana sta pregled potrebnih raziskav za ugotovitev geotermičnega potenciala in ocena tehnoloških ter ekonomskih možnosti postavitve geotermalnih elektrarn v Sloveniji. Pri tem je opisano stanje poznavanja srednje- in visokotemperaturnih geotermalnih virov v Sloveniji z začetnimi pogoji za postavitev geotermalne elektrarne. Poleg tega podajamo teoretične izračune izkoristka pretvorbe geotermalne energije v električno s klasičnimi turbinami in navajamo pogoste težave pri izkoriščanju geotermalne energije, ki so povezane z dodatnimi stroški in znižujejo učinkovitost investicije. Opisane so lastnosti ter učinkovitost binarnih geotermalnih elektrarn in tuje izkušnje pri pridobivanju elektrike iz EGS (izboljšani geotermalni sistem, angl. Enhanced Geothermal System). Obravnavamo tudi prekrivanje delovanja naftne in plinske industrije z delovanjem EGS ter uporabnost naftnih in plinskih vrtin za proizvodnjo geotermalne elektrike.

### Abstract

This article is intended to raise awareness of the public, with the aim that anyone can judge reality and accuracy of records that appear in the media on the exploitation of geothermal energy. It provides a comprehensive overview of geothermal systems, potential of hydrothermal and enhanced geothermal systems, of mechanisms and characteristics of middle and high enthalpy geothermal resources. It also deals with a mode of their conversion into electricity. Featured are the main factors affecting the decision on effectiveness of conversion of geothermal energy into electricity. Given are the review of the research necessary to establish the geothermal potential and assessment of technological and economic possibilities of installing geothermal power plants in Slovenia. The paper also describes the state of knowledge of middle- and high temperature geothermal resources in Slovenia with initial conditions for constructing geothermal power plants. In addition, we present theoretical calculations of the conversion efficiency of geothermal energy into electricity with conventional turbines and present some problems for the exploitation of geothermal energy, which are associated with additional costs and further reduce the efficiency of investment. Described are the characteristics and performance of binary geothermal power plants and foreign experience in obtaining electricity from the EGS (Enhanced Geothermal System). We also address the overlapping of the oil and gas industry with the operation of the EGS and the possibility of exploiting oil and gas wells for producing the geothermal electricity.

### Uvod

Pri zasledovanju energetskega cilja o uporabi 25 % obnovljivih virov do leta 2020 je spodbujanje izrabe geotermalne energije v Sloveniji nekoliko zapostavljeno. V Akcijskem načrtu za obnovljivi-

ve vire energije (AN OVE) za obdobje 2010-2020 (internet 1) je ocenjeno, da bo prispevek geotermalne energije k proizvodnji elektrike v letu 2020 enak nameščeni zmogljivosti 0 MW in letni proizvodnji 0 GWh. Stroški naložb in podpor v to tehnologijo so ocenjeni na 0 EUR. Kljub temu je



v dokumentu AN OVE razdelan postopek priprave dokumentacije za izvedbo geotermalne elektrarne in določena cena zagotavljenega odkupa električne energije in višina obratovalne podpore za električno energijo iz proizvodnih naprav OVE – geotermalna energija. Osnutek predloga Nacionalnega energetskega programa Republike Slovenije pa za obdobje do leta 2030 predvideva postavitev geotermalnih elektrarn moči 25 MW (internet 2). Tako ideje o prvi slovenski geotermalni elektrarni, razvoju številnih sistemov daljinskega ogrevanja ter novih termalnih kopališč (p) ostajajo vse glasnejše (RMAN et al., 2009).

Ideja o pretvorbi geotermalne energije v električno je pri nas vzniknila na osnovi rezultatov raziskav nahajališč nafte in plina v severovzhodni Sloveniji (RAVNIK, 1989). Tu so v več vrtinah izmerili povišano temperaturo, tudi nad 100 °C.

Smiselnost postavitve geotermalne elektrarne je pogojena s številnimi omejitvami. Osnovna je dovolj velik geotermični gradient, ki zagotavlja visoko temperaturo geotermalnega sistema, zelo pomembni pa so tudi hidrogeološki parametri, npr. poroznost in prepustnost rezervoarja, njegova globina in obseg ter entalpija in kemična sestava fluida. Šele na podlagi poznavanja teh parametrov lahko načrtujemo tip, velikost in ekonomičnost nove geotermalne elektrarne.

V članku predstavljamo bistvene značilnosti srednje- in visokotemperaturnih geotermalnih virov, ki se v svetu uporabljajo za oskrbo z električno energijo. V njem razlikujemo med dvema pojmom:

- a) geotermalni: opisuje pojme, ki so povezani s termalno vodo oz. geotermalnimi fluidi (vir, izvir, vrtina, rezervoar, vodonosnik, cirkulacija, sistem)
- b) geotermični: opisuje pojme, ki se nanašajo na tehnične parametre in meritve (gradient, meritve, raziskave, procesi, karte, razmere)

Na podlagi najnovejših spoznanj o geotermalnih sistemih in njihovi izrabi po svetu ter geotermičnih in hidrogeoloških razmerah v Sloveniji navajamo razloge za in proti realizaciji geotermalne elektrarne v bližnji prihodnosti.

### Geotermalni sistemi in njihov potencial

Zemljina (geotermalna) toplota je tako kot Sončeva univerzalna: nahaja se povsod na Zemlji. Njena pretvorba v elektriko je zaradi nižjih temperatur glede na druge energijske vire tehnološko težavna, a možna. Za izrabo so primerne kamnine do globine 10 km pod površino (RAVNIK, 1989), ki sprejemajo toploto iz dveh virov. Prvi je toplota, ki se dviga iz spodnjega dela skorje in vrhnjega dela astenosfere ter je večinoma prvotna toplota planeta; drugi vir pa je toplota, ki se sprošča pri razpadu radioaktivnih elementov v skorji. Oba vira toplote sta geološko gledano počasna procesa, zato je akumulirana toplota v Zemljini skorji s stališča dolžine človekovega življenja neobnovljiva (RAVNIK, 1989). Prenos toplote proti površini je

pretežno konduktiven in je zaradi slabe toplotne prevodnosti kamnin počasen. Pri kondukciji se toplota prevaja skozi trdne snovi ali mirujoče fluide, zato je izkoriščanje takšne toplote možno le kot njeno rudarjenje. Lokalno se toplota prenaša tudi s konvekcijo, kjer se od izvora do ponora prenaša s tokom fluida. V tem primeru je kamnina razpokana in prelomljena, prenašalci toplote pa so lahko magma, voda in/ali plini. Če med njimi prevladuje voda, procese imenujemo hidrotermalne. V kondukcijskih sistemih temperatura narašča z globino do rezervoarja, v konvekcijskih pa temperatura z globino bistveno ne narašča, v posameznih globinskih odsekih pa celo pada. V splošnem se pogostnost vročih kamnin povečuje z globino. Bližje površini jih najdemo na območjih recentnega vulkanizma, povečanih koncentracij radioaktivnih elementov ali na območjih z visoko gostoto Zemljinega toplotnega toka.

**Geotermalni sistem** (AXELSSON & GUNNLAUGSSON, 2000; DICKSON & FANELLI, 2004; HOCHSTEIN, 1990) sestavljajo vir toplote, geotermalni rezervoar in geotermalni fluid. Sistem obsega celotno hidrogeološko povezano območje z napajanjem, rezervoarji in cono iztoka. Stalni vir toplote omogoča povišan geotermični gradient in temperaturo podzemne vode. **Geotermalni rezervoar (vodonosnik)** je volumen ogretil in dobro prepustnih kamnin, ki jih lahko izkoriščamo z odvzemom toplote ali fluida. **Geotermalni fluid** je običajno voda v tekoči ali parni fazi, ki vsebuje pline in raztopljene snovi, odvisno od njene temperature in tlaka, in je nosilec prenosa toplote v Zemljini skorji. Termično izolacijske zaporne plasti v krovni rezervoarja onemogočajo dotok hladne meteorne vode vanj in s tem hlajenje, odzeta termalna voda pa se mora nadomeščati z napajanjem (naravno ali z vračanjem oz. reinjeksijsko). Pri izrabi pogosto govorimo o **geotermalnem viru**, ki označuje lokacijo z geotermalnimi objekti, s katerimi se izkorišča geotermalni fluid.

Sisteme razvrščamo glede na vir toplote, temperaturo rezervoarja, agregatno stanje fluida in način izrabe. Razvrščanje glede na **vir toplote in geološko zgradbo** določa naslednje:

- *Vulkanski sistemi*: izvor toplote je magma oz. magmatska intruzija. Pogosti so na stiku tektonskih plošč. Tok fluida omogočajo prepustne razpoke in prelomne cone.
- *Konvekcijski sistemi*: so pogosti na območju tektonsko aktivnih območij s povečano gostoto toplotnega toka. Voda kroži po globokih prelomnih conah.
- *Sedimentacijski sistemi*: v regionalnih sedimentnih bazenih z dobro prepustnimi plastmi pod 1 km globine se fluidi ogrevajo pretežno s kondukcijo.
- *Geotlačni sistemi*: tlak fluida je nad hidrostatskim in se približuje litostatskemu. Običajno so zelo globoki in izolirani.
- *EGS* (angl. Enhanced Geothermal System) – izboljšani (spodbujeni) geotermalni sistem: ogrete kamnine imajo primerno temperaturo, a so zelo slabo prepustne. Rezervoar ustvarimo umetno s povečanjem prepustnosti kamnin.

Tabela 1. Razvrstitev geotermalnih virov po temperaturi fluida oz. entalpiji (DICKSON &amp; FANELLI, 1990, 2004)

Table 1. Classification of geothermal resources based on fluid temperature or enthalpy (DICKSON &amp; FANELLI, 1990, 2004)

Geotermalni vir / Geothermal resource	MUFFLER & CATALDI (1978)	HOCHSTEIN (1990)	BENDERITTER & CORMY (1990)	HAENEL et al. (1988)	AXELSSON & GUNNLAUGSSON (2000)
Nizkoentalpijski / Low enthalpy	< 90 °C	< 125 °C	< 100 °C	≤ 150 °C	< cca. 190 °C
Srednjeentalpijski / Intermediate enthalpy	90–150 °C	125–225 °C	100–200 °C		
Visokoentalpijski / High enthalpy	> 150 °C	> 225 °C	> 200 °C	> 150 °C	> cca. 190 °C

**Temperatura fluida v rezervoarju** določa način izrabe geotermalne energije. Najpogostejši kriterij za razvrščanje geotermalnih virov temelji na entalpiji fluidov (tabela 1). Entalpija (v Joulih) je termodinamska spremenljivka, ki je vsota notranje energije in opravljenega dela (ki je zmnožek tlaka in prostornine sistema). Njena sprememba pri stalnem tlaku je enaka dovedeni toploti. S **specifično entalpijo** ocenjujemo stopnjo koncentracije energije neke snovi in je podana na enoto mase. Visokoentalpijske vire uporabljamo za proizvodnjo električne energije, medtem ko pri ostalih prevladujeta neposredna in kombinirana raba toplote.

Glede na **fazno stanje pornega fluida** v rezervoarju razlikujemo med naslednjimi sistemi:

- *Tekočinski* (angl. liquid dominated): pore so zapolnjene s tekočo vodo. Temperatura je pod ali na točki vrelišča (angl. boiling point per depth) pri danem tlaku.
- *Dvofazni* (angl. two-phase): prevladuje zmes vode in vodne pare (t.i. mokra para) pri čemer temperatura in tlak sledita krivulji vrelišča.
- *Parni* (angl. vapour dominated): prevladuje pregreta (t.i. suha) para. Temperatura je na ali nad točko vrelišča pri danem tlaku.

Za proizvodnjo električne energije so najbolj obetavni visokotemperaturni geotermalni sistemi, ki so lahko (delno po CLAUSERJU, 2006):

- *Hidrotermalni*: vroča voda ali para v zmernih globinah (1 do 4 km) s temperaturami do 350 °C v prepustnih kamninah z aktivnimi prostimi ali vsiljenimi konvekcijskimi sistemi.
- *Izboljšani geotermalni sistem (EGS)*
- *Magma*: izkoriščanje toplote magme (staljenih kamnin pri temperaturah 700 do 1200 °C v dosegljivih globinah) je na začetni stopnji, saj se na Islandiji izvajajo prvi eksperimentalni poizkusi.
- *Geotlačni* (angl. geopressed): vroče visokotlačne rezervoarske slanice, ki vsebujejo raztopljen naravni plin (metan). Njihova energijska vsebnost je v najboljšem primeru 58 % toplotna, 32 % kemijska energija ogljikovodikov in 10 % hidravlična.

Naš članek se v večji meri posveča obravnavi EGS kot pa obravnavi hidrotermalnih sistemov, ker je razvoj EGS danes v močnem razmahu s ciljem potrjevanja potencialnosti in ker do ustreznih

globin za doseganje potrebnih temperatur v Sloveniji ni pričakovati prav izdatnih hidrotermalnih rezervoarjev (v smislu proizvodnje elektrike).

### **Geotermične lastnosti vrhnjega dela Zemljine skorje**

Skupna toplotna energija v Zemlji, preračunana nad privzeto povprečno temperaturo površja 15 °C, je reda velikosti  $12,6 \cdot 10^{12}$  EJ (1 EJ =  $10^{18}$  J), samo tista v Zemljini skorji do globin 50 km pa znaša  $5,4 \cdot 10^9$  EJ (DICKSON & FANELLI, 2004). Electric Power Research Institute (EPRI, ZDA) je leta 1978 ocenil, da je v kamninah na celinah do globine 3 km shranjeno  $42,67 \cdot 10^6$  EJ toplote (STEFANSSON, 2005), od tega  $34,14 \cdot 10^6$  EJ (80 %) iz vročih suhih kamnin (ali EGS virov) in  $8,53 \cdot 10^6$  EJ (20 %) iz hidrotermalnih virov (GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2011). Glede na globalno izgubo Zemljine toplote s kondukcijo (angl. global rate of heat loss), ki znaša 44,2 TW (POLLACK et al., 1993; GOSNOLD, 2008), je energijski tok skozi celine ocenjen na 10 TW, ostalo pa skozi oceane, vendar brez 3 TW izgubljene toplote skozi vulkanske izbruhe po celotni površini planeta (STEFANSSON, 2005). Iz tega lahko izračunamo, da je potrebno 136.300 let, da kamnine na celinah do omenjene globine prejmejo ocenjeno količino toplote (STEFANSSON, 2005). Radiogena proizvodnja toplote prispeva okrog 62% (ali 27,5 TW) h globalni izgubi toplote Zemlje skozi kondukcijo. Ostalo večinoma prispevajo: prvotna toplota takoj po nastanku planeta, sproščena potencialna energija med ustvarjanjem nove skorje ali pa obogatitev težkih kovin v plašču Zemlje, ločevanje jedra od plašča, toplota trenja od tektonskih dogodkov oz. potresov in drugi procesi (CLAUSER, 2006).

Za primerjavo povejmo, da je bila celotna svetovna poraba primarne energije v letu 2001 ocenjena na 420 EJ. Za 21. stoletje pa se vrednosti po različnih scenarijih gibljejo med 600 in 1800 EJ/leto (CLAUSER, 2006) in če za sedanjo porabo vzamemo blizu 500 EJ/leto, lahko ves teoretični potencial na celinah do 3 km globine zadosti potrebam sveta za okrog 100.000 let. Kot primerjavo navedimo, da vpadna energija sončnega obsevanja, ki je največji zunanji vir energije, samo v enem dnevu prispeva  $1,5 \cdot 10^{22}$  J ( $\approx 1,75 \cdot 10^{17}$  W moči obsevanja). To približno ustreza 35-kratni svetovni proizvodnji primarne energije v letu 2001, oziroma približno 16-kratni, če upoštevamo, da le 45 % vpadnega sončnega obsevanja (ali  $7,87 \cdot 10^{16}$  W) doseže površino Zemlje (CLAUSER, 2006).

### Hidrotermalni sistemi

Hidrotermalni sistemi v geotermalnih rezervoarjih vsebujejo geotermalni fluid (običajno meteorno vodo), ki zaradi konvekcije kroži po prepustnih conah. Vezani so na stike med globalnimi litosferskimi ploščami, ki stimulirajo intenzivni konvekcijski prenos toplote iz globokih delov skorje in vrhnjega dela Zemljinega plašča proti površini, ali na velike sedimentacijske bazene. Za hidrotermalne sisteme je značilna visoka naravna prepustnost, zato jih lahko razvijemo v proizvodno fazo brez stimulacije. Globine izkoriščanih hidrotermalnih rezervoarjev v svetu večinoma ne presegajo 3 km (PETTY & LIVESAY, 2008).

Hidrotermalni viri na svetu so relativno majhni. ROWLEY (1982, v: GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2011) je ocenil shranjeno toploto na celinah za 10 km debelo skorjo in nad 20 °C na  $403 \cdot 10^6$  EJ brez razlikovanja med vročimi suhimi kamninami in hidrotermalnimi viri, medtem ko so TESTER et al. (2005, v: GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2011) ocenili energijo iz vročih suh kamnin na  $110,4 \cdot 10^6$  EJ in le  $0,14 \cdot 10^6$  EJ iz hidrotermalnih virov. Geotermalne elektrarne lahko zaradi omejitev v tehnologiji vrtnanja in majhne prepustnosti kamnin izrabljajo le delček shranjene toplotne energije. Komercialna uporaba geotermalne energije se je osredotočila na območja konvekcijskih hidrotermalnih rezervoarjev v globinah do 4 km, kjer temperatura fluidov doseže od 180 do več kot 350 °C (GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2011). Zaradi različnih izračunov več avtorjev prikazujemo tabelo 2.

STEFANSSON (2005) je izračunal svetovni geotermalni tehnični potencial za identificirane hidrotermalne vire, ustrezne za proizvodnjo elektrike, na 209 GW<sub>e</sub>, kar je enakovredno 5,9 EJ/leto z razpoložljivostjo energije (angl. capacity factor, CF) 90 %, s spodnjo vrednostjo 50 GW<sub>e</sub> (1,4 EJ/leto). Predpostavil je, da so skriti neidentificirani viri 5- do 10-krat večji od identificiranih in tako ocenil zgornjo mejo za skupni svetovni geotermalni tehnični potencial na 1 do 2 TW<sub>e</sub> (28,4 do 56,8 EJ/leto pri 90 % CF). GOLDSTEIN et al. (2009) ocenjujejo z verjetnostjo 70 %, da imajo EGS sistemi potencial 1 TW<sub>e</sub>. Vire za direktno rabo je STEFANSSON (2005) ocenil na 4,4 TW<sub>t</sub>, s spodnjo vrednostjo 1 TW<sub>t</sub> in zgornjo vrednostjo od 22 do 44 TW<sub>t</sub>.

Čeprav o EGS govorimo v naslednjem poglavju, naj omenimo, da ni bil objavljen še noben podoben izračun svetovnega tehničnega potenciala za tovrstne konduktivne geotermalne vire. Njihova ocena je zapletena zaradi pomanjkanja praktičnih izkušenj pri izrabi konduktivnih sistemov. Svetovni tehnični potencial geotermalnih virov za proizvodnjo elektrike je ovrednoten kot vsota iz ocen po STEFANSSONU (2005) za identificirane in skrite hidrotermalne vire ter iz tehničnih EGS potencialov iz tabele 2 (četrti stolpec) na skupno 117,5 EJ/leto (do 3 km globine) kot spodnja vrednost in na 1108,6 EJ/leto (do 10 km globine) kot najvišja vrednost (glej še tabelo 4.3 v GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2011). Tehnični potencial do globine 3 km, izkoristljiv v enem letu, znaša pičle 0,0003 % od ocenjene shranjene toplote  $42,67 \cdot 10^6$  EJ do te globine (EPRI, 1978). Lahko dodamo, da  $10^6$  EJ shranjene toplote ustreza približno 2,61 EJ/leto tehničnega potenciala za proizvodnjo elektrike pri 90 % CF za dobo 30 let (GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2011). Izločena (oz. pridobljena) toplota za doseganje teh potencialov se lahko popolnoma ali delno napolni na dolgi rok s celinskim zemeljskim toplotnim tokom 10 TW (=315 EJ/leto, STEFANSSON, 2005) pri poprečni gostoti toplotnega toka 65 mW/m<sup>2</sup>. Količina toplote, ki je potrebna za doseg tehničnega (električnega) potenciala (okrog 1200 GW<sub>e</sub>) z upoštevanjem učinkovitosti pretvorbe za vsak razpon temperature in temperaturno porazdelitev geotermalnega vira, znaša 657 EJ/leto. BERTANI (2012) navaja približen učinkovit izkoristek (termično učinkovitost) v pretvorbi toplote v elektriko za različne temperaturne razpone: 10 % za 120-180 °C, 20 % za 180-300 °C in 5 % za EGS. Pri tem je vzeto tehtano poprečje izkoristka pretvorbe okrog 17 J toplote za 1 J elektrike.

Za leto 2050 se napoveduje povečanje ekonomskega hidrotermalnega potenciala, ki je izračunan iz identificiranih in skritih geotermalnih virov do globin 3-4 km, na okrog 70 GW<sub>e</sub>. GOLDSTEIN et al. (2009) pa predvidevajo v letu 2050 s 85 % verjetnostjo ekonomski potencial EGS vsaj 70 GW<sub>e</sub>. Skupaj je torej ocenjen ekonomski potencial v letu 2050 na 140 GW<sub>e</sub>, kar ustreza 66 EJ/leto s tehtanim poprečjem izkoristka pretvorbe, tj. okrog 17 J toplote za 1 J elektrike (BERTANI, 2012).

Tabela 2. Svetovna shranjena (uskладиščena) toplota na celinah in tehnični potenciali iz EGS za proizvodnjo elektrike (GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2011)

Table 2. Global continental stored heat and EGS technical potentials for electricity (GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2011)

Globinski razpon / Depth range (km)	Tehnično dosegljiva shranjena toplota iz EGS / Technically accessible stored heat from EGS (10 <sup>6</sup> EJ)		Ocenjeni tehnični (električni) potencial za EGS (EJ/leto) / Estimated technical potential (electric) for EGS (EJ/yr)
0 - 10	403	ROWLEY, 1982	1051,8
0 - 10	110,4	TESTER et al., 2005	288,1
0 - 5	139,5	interpolacija med vrednostmi po ROWLEYU (1982) in EPRI (1978) / Interpolation between values from ROWLEY (1982) and EPRI (1978)	364,1
0 - 5	55,9	interpolacija med vrednostmi po TESTERJU et al. (2005) in EPRI (1978) / Interpolation between values from TESTER et al. (2005) and EPRI (1978)	145,9
0 - 3	34,1	EPRI, 1978	89,1



Trenutno razvite geotermalne elektrarne, z izjemo tiste v **Soultz-sous-Forêts**-ju, izkoriščajo hidrotermalne sisteme (BERTANI, 2010). Geotermalni sistem v Renskem tektonskem jarku z elektrarno **Landau** v Nemčiji (3 MW<sub>e</sub> moči) nekateri uvrščajo med EGS, čeprav leži na območju vodonosnikov z vročo vodo v omenjenem tektonskem jarku (SCHELLSCHMIDT et al., 2010).

### EGS – izboljšani geotermalni sistemi

Geotermalne visokotemperaturne sisteme z rezervoarjem z umetno ustvarjeno prepustnostjo označujemo s kratico *EGS* (GÉRARD et al., 2006; GENTER et al., 2008; GOSAR & RAVNIK, 2007). Oznaka združuje različne sisteme: vroče suhe kamnine (HDR, angl. Hot Dry Rock), vroče vlažne kamnine (HWR, angl. Hot Wet Rock) in vroče razpokane kamnine (HFR, angl. Hot Fractured Rock), ki lahko vsebujejo nekaj primarnega fluida.

Medtem ko danes izkoriščani hidrotermalni sistemi večinoma ne segajo globlje od 3 km, se konduktivna toplotna energija nahaja tudi globlje. Za njeno izkoriščanje je potrebno povečanje prepustnosti, ki se izvede s t.i. **stimulacijo rezervoarja**, tehničnim (inženirskim) postopkom povečanja prepustnosti okoli vrtine. Ta omogoča izboljšanje hidravlične povezave med vrtino in mrežo razpok rezervoarja ter tako tudi izdatnosti rezervoarja in s tem večjo količino delovnega fluida v njem. Za stimulacijo rezervoarja se pogosto uporablja **vtiskanje kisline** v kamninsko osnovo, s katero kisline reagirajo in tako odstranijo mineralne faze, ki ovirajo tok fluida (PORTIER et al., 2009). Kadar to ne zadošča, predvsem za razvoj EGS, je najpomembnejša metoda stimulacije **hidrofrakturiranje** (angl. fracking). Pri tem postopku se v potencialni rezervoar pod velikim pritiskom vtiska vodo, ki drobi kamnino in odpira razpoke. Širjenje razpok v višino in dolžino se nadzoruje s pretokom fluida, trajanjem postopka in uporabo fluidov z različno viskoznostjo. Usmeritev vrtine s približno vodoravnimi odseki v rezervoarju in posebno orientacijo glede na napetostno polje odpira možnost večkratne obdelave nastalih razpok. Velikost ustvarjenega rezervoarja se meri z **mikroseizmičnimi** metodami. Največja težava hidrofrakturiranja je ohranitev odprtih razpok. Raztezne razpoke z manjšim strižnim premikom ohranijo odprte tako, da jih zapolnijo s propani (ZIMMERMANN et al., 2011). Propanti so sortirana zrna z značilno sferičnostjo, ki so med hidrofrakturacijo rezervoarja pomešana z injiciranim fluidom. Po končani stimulaciji zapolnijo nastale razpoke, jih ohranijo odprte in s tem zagotovijo ustrezno prepustnost rezervoarja. Zrna so lahko iz kremenčevega peska, peskov premazanih s smolo ali keramičnih materialov (internet 3).

Uspeh razvoja EGS je v veliki meri pogojen z velikostjo ustvarjenega rezervoarja, natančneje površino razpokanih kamnin, ki jih dosežejo krožeči fluidi. Večstopenjska hidrofrakturacija in usmerjeno vrtnje omogočata načrtovano širjenje rezervoarja, ki mora v času izkoriščanja obdržati produktivnost. To lahko spodleti, če se znižata ali poroznosta (zaradi obarjanja mineralov v po-

rah ali s fizikalnim propadom pornega prostora/stiskanjem por) ali prepustnost (ko fizikalni in/ali kemični učinki znižajo medsebojno povezanost por in zmanjšajo razpoke).

Izkoriščanje EGS je relativno nova metoda izrabe geotermalne energije. "**EGS enota**" obsega injicirne in proizvodne vrtine, ki dovajajo fluid iz rezervoarja s pomočjo vrtin, razporejenih v obliki dveh (dublet), treh (triplet), ali petih (5-točkovna enota) vrtin, itd. (SANYAL, 2009). Skozi prve vtiškamo delovni fluid, običajno vodo. Fluid se med tokom skozi rezervoar proti proizvodnim vrtinam ogreje in skozi slednje izčrpa na površje. Za obstoječe EGS so značilne nižje temperature in/ali pretok geotermalnega fluida, zato se geotermalna energija pogosto izrablja preko toplotnih izmenjevalcev in sistemov turbinskih generatorjev, kot jih omogočata binarni tehnologiji ORC in Kalina.

Kljub maloštevilnim praktičnim izkušnjam so EGS edina oblika geotermalnih akumulacij do globine 10 km, ki lahko pomembno prispevajo h globalni energetski bilanci. Na splošno mora EGS zadostiti določenim parametrom, da je tehnično izvedljiv in ekonomsko upravičen. Ključne lastnosti so povzete v tabeli 3:

Tabela 3. Zahtevane lastnosti za EGS rezervoar (po GARNISHU, 2002, v: RYBACH, 2010; UNGEMACH & ANTICS, 2010)

Table 3. Required properties for an EGS reservoir (after GARNISH, 2002, in: RYBACH, 2010; UNGEMACH & ANTICS, 2010)

Življenjska doba sistema / Life of the system	~ 20 let / years
Proizvodni pretok fluida / Fluid production rate	50 - 100 kg/s
Temperatura fluida na ustju vrtine / Fluid temperature at wellhead	150 - 200 °C
Razmik med vrtinami / Separation between wells	~ 600 m
Skupna efektivna površina izmenjave toplote / Total effective heat exchange surface	> 2·10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
Prostornina kamnin / Rock volume	> 2·10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>
Tokovni upor / Flow impedance	< 0,1 MPa/(kg/s)
Izguba vode / Water loss	< 10%

V HDR projektih, ki so se eksperimentalno pričeli v kraju **Fenton Hill** v pogorju Jemez zahodno od **Los Alamosa** (Nova Mehika, ZDA), sta umetna tako fluid kot sam rezervoar. Njihova tehnična zmožnost je bila dokazana s terenskimi poskusi, ki jih je vodil Los Alamos Scientific Laboratory (LASL) od leta 1970 dalje (TESTER et al., 1979). Ta projekt je bil predhodnik projektov, kjer se EGS intenzivno preučujejo: v Avstraliji (**Cooper basin in Hunter Valley**), Franciji (**Soultz-sous-Forêts**), Nemčiji (**Bad Urach**), na Japonskem (**Hijiori, Ogachi, Yunomori**), na Švedskem (**Fjaelbacka**), v Veliki Britaniji (**Rosemanowes Quarry** v Cornwallu) in v Švici (**Basel**). Nekateri izmed njih so razviti na naftnih poljih (npr. **Soultz-sous-Forêts** in **Cooper basin**). Po obdobju relativnega zapostavljanja so ti projekti pridobili nov zagon, predvsem po ugotovitvah, da so kamnine tudi v večji globini do določene mere naravno razpo-

kane, in da bodo privzete metodologije in tehnologije odvisne od lokalnih geoloških pogojev (DICKSON & FANELLI, 2004). Najnaprednejše raziskave so se odvijale na Japonskem in v Franciji. EGS so se začeli šele nedavno uporabljati prav v **Soultz-sous-Forêts**-ju v Franciji. Tamkajšnji EGS je uspešen, ker je razvit v tektonskem jarku z bolj razpokanimi granitnimi kamninami, kar je pripomoglo, da so s hidrofrakturiranjem ustvarili skupno 3 km<sup>3</sup> razpokanih kamnin v plitvejšem delu in 2,5 km<sup>3</sup> v globljem delu (TESTER et al., 2006). Na lokaciji **Fenton Hill** v ZDA je stimuliran volumen rezervoarja precej manjši, okrog 1 km<sup>3</sup>.

Evropski HDR projekt **Soultz-sous-Forêts** je bil leta 2001 preimenovan v EGS projekt, saj so ugotovili, da razpokane granitne kamnine v podlagi sedimentov Zgornjerenskega jarka vsebujejo veliko vročega slanega fluida (GÉRARD et al., 2006). Projekt se je odvijal večfazno, vključno z vrtnjem štirih globokih vrtin. Najgloblja vrtina GPK2 sega do 5010 m navpične globine in dolžine 5100 m. Še leta 2004 so predvidevali, da je možno z vzpostavitev cirkulacije med vrtinami do skupno 100 l/s postaviti pilotno elektrarno z do 6 MW<sub>e</sub> moči. Delujoča pilotna elektrarna naj bi povečala zaupanje v ekonomsko upravičenost EGS projektov in s tem pripravila pogoje za izvedbo nadaljnjih vrtin in postavitvev industrijske elektrarne s potencialno kapaciteto od 20 do 25 MW<sub>e</sub> (GÉRARD & BAUMGÄRTNER, 2004). Leta 2005 so izvedli 5-mesečni hidravlični test (GÉRARD et al., 2006), na podlagi katerega so v začetku leta 2008 postavili pilotno ORC binarno elektrarno moči 1,5 MW<sub>e</sub> (BERTANI, 2008). Decembra 2008 je znašala termična proizvodnja 12 MW<sub>t</sub> iz pretoka okrog 28 l/s, sedaj pa znaša instalirana moč elektrarne 2,2 MW<sub>e</sub> (BOISSIER et al., 2010; BERTANI et al., 2011). Ker pričakujejo stabiliziranje proizvodnje v bližnji prihodnosti, bo zgrajena še ena dodatna ORC enota moči 1,5 MW<sub>e</sub> (GENTER et al., 2008).

Na vplivnem območju hidrofrakturiranja se lahko sprožijo (**mikro**)seizmični pojavi, opazni kot potresni sunki (MAJER et al., 2007), ki lahko povzročajo nezaupanje v javnosti. Zaradi pojava *mikroseizmičnosti* se je projekt v **Soultz-sous-Forêts**-ju zavlekel, saj so z injiciranjem fluida sprožili več kot 400 seizmičnih dogodkov. Najmočnejši je nastal dva dni po zaprtju injicirne vrtine in je dosegel lokalno magnitudo  $M_L = 2,9$ , a ni povzročil škode.

Podoben EGS projekt v švicarskem **Baslu** je bil decembra 2006 po sproženih seizmičnih dogodkih z magnitudo  $M_L \leq 3,4$  zaustavljen. Seizmični dogodki so nastali 2. dec. 2006 zaradi hidrofrakturiranja v 5 km globoki vrtini Basel-1 (MAJER et al., 2007; HÄRING et al., 2008). V naslednjih 56 dneh so zabeležili še tri dogodke z  $M_L > 3$ . Zaradi nastale škode je bila plačana kompenzacija v višini 9 milijonov USD, čeprav večina zahtevkov ni bila niti preiskana niti dokazana. Projektni vodja M. Häring je bil celo tožen s strani mestnih oblasti in decembra 2009 oproščen vseh obtožb (HOPKIRK, 2009). Projekt ni opušen, saj poteka neodvisna analiza tveganja in ugotavljanja sprejemljivih poti za izboljšanje rezervoarja.

Potencialne lokacije za razvoj EGS je potrebno podrobno oceniti z različnih geoznanstvenih vidikov, še posebno glede mikroseizmičnega tveganja, izredno pomemben pa je tudi odkrit in pravočasen stik z lokalnim prebivalstvom. Ta projekt je sprožil dilemo, ali je smiselno gosto mrežo hidravlično povezanih razpok ustvariti le z enim intenzivnim hidrofrakturiranjem (HÄRING et al., 2008). Da bi ublažili seizmično tveganje, je nastal alternativni koncept stimulacije po principu »dregniti in pustiti, da poraste«. Znatno porast prostornine rezervoarja po hidrofrakturiranju je dal idejo, da bi z večkrat ponovljenim kratkotrajnim (in manj intenzivnim) injiciranjem fluida v kamnino sprožili strižne procese in pustili, da se rezervoar »odduši« (prične prazniti s črpanjem ali z arteškim izlivanjem). Strategija je časovno potratna, a lahko bi močno znižala sprožene seizmične dogodke v nastajajočih EGS.

Podatki iz 41 evropskih primerov kažejo, da je injiciranje fluida v sedimentne kamnine manj seizmogeno kot v kristalinskih kamninah (EVANS et al., 2012). Pri obeh se od prisotnih prelomov, ki omogočajo prodiranje fluida pod tlakom v znatnih razdaljah ter so v bližini vrtin, pričakuje povišano tveganje ustvarjanja zaznavnih dogodkov. Študija nakazuje, da bi nizka naravna seizmičnost lahko bila uporaben kazalec nizke nagnjenosti k seizmičnosti pri injiciranju fluida.

Dubletni sistem pri **Gross Schönebecku** v Nemčiji je pripravljen za delovanje in postavitve binarne geotermalne elektrarne. Z izbiro ustreznega postopka stimulacije in modela usmeritve vrtine so razvili geotermalni rezervoar v spodnjepermskih klastičnih in vulkanskih kamninah (ZIMMERMANN et al., 2011). Metode stimulacije so prilagodili lokalnim kamninam, stratigrafski sekvenci in geološki strukturi.

Nekateri projekti so še v testni fazi (**Fenton Hill** v ZDA), novejši pa so razviti skoraj do proizvodne faze (**Coso** in **Desert Peak** v ZDA, **Cooper basin** v Avstraliji). Spet druge sočasno zaustavili, npr. **Rosemanowes** (Velika Britanija), kjer so ugotovili prenizke temperature in premajhno prostornino razpokanih kamnin (TESTER et al., 2006). Tam so s 3-letnim hidravličnim testom (avg. 1985 – dec. 1988) in naknadnim termo-hidro-mehanskim modeliranjem potrdili fenomen »kratkega stika« (KAYAD MOUSSA, 2011), katerega glavna posledica je, da se hidravlično aktivni del rezervoarja zmanjša. Pri študiju šestih glavnih proizvodnih prelomov so ugotovili prednostne tokovne poti, v katerih kroži več kot polovica injiciranega fluida, kar je lahko vzrok za hitro ohlajanje proizvodne vrtine RH15. Obstoje prednostnih tokovnih poti lahko zmanjša dejanski obseg rezervoarja in ekonomičnost projekta.

#### Karakterizacija toka fluida v geotermalnem rezervoarju

Karakterizacija toka fluida po razpokah je zelo zahtevna, saj je dostop do rezervoarja omejen na vrtine, ločljivost geofizikalnih metod pa pada z globino. Pomembna je zaradi prepoznavanja

nja prednostnih poti injiciranega fluida in ocene izgub ter ustreznega načrtovanja razvoja geotermalnega sistema (postavitve vrtin, količina odvzema fluida, itd.). Geometrijo kroženja fluida po razpokanem granitu v **Soultz-sous-Forêts**-ju so raziskovali PLACE et al. (2011). Seizmični podatki iz vrtin s tehniko VSP (angl. vertical seismic profiling) so omogočili 3D kartiranje prepustnih struktur v 100-metrskem merilu in pojasnili glavne hidravlične povezave med vrtinami. Model struktur je identificiral sledi varistične (zg. devonij – sp. trias) tektogeneze in njeno reaktivacijo zaradi alpskega potiska. Študija nazorno kaže pomen pravilne geološke interpretacije v kombinaciji z geofizikalnimi rezultati.

V dosedanjih poskusih razvoja EGS v ZDA, na Japonskem, v Evropi in Avstraliji so kot geotermalni fluid za prenos toplote uporabili vodo, ki ima mnogo ugodnih lastnosti, a so tekom razvoja ugotovili tudi lastnosti, ki neugodno vplivajo na prepustnostne lastnosti rezervoarja in jih je potrebno pri načrtovanju upoštevati. Ena izmed negativnih lastnosti vode je predvsem, da je močno topilo za minerale kamnin, pri čemer se njihova topnost običajno viša s povišano temperaturo (PRUESS, 2006). Injiciranje vode v razpoke v vroči kamnini povzroča najprej intenzivno raztapljanje, pri spremembi PT pogojev pa odlaganje mineralov, kar spreminja prepustnost razpok in oteži delovanje EGS. V poskusu odgovoriti na potrebe znižanja atmosferskih emisij CO<sub>2</sub> je BROWN (2000) predlagal, da bi kot fluid za prenos toplote uporabljali CO<sub>2</sub> in s tem kot postransko korist izvajali geološko shranjevanje CO<sub>2</sub>. Opazil je, da ima CO<sub>2</sub> nekatere ugodne fizikalne in kemijske lastnosti za delovanje EGS, kot so visoka ekspanzivnost, nižja viskoznost, manjša agresivnost čistega CO<sub>2</sub> za topljenje mineralov, poleg tega pa zavira obarjanje kalcita. Negativna lastnost mešanice vode in raztopljenega CO<sub>2</sub> je močna korozivnost, ki znižuje trajnost jekla v vrtinah, ceveh in turbinah ter povzroča številne tehnološke težave (RENPU, 2011).

### Analiza stroškov geotermalne električne energije

Podrobnejšo analizo **stroškov** geotermalne električne energije je izvedel SANYAL (2005). Preučil je geotermalne elektrarne, delujoče na **hidrotermalnih sistemih**, z električno kapaciteto v razponu od 5 do 150 MW<sub>e</sub> moči s 50 MW<sub>e</sub> kot »osnovnim primerom«. Strošek elektrike sestavljajo tri komponente: investicijski strošek (vključno s stroškom denarja), strošek delovanja in vzdrževanja (angl. operation & maintenance, O&M) brez upoštevanja kreditov ter strošek vrtanja dodatnih vrtin za vzdrževanje enake zmogljivosti (angl. make-up wells).

Vrednosti ekonomskih parametrov sicer odražajo stanje v ZDA, vendar so kakovostno uporabni:

- Strošek elektrike je znatno znižan z vzdrževanjem polne kapacitete proizvodnje, tudi če je potrebno vrtanje dodatnih vrtin v prvih 10-ih letih po začetku obratovanja. Vrtanje dodatnih

vrtin po 20-letnem obdobju od pričetka obratovanja ne zniža več stroška elektrike.

- Minimalno dosegljiv strošek elektrike je neobčutljiv na kapaciteto elektrarne in je reda velikosti 3,4 US¢/kWh (US¢ = dolarski cent). Strošek elektrike se lahko zniža z ustreznim upravljanjem vira in delovanjem elektrarne.
- Izravnani (niveliran) strošek elektrike iz 50 MW<sub>e</sub> elektrarne je v razponu 3,6 do 4,1 US¢/kWh. Izravnani strošek je neto strošek postavitve sistema obnovljive energije, deljen s pričakovano proizvedeno elektriko v celotni življenjski dobi sistema. Uporaben je za primerjavo tehnologij z različnimi značilnostmi delovanja.
- Strošek elektrike je najbolj občutljiv na enoto O&M stroška, sledi enotni strošek investicije, obrestna mera in stopnja inflacije v padajočem zaporedju. Strošek je relativno neobčutljiv na proizvodnost vrtine in stopnjo padanja proizvodnosti, na strošek vrtanja na vrtino in na makroekonomsko klimo.
- Majhne delujoče elektrarne lahko po amortizacijskem obdobju 30 let znatno znižajo strošek elektrike, tudi do 20 % za elektrarne moči do 10 MW<sub>e</sub>, kar ni značilno za elektrarne s 50 MW<sub>e</sub> ali večje moči. Pri slednjih je sedaj prisotno dodatno tveganje zaradi starosti sistemov, saj se sedaj gradijo predvsem manjše elektrarne.
- Minimalno dosegljiv strošek elektrike se običajno znatno ne znižuje s povečanjem kapacitete elektrarne.

Medtem ko zaloga energije na enoto površine raste z globino, pri neto MW<sub>e</sub> proizvodni kapaciteti na vrtino ni nujno tako (SANYAL, 2010). Težava izhaja iz dejstva, da bi do globine s temperaturo 190 °C kapaciteta črpalne vrtine naraščala z globino, saj je 190 °C v splošnem temperaturna meja za danes dostopne črpalke. Pod to globino bi moral fluid prelivati iz vrtine in njena dejanska kapaciteta bi bila nižja. To velja do globine s temperaturo 220 °C, nad katero ni več možno posploševanje o kapaciteti.

Če se navežemo na **EGS**, pa je SANYAL (2009, 2010) s pregledom do sedaj razvitih tovrstnih sistemov, numerične simulacije idealiziranih EGS rezervoarjev, analize ekonomske občutljivosti in praktičnih premislekov glede lokalnih značilnosti pokazal, da se izravnani strošek električne energije iz EGS lahko zniža z naslednjimi koraki:

- Znižanjem stroškov obratovanja in vzdrževanja ter stroškov elektrarne.
- Povišanjem proizvodnosti na vrtino z njenim stimuliranjem in/ali povišanjem črpanja s koriščenjem razvoja tehnologije črpalke.
- Izborom lokacije z najvišjim navpičnim temperaturnim gradientom in/ali najdebelejšim možnim sedimentnim pokrovom nad podlago z rezervoarjem.
- Izborom globine vrtanja, ki do skrajnosti poveča kapaciteto vrtine na enoto stroška vrtanja, namesto prizadevanja za dosego najbolj vročega vira.



- Izdelavo največjega možnega stimuliranega rezervoarja na vrtino.
- Izboljšanjem učinkovitosti stimulacije rezervoarja, predvsem z zmanjšanjem razmika med razpokami ter poenotenjem njegovih hidravličnih značilnostih.
- Razvojem mnogokratne stične EGS enote.
- Z modeliranjem rezervoarja optimizirati razmik med vrtnami in hitrost injiciranja, ki zniža stopnjo padanja neto proizvodnje s časom.

Za EGS projekt s 7 MW<sub>e</sub> neto moči so SANYAL et al. (2007) ocenili najnižji izravnani strošek na 5,43 US¢/kWh. Ekonomičnost bi bila dosežena pri ceni pod 5 US¢/kWh.

### *Sinergije naftne in geotermalne industrije*

Geotermalna industrija ima skupne značilnosti s številnimi tehnično sorodnimi panogami (CAVNESS, 2011): naftno in plinsko industrijo (usmerjeno in globoko vrtnanje, stimulacija in inženiring rezervoarjev), pridobivanjem odpadne toplote (termodinamika toplotnih izmenjevalcev), kemično industrijo (preprečevanje korozije in odlaganja mineralov v cevovodih in opremi), pridobivanjem energije iz vetra in sonca (financiranje in povezovanje v omrežje), okoljevarstvom (omejevanjem izpustov plinov in visoko mineralizirane vode v okolje) in tehnologijo elektrarn na fosilna goriva (inženiring turbinskih generatorjev, kontrolni sistemi, delovanje). Sodelovanje med panogami omogoča povečanje učinkovitosti in zmogljivosti geotermalnih virov, zniža tveganje in poviša donosnost projekta.

Naftna in plinska polja predstavljajo perspektiven trg za geotermalno elektriko, ker so pogosto odročna in daleč od daljnovodov in porabijo veliko elektrike. Elektriko ustvarjajo s kupljenim dizelskim gorivom ali svojim naravnim plinom. V **Ratonskem sedimentnem bazenu** (južni Kolorado, ZDA) naftno-plinska družba Pioneer Natural Resources Inc. razvija polje za pridobivanje metana iz premoga (angl. Coal Bed Methane field, CBM). V bazenu je poleg znatnih CBM virov tudi povišan geotermični gradient, ki je sprožil študijo potenciala za razvoj EGS pod njim (CAVNESS, 2011). Če bo razvoj tega EGS uspešen, bi lahko elektriko iz naravnega plina nadomestili z geotermalno. Sinergija med geotermalno in naftno industrijo je torej v tem, da obstoječe plinske (naftne) vrtnine priskrbijo raziskovalne podatke za oris geotermične anomalije in s tem omogočajo ogromen prihranek zavoljo začetnega visokega tveganja razvoja geotermalnih projektov. Nadaljnje sinergije so še tehnično znanje in infrastruktura plinskega polja. Družba ima tako zemljišče in rudarske podzemne pravice, vrtno opremo in ekipe, opremo za hidrofrakturiranje in dokončanje vrtnin, obstoječe geofizikalne podatke in analize, kakor tudi strokovnjake za lokalno geologijo.

Več naftnih družb je v zadnjih 40 letih pokazalo zanimanje za geotermijo, vključno za EGS. Razvoj EGS je dvosmeren proces, kot ponazarja GARNISH (2011) o napredovanju **Los Alamos** projekta v letu 1993, kjer je bila industrija neposred-

no vpletena v HDR program od vsega začetka. Vse vrtnanje in dovršitve v **Fenton Hillu** med 1970 in 1980-timi leti so opravile privatne družbe po pogodbi. Neobičajno vrtnanje in jedrniki, motorji v vrtini, pakerji v odprti vrtini in ostala oprema, ki so bili razviti za HDR programe, so sedaj našli uporabo vseh v vrtni industriji. Karotajne instrumente, prvotno namenjene za uporabo v **Fenton Hillu**, so na široko priredile običajna geotermalna, naftna in plinska industrija. Več elementov visokotemperaturne karotajne opreme, sedaj v široki uporabi, izvira iz projektov **Los Alamos** in **Rosemanowes**. Izboljšane seizmične tehnike so pripeljale do visoke rafiniranosti v poskusu razumevanja HDR rezervoarja v **Fenton Hillu**, in so sedaj po svetu uporabljane za ovrednotenje naftnih in plinskih rezervoarjev in za učinkovitejšo pridobivanje fosilnih virov.

Izvajale so se tudi raziskave za so-proizvodnjo vode iz naftnih polj. V Južni Avstraliji (**Moomba**) je družba Santos pred več kot 20 leti raziskovala možnost uporabe elektrike, pridobljene iz EGS, da bi se izognila rabi plina za pogon glavnih kompresorjev. MIT poročilo (TESTER et al., 2006) posveča celo poglavje potencialu za so-proizvodnjo vode iz naftnih polj v ZDA ob **Mehiškem zalivu**. Teoretično modeliranje kaže, da so stimulacije v sedimentnih naftnih nahajališčih z razvito poroznostjo in prepustnostjo ugodnejše kot v razpokanih kamninah podlage (McKENNA et al., 2005). Nekaj študij v Veliki Britaniji je bilo posvečenih obetom za postavitve geotermalne elektrarne na naftnih platformah **Severnega morja**. Družba Suncor je raziskovala EGS kot vir toplote za proizvodnjo katrana iz peskov v **Alberti** (Kanada) in za ublažitev okoljskih vprašanj povezanih s katranovimi peski.

Obstajajo **tri vrste naftnih vrtnin**, ki so zmožne preskrbeti geotermalno energijo za proizvodnjo elektrike (SANYAL & BUTLER, 2010):

- (a) proizvodna naftna ali plinska vrtina z deležem vode
- (b) naftna ali plinska vrtina, opuščena zaradi visokega deleža vode
- (c) vrtina v geotlačnih (angl. geopressured) sedimentnih rezervoarjih z nadtlakom s slanico in raztopljenim plinom.

Razpoložljiva kapaciteta je bila ocenjena na podlagi dostopnih primerov za tipično vrtino (ali skupino vrtnin) v vsaki od teh kategorij. Kapaciteta proizvodnih naftnih ali plinskih vrtnin z deležem vode (a) za proizvodnjo elektrike je določena s pretokom in temperaturo proizvedenega fluida, temperaturo okolja in učinkovitostjo pretvorbe v geotermalni elektrarni. Faktorji, ki vplivajo na temperaturo fluida na ustju vrtine so: temperatura formacije, globina zajema, premer vrtine in pretok fluida. V naftnih vrtninah na nekaterih preplavljenih naftnih poljih v ZDA ob Mehškem zalivu dosega delež vode 95 % (McKENNA et al., 2005).

Kapaciteta opuščene plinske vrtnine (b) je odvisna od enakovrednih faktorjev kot v prvem (a) primeru ter slanosti vode in vsebnosti plinov fluida, grelni vrednosti plina in značilnosti opreme za proizvodnjo elektrike iz plina. Pretoka vode in plina sta

odvisna od hidravličnih lastnosti formacije, vsebnosti plina (raztopljenega in prostega) v fluidu, temperature in tlaka v formaciji in izvedbe vrtilne. Ameriški strokovnjaki so predlagali hibridni sistem za proizvodnjo elektrike iz proizvedenega plina in vode. Ocena takšne plinske vrtilne na obali Mehiškega zaliva v ZDA je pokazala, da je proizvodnja elektrike tehnično možna in komercialno sprejemljiva (SANYAL & BUTLER, 2010).

Kapaciteta geotlačne vrtilne v rezervoarju z nadpritiskom (c) je določena z vsemi omenjenimi faktorji za opuščeno vrtilno (b) in s količino nadtlaka v formaciji. Taka proizvodna vrtilna v kraju **Pleasant Bay** (Teksas, ZDA) je sposobna proizvajati 3,9 MW<sub>e</sub> od tega 1,5 MW<sub>e</sub> iz geotermalnega fluida, 1,9 MW<sub>e</sub> iz proizvedenega metana in 0,5 MW<sub>e</sub> iz kinetične energije proizvedenega fluida. Neto razpoložljiva moč sistema je 3,1 MW<sub>e</sub>, če odštejemo parazitsko moč za injiciranje. Slednje je zelo pomembno za razvoj opisanega projekta. Gospodarnost takega projekta je odvisna od tržne cene naravnega plina; če je ta dovolj visoka, je bolj donosno prodajati plin kot iz njega proizvajati elektriko.

**Geotermalni viri** (PETTY & LIVESAY, 2008) na **območju naftno-plinskih polj** so možni kot plitvi konvekcijski sistemi do globine 3 km ali konduktivni sistemi v globinah nad 3 km. V prvih pričakujemo visokotemperaturne fluide, ki se gibljejo po prelomih in razpokah v dobro prepustnem rezervoarju, v katerem prevladuje hidrostatski tlak. V globokih konduktivnih sistemih se naravna prepustnost običajno znižuje z globino, zato jo je potrebno izboljšati s postopki stimulacije rezervoarja, drugače pa se sistemi obnašajo podobno kot geotlačni rezervoarji.

**Razvoj vira** se lahko odvija po dveh scenarijih (PETTY & LIVESAY, 2008):

1. uporabijo se obstoječe vrtilne
  - a) prednosti (koristi) so naslednje:
    - varčevanje pri stroških vrtilne
    - dostopni so obstoječi podatki o hidravličnem in geotermičnem stanju
    - dostopni so obstoječi hidrogeološki podatki o rezervoarju
    - fluid (običajno voda) je že prisoten v rezervoarju
  - b) pomanjkljivosti so:
    - vrtilna se mora preurediti za proizvodnjo termalne vode
    - za ekonomsko proizvodnjo so potrebni visoki pretoki, ki jih vrtilne zaradi majhnega premera in omejene cone dotoka pogosto ne dosežajo
    - manjši premer vrtilne povzroči večji padec tlaka in temperature
    - visok tlak rezervoarja lahko povzroči težje (in dražje) injiciranje vanj
2. izvrtajo se nove vrtilne
  - a) koristi so naslednje:
    - vrtilna ima ustrezno širok premer, da se poveča pretok fluida
    - vrtilna se lahko zaključi v (več) conah z vročim fluidom

- filtri se izvedejo v globini, ki zagotavlja potrebno temperaturo fluida
- fluid je ali že prisoten v rezervoarju ali pa ga injiciramo kot v EGS
- vrtilne lahko poteka do globin z višjo temperaturo v kristalinski podlagi
- b) pomanjkljivosti so:
  - visoka cena vrtilne in izdelave globoke vrtilne
  - visoko tveganje za uspešnost vrtilne in pridobivanje novih podatkov v globokih vrtilnah.

### Pretvorba geotermalne energije v elektriko

Za razumevanje pretvorbe toplote geotermalnega fluida v delo (in s tem električno energijo) je potrebno razumevanje nekaterih termodinamskih pojmov. Velja, da večji kot je potencial geotermalnega medija glede na okolico, večja je njegova sposobnost, da opravi delo. Ta potencial se imenuje dostopno delo ali eksergija. **Eksergija** neke snovi je teoretična količina mehanskega dela, ki se lahko pridobi iz njene toplotne vsebnosti pri danih začetnih in končnih pogojih (BODVARSSON & EGGERS, 1972). Sledi, da čim višja je temperatura fluida, tem višja je njegova eksergija. Visokotemperaturni geotermalni fluide so pri različnem tlaku v različnih fazah: kot nasičena tekočina, zmes tekočine in pare ali para, in imajo kot taki različno eksergijo. Kot primer naj navedemo, da ima visokotemperaturni geotermalni fluid z 200 °C kot suha nasičena para 3-krat večjo specifično entalpijo in 5-krat višjo eksergijo kot nasičena tekoča voda. Ali drugače, para lahko opravi 5-krat več termodinamskega dela kot voda na enoto mase. Pri 100 °C je razlika celo 10-kratna (LEE, 2001). Posledično moramo za čim boljši ekonomski učinek uporabiti geotermalne sisteme čim višjih entalpij in temperatur. Razmerje med specifičnimi entalpijami kamnin do globine 10 km, visokoentalpijskih virov nasičene vodne pare in konvencionalnih fosilnih goriv je 1 : 25 : 300. Za obratovanje geotermalne elektrarne torej potrebujemo veliko geotermalnega fluida (RAVNIK, 1989).

Pretvorba geotermalne energije v električno je tehnološko možna pri relativno nizki temperaturi fluida, a na ekonomsko upravičenost projekta vplivajo številni faktorji tveganja (DELLOITE, 2008), med katerimi so najpomembnejši obseg in vrsta geoznanstvenih raziskav, dostopnost vira, hidrogeološki parametri rezervoarja, tehnični parametri, ki vplivajo na način izrabe in porabo parazitske elektrike, obnovljivost in trajnost vira, lokalni faktorji in zakonodaja ter parametri same elektrarne. Med lokalne faktorje upoštevamo, da je na nekem odročnem kraju geotermalni vir edini dostopen in bi bilo izkoriščanje nekega drugega vira negospodarno.

Za izgradnjo geotermalnih energetskih objektov so potrebne ustrezne predhodne raziskave, potrjene s pilotnimi objekti minimalnih dimenzij. Šele njihovi ugodni rezultati opravičijo nadaljevanje del. Zato se vlaga veliko truda v raziskave

znižanja negotovosti vrtnanja, v kombinaciji z magnetoteluriko, poleg reinterpretacije obstoječih podatkov (z novimi metodami in računalniškimi programi) iz prejšnjih naftnih raziskav (BERTANI et al., 2011). V Nemčiji obstaja težnja k uporabi 3D seizmike, celo za projekte z nizkim megavatnim potencialom. Predhodne geoznanstvene raziskave morajo obsegati (LAWLESS, 2007):

- Prostorsko opredelitev geotermalnega vira, tudi s površinskimi geofizikalnimi raziskavami.
- Pilotne raziskave z vrtnjami.
- Opis prepustnosti (dobra / potrebno jo je izboljšati s stimulacijo) in poroznosti.
- Hitrost konvekcije za oceno prenosa toplote in velikost geotermičnega gradienta.
- Hidrogeološki konceptualni model z območjem napajanja in iztoka iz sistema.
- Možnost konflikta interesa med uporabniki geotermalnega fluida, nafte in plina,...
- Karakterizacijo fluida: kemijska sestava, prisotnost plinov, fazno stanje.
- Način odvzema fluida: črpanje ali prelivanje.
- Ocena virov v predvidenem časovnem obdobju izrabe (25 / 30 / 50 let).
- Določitev tipa turbine, generatorskega sistema in kapacitete energetskega objekta.
- Tehnične, okoljevarstvene in ekonomske študije.

Oceno geotermalnega vira še pred pilotnim vrtnanjem se lahko izdelata na podlagi gostote površinskega toplotnega toka, analogije s podobnimi območji, volumetrične ocene uskladiščene toplote (angl. heat in place) ali matematičnega modela toka fluida in toplote. Če se geotermalni vir že izrablja, se lahko njegovo stanje oceni tudi z analizo krivulj upada izdatnosti s časom.

Za proizvodnjo geotermalne elektrike potrebujemo vsaj eno proizvodno in eno reinjicirno vrtino. Ker je potreben relativno velik pretok geotermalnega fluida, tlak in s tem njegovo količino v rezervoarju vzdržujemo z vračanjem toplotno izrabljenega fluida vanj. Zaradi hidrogeoloških značilnosti rezervoarja je pogosto potrebno izdelati več reinjicirnih vrtin kot je proizvodnih. Zato je razumljivo, da večji del stroškov razvoja geotermalnega sistema obsega vrtnanje novih vrtin. Cene vrtnanja so zelo različne, ker so odvisne od lokacije, lokalnih geoloških pogojev, tehnologije vrtnanja ter tržnih zakonitosti (gibanja cen surovin). Za orientacijo lahko omenimo, da 3 km globoka zaključena vrtina (s cevovodno in filtri) stane vsaj 3 milijone USD (TESTER et al., 2006; CHANDRASEKHARAM & BUNDSCHUH, 2008), medtem ko se cena 4 km globoke vrtine giblje med 5 in 12 milijoni USD. V **Soultz-sous-Forêts**-ju so dosegli ceno vrtnanja 5 milijonov € za 5 km globoko vrtino GPK-3 glede na ekonomski cilj 10 milijonov € za 6 km globoko vrtino (UNGEMACH & ANTICS, 2010).

Poleg stroškov vrtnanja je ekonomičnost pretvorbe geotermalne v električno energijo pogojena predvsem s temperaturo delovnega fluida. Mejna vrednost standardnih pretvorbenih sistemov je zaradi turbin postavljena na okoli 600 °C, čeprav ne-

kateri energijski viri dosežejo veliko višje temperature (jedrska in fosilna goriva, sončna energija). Nasprotno hidrotermalni viri le redko presežejo temperaturo 350 °C. Drugi zakon termodinamike postavlja nepremostljivo oviro za gospodarnost pretvorbe toplote v elektriko pri nižjih temperaturah, zato je termična učinkovitost pretvorbe geotermalnih virov nizka: pri vhodni temperaturi 100 °C v turbino znaša le 8 %, pri 200 °C pa okrog 18 %.

Pri večini geotermalnih virov se temperatura fluida od 150 do 180 °C smatra kot spodnja meja za ekonomsko sprejemljivo proizvodnjo elektrike s klasičnimi parnimi turbinami v konvencionalnih geotermalnih elektrarnah (DIPPO, 1987). Pretvorba toplote v elektriko se vrši po treh različnih principih oziroma procesih (internet 4, internet 5; DIPPO, 1999, 2009; MEDVED & NOVAK, 2000; DVORŠAK, 2009):

- *odprti parni proces* (angl. dry steam) v klasični parni turbini: vroča suha para običajno s temperaturo vsaj 230 °C se uvaja direktno v turbino, kjer ekspandira do tlaka okolice in prosto izstopa iz turbine v ozračje. Turbina poganja rotor, generator pa mehansko delo pretvori v električno energijo (geotermalna polja s suho paro so redka),
- *zaprti uparjalni proces* (angl. flash steam): ko v dvofaznem geotermalnem viru prevladuje para, se uporablja enostopenjski proces, pri katerem vohijo paro v enostopenjsko turbino, kjer ekspandira. Če pa prevladuje voda, pa se pogosto uporablja dvostopenjski parni proces; najprej se izkoristi energija pare iz nasičenega fluida s temperaturo običajno vsaj 180 °C, ki jo iz separatorja vohijo v visokotlačni del turbine. Voda pod visokim tlakom iz separatorja se pri nižjem tlaku v dodatnem uparjalniku (angl. flash tank) upari. Para se uvaja v nizkotlačni del turbine, ostanek vode pa se vrača v vodonosnik (najbolj razširjen tip),
- *binarni termodinamični proces* (angl. binary cycle): geotermalna voda s temperaturo med 80 in 150 °C upari delovni fluid - tekočino z nižjim vreliščem od temperature vrelišča vode. Njegova para ekspandira v turbini in poganja turbino generatorja.

V svetu so pogoste geotermalne elektrarne, kjer za povišanje izkoristka pretvorbe energije združujejo postopek pridobivanja električne energije s klasično parno turbino in binarni princip - geotermalne elektrarne s kombiniranim ciklom.

### ***Binarne geotermalne elektrarne***

V primeru nižje temperature geotermalnega fluida (med 80 in 150 °C) ali njegove visoke mineralizacije se za pretvorbo energije uporabi binarni proces. V toplotnem izmenjevalcu binarne geotermalne elektrarne sta aktivna dva zaprta krogotoka: en z geotermalnim fluidom in drugi z delovnim fluidom (slika 1). Geotermalni fluid upari delovni fluid in se potem vrača nazaj v geotermalni rezervoar, medtem ko uparjen delovni fluid opravi delo,



ki se pretvori v električno energijo, kondenzira in vrne v toplotni izmenjevalec. V geotermalnih binarnih elektrarnah se uporabljata dva tipa ciklov delovnega fluida: ORC in Kalina cikel. Pri **Kalina ciklu** termodinamični proces pretvorbe termalne energije v delo opravi zmes amonijaka in vode, medtem ko pri **ORC** (angl. Organic Rankine Cycle) sodelujejo organske spojine z visoko molekulska maso (hladilne tekočine: freoni, izobutan, izopentan, R-115, R-717, R-22, itd.)

Prednosti binarnega sistema so: večji izkoristek pretvorbe energije z uporabo kombiniranega cikla, večja dostopnost geotermalnih rezervoarjev zaradi izrabe virov z nižjo temperaturo, zaprt krogotok geotermalnega fluida omogoča izrabo visoko mineraliziranih fluidov, zaradi skoraj nespremenjene kemične sestave fluida je manj težav z obarjanjem mineralov pri reinjiciranju ter skorajda ni izgub fluida v sistemu zaprtega krogotoka. Opis tehničnih prednosti z vrsto delujočih binarnih elektrarn je objavilo že podjetje ORMAT (1989). V naši literaturi sta jih opisala KRALJ (1999) in GROBOVŠEK (2005). Slabosti tega sistema so: veliki in dragi toplotni izmenjevalci, nizki izkoristki pri visoki temperaturi okolja (zraka), potrebujemo veliko geotermalnega in delovnega fluida, potrebna je reinjekcija in s tem reinjekcijske vrtine. Temeljiteje sta vplive geotermalnih elektrarn na okolje obdelala CLAUSER (2006) in DiPIPO (2009), slednji tudi tehnologije njihove ukinitve ali razgradnje.

Od vseh delujočih geotermalnih elektrarn v letu 2010 z 10898 MW<sub>e</sub> instalirane kapacitete je bilo približno 11 % moči (1178 MW<sub>e</sub>) instalirane v elektrarnah z binarnimi in kombiniranimi cikli ter hibridnimi sistemi pretvorbe (BERTANI, 2010, 2012). V Evropi binarni sistemi delujejo v Avstriji (**Altheim, Bad Blumau, Simbach/Braunau**), Nemčiji (**Neustadt-Glewe, Landau, Unterhaching, Bruchsal**), Franciji (**Soultz-sous-Forêts**) in na francoskem otoku Guadeloupe (**Bouillante**), v Turčiji v Mali Aziji (**Kizildere in Dora**) in **Pico Vermelho** na Azorskem otoku Sao Miguel (Portugalska).

Nam najbližja binarna ORC elektrarna obratuje v kraju **Bad Blumau** (Avstrija) z močjo 0,25 MW<sub>e</sub> bruto ter 0,18 MW<sub>e</sub> neto in proizvaja 1,2 GWh/leto (GOLDBRUNNER, 2010). Iz dolomitnega vodonosnika pridobivajo poprečno 30 l/s termalne vode s 110 °C, ki jo po izrabi toplote v elektrarni in za daljinsko ogrevanje vračajo v vodonosnik s temperaturo od 45 do 90 °C. V **Altheimu** v Avstriji od leta 2000 deluje binarna ORC elektrarna s kapaciteto 1 MW<sub>e</sub>. S poševno vrtino zajeta termalna voda v dolomitu in dolomitnem apnencu se izrablja tudi za daljinsko ogrevanje. Vodonosne kamnine so zadostne debeline in blizu prelomne cone, zato znaša pretok 18 l/s, njena temperatura na ustju vrtine pa 105 °C (GOLDBRUNNER, 2005). S 5-stopenjsko potopno črpalko so pretok povečali do največ 100 l/s, s tem da toplotno izrabljeno vodo vračajo v vodonosnik. Neto učinek ORC instalacije je okrog 500 kW pri pretoku 82 l/s, če odštejemo parazitsko obremenitev 350 kW za potopno črpalko (BERTANI, 2012). Uspešne so bile tudi raziskave v Nemčiji,

na primer v kraju **Neustadt-Glewe**. Elektrarna z ORC ciklom in 230 kW<sub>e</sub> instalirane moči omogoča tudi daljinsko ogrevanje in ogrevanje prostorov s 17 MW<sub>t</sub> moči (SCHELLSCHMIDT et al., 2010). Na Madžarskem strokovnjaki sicer omenjajo možnost pretvorbe geotermalne energije v električno (KUBUS, 2005), vendar poskusi niso uspešni. Testiranje dveh vrtin Ortaháza-3 in Ortaháza-5 v kraju **Iklódbördöce** (zahodna Madžarska, pokrajina Zala) v letu 2007 je sicer dalo zadovoljive rezultate glede temperature (146 °C) in kemijske sestave fluida, vendar je bil pretok premajhen (do 14 l/s) (GREENROCK ENERGY, 2007).

### Učinkovitost pretvorbe geotermalne energije

Učinkovitost pretvorbe geotermalne energije pogojujejo številni omejitveni dejavniki, ki se izrazijo šele ob delovanju elektrarne, za njeno okvirno oceno pa prikazujemo nekaj preprostih izračunov. Za učinkovitost pretvorbe toplote v električno energijo je zelo pomembna najnižja temperatura okolice na katero lahko ohladimo delovno tekočino, t.i. absolutna temperatura »mrtvega stanja« (angl. dead-state temperature). To je najnižja temperatura za zavrženje toplote (angl. heat rejection process) in najnižja temperatura »ponora« (angl. lowest sink temperature) (DiPIPO, 2007). Zaradi sezonskega nihanja temperature je npr. poleti, ko je temperatura zraka visoka, učinkovitost pretvorbe bistveno nižja kot pozimi. To je jasno iz naslednje enačbe (1), kjer je v števcu manjša razlika in posledično nižja učinkovitost, ko je temperatura okolice poleti višja.

**Najvišjo termično učinkovitost** ( $\eta^{TRI}_{th,max}$ ) v trikotnem ciklu delovanja izračunamo po enačbi (DiPIPO, 2007):

$$\eta^{TRI}_{th,max} = \frac{T_H - T_0}{T_H + T_0} \quad (1)$$

kjer sta:

$T_H$ : absolutna temperatura (K) geotermalnega fluida na vstopu v elektrarno

$T_0$ : absolutna temperatura (K) »mrtvega stanja« (najnižja razpoložljiva temperatura okolice)

*Primer 1:* Pri temperaturi okolja  $T_0 = 20$  °C in temperaturi fluida  $T_H = 150$  °C je najvišja termična učinkovitost 18,2 %, pri  $T_H = 120$  °C pa 14,6 %. Pri temperaturi okolja  $T_0 = 30$  °C pa dobimo 16,5 % za temperaturo fluida  $T_H = 150$  °C in 12,9 % za  $T_H = 120$  °C.

Za temperaturni razpon geotermalnih virov med 100 in 140 °C je DiPIPO (2007) glede na izbrane primere binarnih elektrarn po svetu v grobem določil **relativno učinkovitost** na  $58 \pm 4$  %. **Dejansko termično učinkovitost** ( $\eta_{th}$ ) binarne geotermalne elektrarne s tem temperaturnim razponom fluida ocenimo z enačbo:

$$\eta_{th} \cong 0,58 \cdot \frac{T_H - T_0}{T_H + T_0} \quad (2)$$

*Primer 2:* Pri temperaturi fluida  $T_H = 120$  °C in okolja  $T_0 = 20$  °C je termična učinkovitost 8,5 %.

**Relativna učinkovitost** je razmerje med dejansko termično učinkovitostjo ( $\eta_{th,act}$ ) in najvišjo termično učinkovitostjo ( $\eta_{th,max}^{TRI}$ ) v trikotnem ciklu delovanja.

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_{th,act}}{\eta_{th,max}^{TRI}} \quad (3)$$

**Dejanska termična učinkovitost** se računa po pogojih prvega zakona termodinamike in je razmerje med nominalno (neto) proizvodno močjo elektrarne in vloženo termično močjo (DiPIPO, 2004):

$$\eta'_0 = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{geo}(h_{in} - h_{out})} \quad (4)$$

kjer so:

$\dot{W}_{net}$ : nominalna (neto) proizvodna moč elektrarne (kW)

$\dot{Q}_{in}$ : stopnja prenosa toplote med sistemom in okolico (= vložena termična moč v kW)

$\dot{m}_{geo}$ : masni pretok geotermalnega fluida (kg/s)

$h_{in}$ : specifična entalpija fluida na vhodu (kJ/kg)

$h_{out}$ : specifična entalpija fluida na izhodu (kJ/kg)

*Primer 3:* binarna elektrarna Nigorikawa na Japonskem (DiPIPO, 2004):

$$\begin{array}{ll} \dot{W}_{net} = 1000 \text{ kW} & \dot{m}_{geo} = 50 \text{ kg/s} \\ T_0 = 13 \text{ }^\circ\text{C} & T_H = 140 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

Za dejansko termično učinkovitost dobimo 9,81 % po enačbi (4), po manj natančni enačbi (2) pa 10,5%. Za grobo oceno je razlika zanemarljiva. Eksergijska učinkovitost po drugem zakonu termodinamike je za ta primer 21,6 % in se običajno suče med 20 in 46 % za geotermalne fluide s temperaturami med 110 in 160 °C (DiPIPO, 2004; FRANCO & VILLANI, 2009).

*Primer 4:* Pri temperaturi fluida  $T_H = 150 \text{ }^\circ\text{C}$  in okolja  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  znaša najvišja termična učinkovitost 18,2 % in dejanska termična učinkovitost 13,5 %, zato binarna elektrarna deluje z relativno učinkovitostjo 75 %.

Ne glede na idealni cikel (Carnot, maksimalni trikotni), ki je uporabljen za ugotavljanje idealne učinkovitosti, je za pretvorbo iz najvišje ( $\eta_{th,max}^{TRI}$ ) v dejansko ( $\eta_{th}$ ) učinkovitost vedno potrebno uporabiti relativno ( $\eta_{rel}$ ) učinkovitost. Šest delujočih binarnih elektrarn v letu 2006 je izkazovalo relativno učinkovitost (na osnovi maksimalnega trikotnega cikla)  $55 \pm 10 \%$  preko širokega temperaturnega razpona fluidov. Variacija je posledica razlik v parazitski moči. Kljub omenjenemu relativna učinkovitost lahko dosega tudi do 85 % (DiPIPO, 2007).

Turbine v binarnem ORC ciklu in v geotermalnih elektrarnah z zaprtim uparjalnim procesom (angl. flash-steam) imajo tipično **izentropno učinkovitost** v razponu 77 do 82 %, medtem ko so parne turbine v sodobnih elektrarnah na ogljikovodike sposobne doseči izentropno učinkovitost do 90 %.

Čista (neto) proizvodna moč binarne elektrarne ( $\dot{W}_{net}$ ) se oceni iz enačbe (DiPIPO, 2007):

$$\dot{W}_{net} [kW] \cong 2,47 \cdot \dot{m} \left( \frac{T_H - T_0}{T_H + T_0} \right) (T_H - T_C) \quad (5)$$

kjer so:

$T_H$  in  $T_0$  kot v prejšnjih enačbah

$\dot{m}$ : masni pretok fluida (kg/s)

$T_C$ : temperatura fluida, ki zapušča hladno stran toplotnega izmenjevalca (K)

Privzeta je povprečna specifična toplota fluida 4,25 kJ/kg·K. V tej enačbi številka 2,47 predstavlja zmnožek specifične toplote fluida 4,25 kJ/kg·K in relativne učinkovitosti 0,58 iz enačbe (2).

*Primer 5:* Pri  $T_H = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\dot{m} = 25 \text{ kg/s}$  in  $T_C = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  dobimo čisto proizvodno moč 0,81 MW<sub>e</sub>, za  $T_C = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  pa le 0,63 MW<sub>e</sub>.

Enačbe so namenjene hitri oceni učinkovitosti in proizvodne moči binarnih elektrarn in ne morejo nadomestiti podrobnih analiz toplotnega ravnotežja, potrebnih za konstrukcijo elektrarne!

**Termična učinkovitost** (angl. efficiency) **pre tvorbe toplote v elektriko** s klasično parno turbino je le 10-12 % (RENZ & FILIPOVIĆ, 2005; KALINA, 2005), redkeje do 15 %. Geotermalne elektrarne, ki izkoriščajo visokoentalpijske geotermalne sisteme in imajo enostopenjske in dvostopenjske turbine (angl. single in double flash) ali suho paro, delujejo pri višji **razpoložljivosti energije**, tipično 75-90 %, kar je višje kot druge elektrarne na obnovljive vire energije (WEA, 2004). Slovenske izraze za naslednje definicije smo povzeli po knjigi TUME & SEKAVČNIKA (2004). Razpoložljivost energije (angl. capacity factor) je razmerje med proizvedeno elektriko (MWh) v nekem času (npr. v enem letu) in njeno potencialno možno proizvedeno elektriko (MWh), če bi delovala pri polni nominalni kapaciteti vse leto. Geotermalne elektrarne so zaradi stalnega delovanja zelo primerne za pokritje osnovnih obremenitev sistema, ker je njihova **časovna razpoložljivost** 92-99 %, z **obratovnim faktorjem** 84-96 %. V pojasnilo: Časovna razpoložljivost (angl. availability factor) je razmerje med celotnim časom delovanja elektrarne v nekem obdobju (enem letu) in celotnim časom tega obdobja. Obratovni faktor (tudi faktor obremenitve, angl. load factor) je razmerje med proizvedeno elektriko (MWh) v nekem času in najvišjo obremenitvijo (MW<sub>e</sub>) preko istega časa (v urah) (internet 7). Najvišjo obremenitev imenujemo tudi »delujoča kapaciteta« in je nekoliko nižja od instalirane kapacitete.

Proizvodnja elektrike iz geotermalnih virov je močno povezana z **razpoložljivostjo energije** elektrarne. Ta se je od leta 1995 naprej večala od povprečne začetne vrednosti 64 % do vrednosti 73 % v letu 2008. Poprečno razpoložljivost energije 90 % in več že dosegajo nekatera delujoča geotermalna polja, recimo The Geysers v ZDA (BERTANI, 2008, internet 8), ki uporabljajo učinkovite tehnične rešitve (kemične zaviralce obarjanja mineralov in preprečevalce korozije) in napredni pristop razvoja geotermalnega vira (upravljanje vira z matematičnimi modeli, reinjiciranje, boljše po-

znavanje parametrov geotermalnega polja z uporabo izboljšanih geofizikalnih meritev).

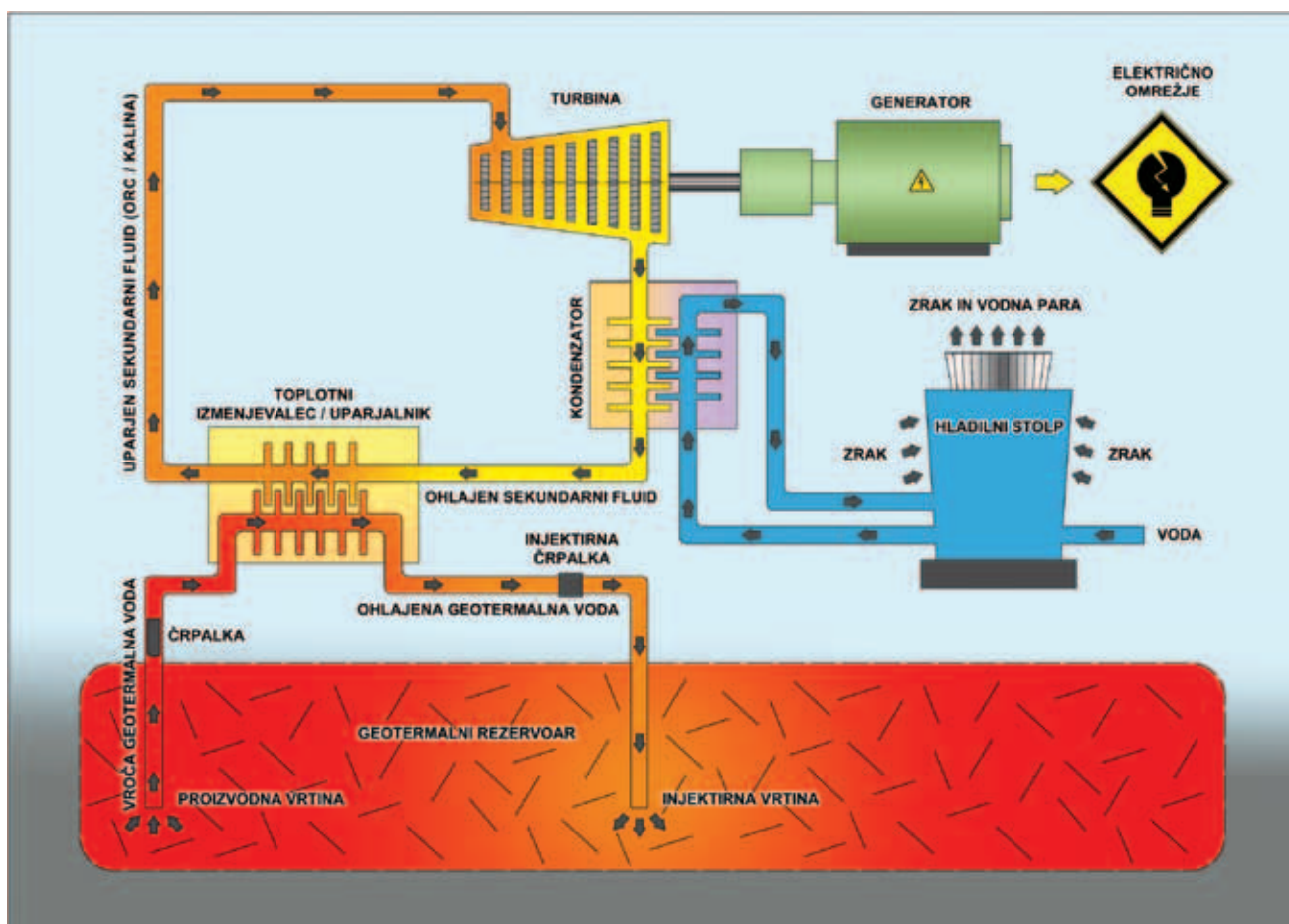
V temperaturnem razponu med 100 in 150 °C je najvišja termična učinkovitost (izkoristek) *klasičnih parnih turbin* le malenkost višja kot pri *binarnih sistemih*. Najvišja termična učinkovitost binarnih elektrarn **Miravalles** v Kostariki ter **Heber** in **Ormesa** v Kaliforniji, ZDA, sega do 16% (TESTER et al., 2006; DiPIPPo, 2007), pogosteje pa je v razponu 8 do 12 %. Pri fluidih s temperaturo pod 120 °C je izkoristek še nižji, le 6 do 11 % (RENZ & FILIPOVIĆ, 2005). Izkoristki se bodo v prihodnosti z napredkom verjetno izboljšali, še vedno pa bodo relativno nizki. Dejanska termična učinkovitost binarnih elektrarn se glede na vhodno temperaturo fluida po sliki iz članka CLAUSER-ja (2006) giblje do 7 % pri temperaturah do 110 °C (**Mulka** in **Birdsville** v Avstraliji, **Wendel** v ZDA, **Neustadt-Glewe** v Nemčiji, **Bad Blumau** v Avstriji) in do 13 % pri 170 °C (**Heber** v ZDA).

Tehnologija Kalina cikla naj bi bila boljša kot ORC. Učinkovitost prve je 7 do 17 % (pri temperaturi fluida 100 oz. 190 °C), medtem ko znaša učinkovitost ORC od 6 do 13 % (RENZ & FILIPOVIĆ, 2005). Nasprotno DiPIPPOVA (2004) analiza kaže, da so trditve o 15-50 % ali več proizvodne moči za isti toplotni vložek v Kalina ciklu glede na ORC neutemeljene. Izračunana razlika je 3 % v prid Kalina ciklu, pri čemer je avtor upošteval le eno binarno elektrarno s Kalina ciklom (2 MW<sub>e</sub>, **Húsavík**

na Islandiji), sedaj pa delujeta še dve novi, in sicer v **Unterhachingu** (južno od Münchna) in **Bruchsalu** v Nemčiji (SCHELLSCHMIDT et al., 2010; BERTANI, 2012).

DiPIPPo (2004) je pokazal, da lahko binarne elektrarne delujejo z zelo visoko eksergijsko učinkovitostjo (učinkovitost po drugem zakonu termodinamike), tudi ko so gonilni fluidi nizko temperaturni in z nizko specifično eksergijo. V nekaterih elektrarnah so dosežene 40 % ali višje eksergijske učinkovitosti z geotermalnimi fluidi s specifično eksergijo samo 200 kJ/kg ali celo nižjo (npr. **Heber** in **Beowawe** v ZDA).

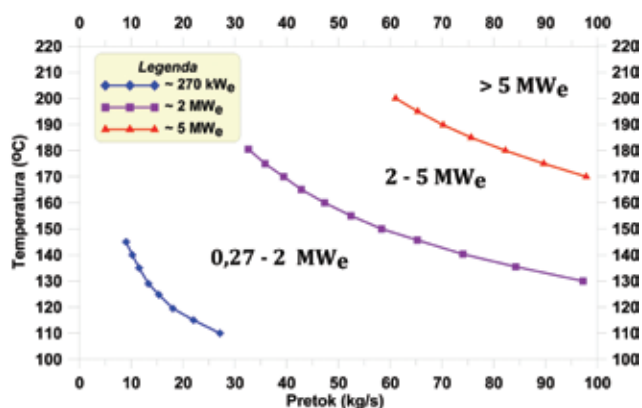
Odnos med izdatnostjo in temperaturo fluida za doseganje zelene moči binarne geotermalne elektrarne na Rankinov cikel ponazarja slika 2 (KUJBUS, 2010). Manj natančen graf s prikazom neto proizvodne moči iz nizkoentalpijskih geotermalnih fluidov za pretoke do 25 l/s sta podala CHANDRASEKHARAM & BUNDSCHUH (2008). Tabela 4 kaže zahtevane pretoke fluida kot funkcijo njegove temperature za binarno elektrarno moči 1 MW<sub>e</sub> (TESTER, 1982). Upoštevani so »optimalni termodinamični pogoji« različnih delovnih fluidov v binarnem Rankinovem ciklu:  $T_0 = 27\text{ °C}$ ,  $\eta_{\text{TURBINE}} = 85\%$  (suho),  $\eta_{\text{ČRPALKE}} = 80\%$ . Za severovzhodno Slovenijo sta najverjetnejša scenarija s temperaturo do 150 °C. Ker je potrebno dosti fluida, bo morda potrebno izdelati več proizvodnih vrtin, da bi dobili potrebno količino za obratovanje takšne binarne elektrarne.



Slika 1. Shema binarne geotermalne elektrarne (internet 6)

Figure 1. Diagram of binary geothermal power plant (internet 6)





Slika 2. Odvisnost instalirane moči geotermalne elektrarne od temperature in pretoka fluida (KUJBUS, 2010)

Figure 2. Dependence of installed capacity of geothermal power plant from temperature and fluid flow rate (KUJBUS, 2010)

Tabela 4. Potrebni pretoki geotermalnega fluida kot funkcija njegove temperature za binarno elektrarno moči 1 MW<sub>e</sub> (TESTER, 1982)

Table 4. Geothermal fluid flow rate requirements as a function of fluid temperature for the binary power plant of 1 MW<sub>e</sub> (TESTER, 1982)

Temperatura fluida / Fluid temperature (°C)	Potreben pretok fluida / Required fluid flow rate (kg/s)
125	33-50
150	20-28
180	11-16
200	9-12

### Proizvodnja geotermalne elektrike v evropskih državah

Po podatkih s svetovnega geotermalnega kongresa 2010 (BERTANI, 2010, 2012) je celotna moč geotermalnih elektrarn v svetu ob koncu leta 2010 znašala skoraj 11 GW<sub>e</sub>. V 5-letnem obdobju 2005-2010 je bil dosežen porast za okrog 2 GW<sub>e</sub> instalirane moči, kar ob grobem linearnem trendu pomeni okrog 400 MW<sub>e</sub> letno. Instalirana moč geotermalnih elektrarn v evropskih državah znaša skupno 1645,7 MW<sub>e</sub>, po državah pa je naslednja (BERTANI, 2012): Italija 843, Islandija 575, Turčija 91 (v Mali Aziji), Rusija 82 (na Kamčatki in Kurilih), Portugalska 29 (na otoku Sao Miguel), Francija 17,2 (na otoku Guadeloupe in že omenjeni Soultz v Alzaciji), Nemčija 7,1 in Avstrija 1,4 MW<sub>e</sub>.

Dejanska delujoča kapaciteta znese nekoliko manj od instalirane moči, za vse našete države 1.592 MW<sub>e</sub> namesto 1.645,7 MW<sub>e</sub>. Celotna proizvedena geotermalna električna energija v evropskih državah je bila leta 2010 okrog 11.384 GWh (BERTANI, 2012), z Italijo na prvem mestu s 5520 GWh in Islandijo s 4597 GWh takoj za njo. V ostalih evropskih državah pa je bila proizvodnja elektrike iz geotermalne energije naslednja: Turčija 490, Rusija 441, Portugalska 175, Francija 107, Nemčija 50 in Avstrija 3,8 GWh.

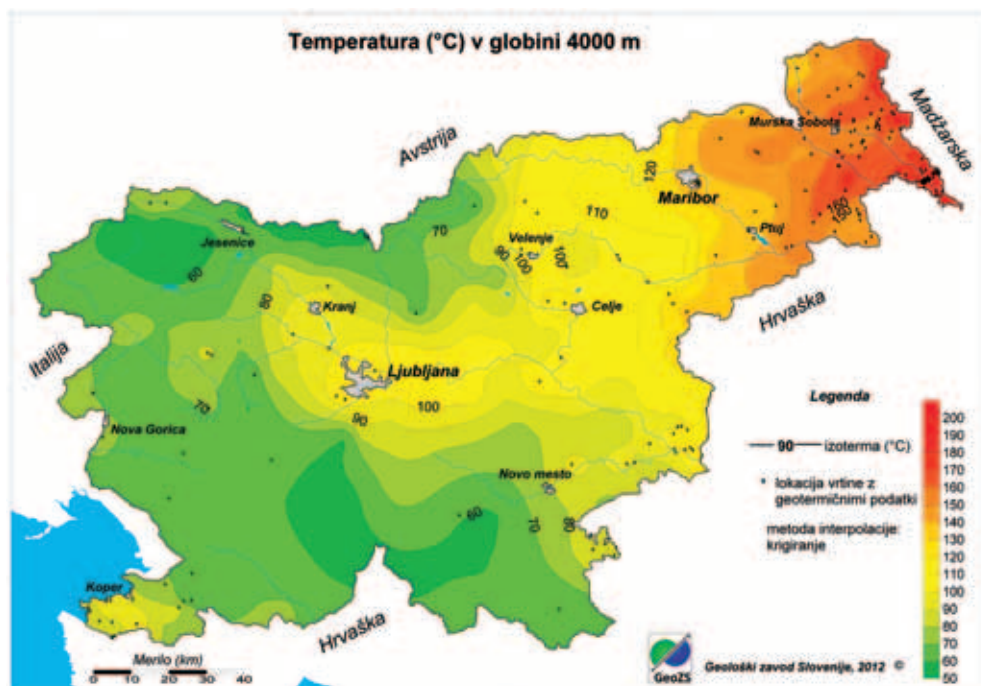
### Možnost izrabe geotermalne energije za proizvodnjo elektrike v Sloveniji

V Sloveniji je identificiranih 51 mest s pojavom termalne vode (LAPANJE & RMAN, 2009) in s tremi tipi nizkotemperaturnih geotermalnih sistemov. Najvišje temperature vode so izmerjene na območju severovzhodne Slovenije, kjer so zaradi raziskav nahajališč nafte in plina neogenski sedimenti in sedimentne kamnine do globine 3 km dobro raziskani, tako geofizikalno kot z vrtinami. Visokotemperaturni geotermalni viri so še nedokazani, a pričakovani v predneogenski podlagi skrajnega jugovzhodnega dela Pomurja in lokalno na območju globljih prelomnih con. Druga perspektivna območja po Sloveniji (Ljubljanska kotlina, Posavske gube, Haloze, Primorska, itd.) še niso ustrezno strukturno-hidrogeološko-geotermično raziskana z globokimi (do 5 km) raziskovalnimi vrtinami, zato njihovega potenciala ne moremo interpretirati. Možnosti identifikacije in razvoja visokotemperaturnih virov v Sloveniji so opisane z geotermičnim in hidrogeološkim potencialom v sledečem besedilu.

### Geotermični potencial Slovenije

Temperatura rezervoarja je prvi parameter identifikacije potencialnega geotermalnega vira. Globinske temperaturne karte so izdelane za celotno Slovenijo (metodo sta opisala RAJVER & RAVNIK, 2002) in se izboljšujejo z rezultati novih meritev. V globini 4 km je temperatura nad 100 °C pričakovana na območju vzhodne Slovenije, nad 150 °C pa vzhodno od Ptuja (slika 3). Za oceno visokotemperaturnih virov so izvajalci karotažnih in drugih meritev pridobili pomembne točkovne podatke predvsem iz globokih vrtin, kjer so bili ugotovljeni fluidi z zelo visoko temperaturo. Ena takih je 4048 m globoka vrtina **Ljut-1/88** pri Ljutomeru, kjer so kmalu po vrtanju maja 1988 med t.i. DST (angl. drill stem test) testiranjem odseka 4009-4018 m v globini 4015 m naleteli na »pregreto slojno vodo« s temperaturo 173 °C (HUNDRIC, 1988; DJURASEK & GALOVIĆ, 1988). Zaradi toplotnih izgub v vrtini je bila temperatura na ustju le še ca 148 °C (RMAN et al., 2009), izdatnost pa so ocenili na 27 l/s. Kratkotrajni hidravlični test je pokazal, da bi bilo možno izkoriščati paro z zmogljivostjo 40 kg/s (BOŠNJAK, 1992), vendar so v kasnejšem testiranju potencialnega vodonosnika v odseku med globinami 4010 do 4033 m ugotovili zelo omejen dolomitni rezervoar. Načrti za izkoriščanje geotermalnega sistema pri Ljutomeru za proizvodnjo elektrike in druge kaskadne rabe z vrtino Ljut-1/88 kot reinjicirno so sprva temeljili na pričakovanih o višjem pretoku fluida (vsaj 35 kg/s) oz. naravnim iztokom 230 m<sup>3</sup>/h s temperaturo na ustju nove vrtine vsaj 158 °C in s temperaturo v rezervoarju okrog 175 °C (KRALJ et al., 1994; VORŠIČ et al., 1995; GROBOVŠEK, 2005).

V vrtini **Mg-6/85** na območju Murskega gozda pri Lendavi, ki je globoka 3858 m, so v globini 3739 m februarja 1985 v sklopu DST meritev izmerili temperaturo 202 °C (RUNJIC, 1985; MARINKO,



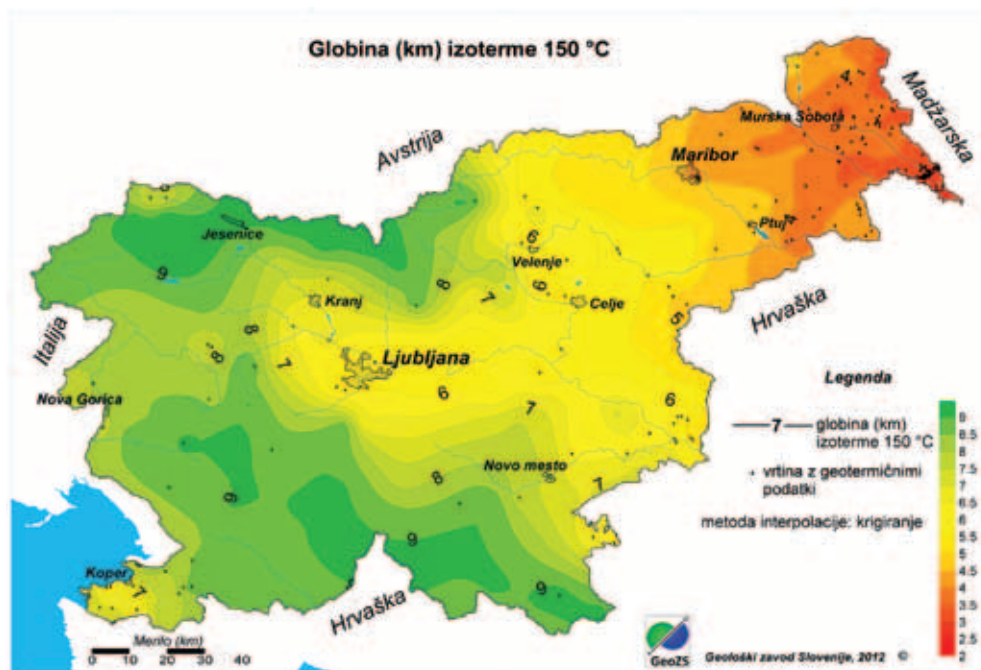
Slika 3.  
Pričakovane temperature  
v globini 4000 m v Sloveniji.  
Figure 3.  
Expected temperatures  
at 4000 m depth in Slovenia.

1988). To je doslej najvišja izmerjena temperatura v slovenski vrtini. Meritev še ni ponovljena, zato podatek ni preverjen. Regionalno sovпада z visoko temperaturo v vrtini **Mot-1/76** pri Motvarjevcih, prav tako blizu meje z Madžarsko. Tam so leta 1976 v globini 3760 m v statičnih pogojih izmerili 195,5 °C (INA Naftaplin, 1976).

Globina izoterme 150 °C (slika 4) predstavlja po MUFFLER-ju & CATALDI-ju (1978) mejo za proizvodnjo elektrike s *klasičnimi parnimi turbinami*. Izoterme so najplitvejše v severovzhodni Sloveniji, večinoma manj kot 5 km, na območju Lendave celo manj kot 3 km globoko. Zahodno od črte Dravograd-Zalec-Krško z izjemo dela osrednje Slovenije ležijo globlje od 6 km, pod visokimi gorami Alp in Karavank ter na Notranjskem pa ponekod globlje od 9 km. V obalnem pasu so izoterme 150 °C v globini približno 7 km.

Za oceno lokacij za postavitev *binarnih geotermalnih elektrarn* je potrebna karta porazdelitve globin izoterme 100 °C (slika 5) kot približna spodnja meja rentabilnosti teh elektrarn. Tudi te izoterme so najplitvejše v severovzhodni Sloveniji, manj kot 3 km globoko, na širšem območju Moravskih Toplic in Lendave celo manj kot 2 km. V osrednjem delu Slovenije in širši okolici Ljubljane ležijo okrog 4 do 5 km globoko, v goratem delu severozahodne in južne ter jugozahodne Slovenije pa v globinah okrog 6 km. V obalnem delu so predvidoma plitveje od 5 km.

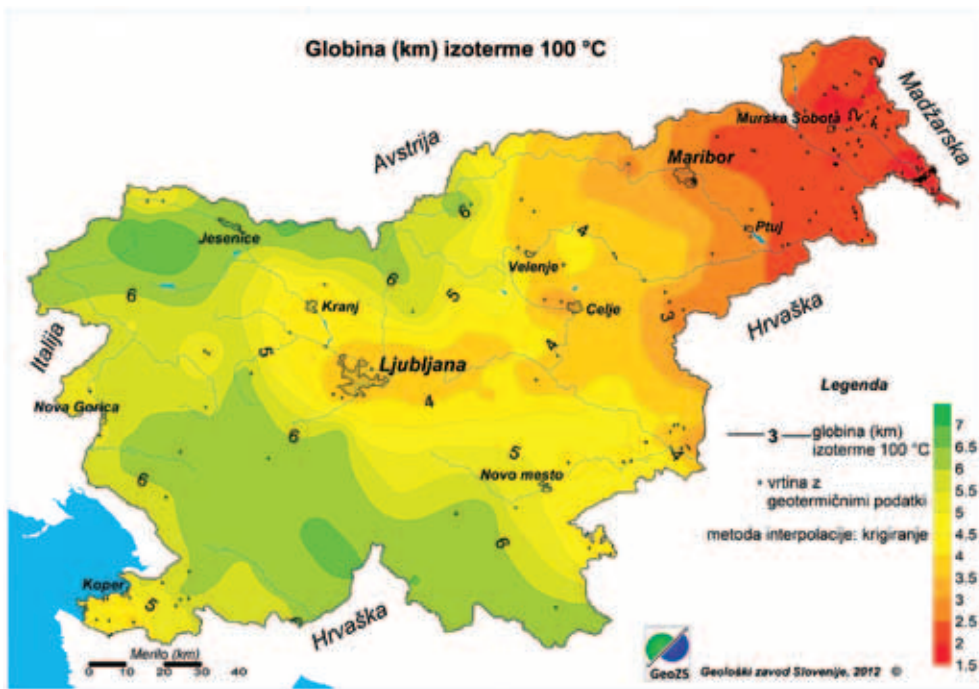
Pri dosedanjem poznavanju regionalnega temperaturnega polja v Sloveniji ter podatkih iz globokih naftnih vrtin lahko kot geotermično perspektivno opredelimo območje severovzhodne Slovenije, torej obrobje **Panonskega / Mursko-zalskega bazena**, ki se razprostira na površini okoli



Slika 4.  
Pričakovane globine  
izoterme 150 °C v Sloveniji  
(posodobljeno po Rajver  
et al., 2008)

Figure 4.  
Expected depths of the  
150 °C isotherm in Slovenia  
(updated after Rajver et al.,  
2008)





Slika 5.  
Pričakovane globine izoterme 100 °C v Sloveniji  
Figure 5.  
Expected depths of the 100 °C isotherm in Slovenia

3.200 km<sup>2</sup>. Zanj smo izračunali »dosegljivo bazo virov« toplotne energije celotnega paketa kamnin (angl. accessible resource base - ARB) do globine 3 km. Po RAVNIKU (1991) znaša teoretično dosegljiva količina toplotne energije (ARB) 850 EJ. Z izboljšanimi temperaturnimi kartami severovzhodne Slovenije ga sedaj ocenjujemo na 957 EJ. Potencialni (domnevni) globoki geotermalni sistemi v severovzhodni Sloveniji, to so mezozojski karbonatni vodonosniki pod neogenskimi plastmi (Termal II po KRALJU, 2008) s površino 1.877 km<sup>2</sup>, imajo identificirane vire reda velikosti 6,3 EJ (zelo približna vrednost) (RAJVER et al., 2002). Identificirane vire smo računali po volumski metodi (HAENEL & STAROSTE, 1988) in predpostavili delovanje dubletnih sistemov. ARB za celo Slovenijo do globine 5 km je ocenjen na 12.900 EJ. Omenimo lahko, da je ROBERTS (1978, V: EDWARDS et al., 1982) za celotno Jugoslavijo v temperaturnem razredu do 100 °C navedel ARB v obsegu 71.000 EJ, pri čemer ocena predvsem v severnem in vzhodnem delu države ni zajela omenjenih globin. ARB za zahodno Evropo do globine 3 km in vključno z viri do 250 °C je pred dobrimi 20 leti znašal 1.670.000 EJ (HAENEL & STAROSTE, 1988).

### Hidrogeološki potencial SV Slovenije

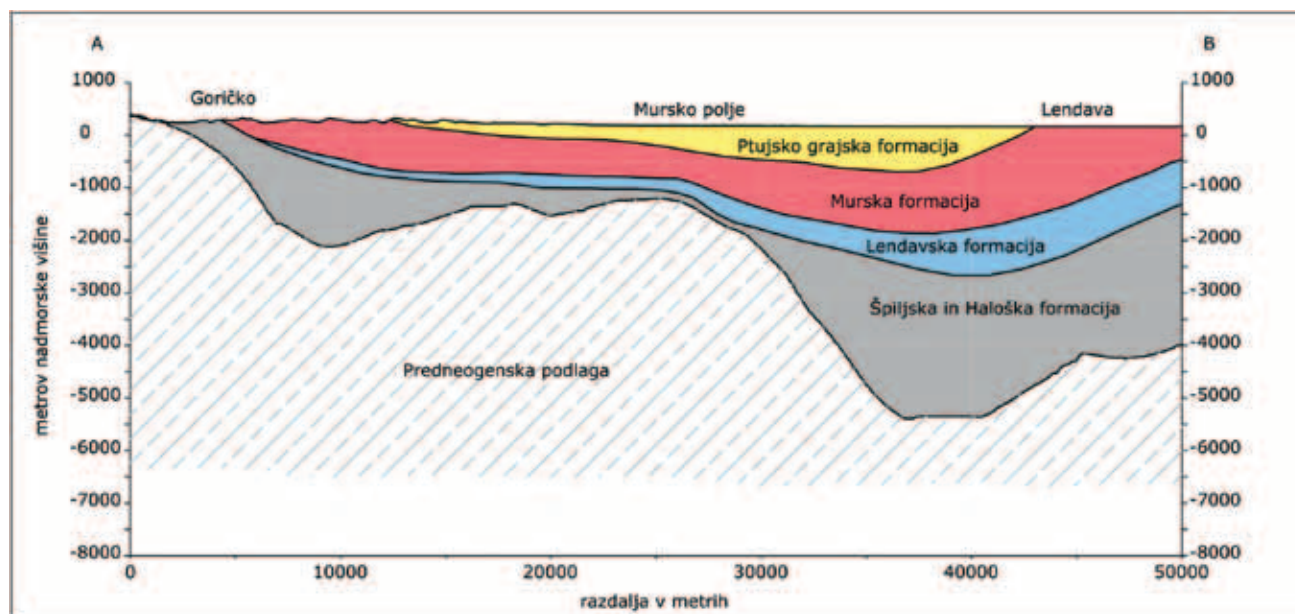
Mursko-zalski bazen v severovzhodni Sloveniji zapolnjujejo neogeni in kvartarni sedimenti in kamnine (slika 6), katerih prepustnost, poroznost in izdatnost se z globino znižujejo (RMAN et al., 2011b). Izdatni **neogeni nizkotemperaturni geotermalni vodonosniki** medzrnske poroznosti z aktivnim regionalnim tokom podzemne vode v Ptujsko-Grajski in Murski formaciji ležijo na medzrnskih in razpoklinskih vodonosnikih Lendavske, Špiljske in Haloške formacije (JELEN & RIFELJ, 2011), ki vsebujejo zelo staro meteorno vodo (več deset tisoč let) in slanice z zelo omejenim napajanjem. Zaradi intenzivnega odvzema termalne

vode brez reinjiciranja (občasno se reinjicira le v Mursko formaciji v vrtino Le-3g/08 v Lendavi), je opazno **rudarjenje** termalne vode, ki se kaže kot stalen upad nivojev podzemne vode in ponekod ciklično spreminjanje fizikalnih in kemičnih lastnosti vode (KRALJ et al., 2009b; RMAN, 2011; RMAN & SZÓCS, 2011; RMAN et al., 2011a). Najnovejše raziskave kažejo, da so geotermalni vodonosniki v Ptujsko-Grajski in Murski formaciji **prekomejni**, saj se razširjajo vsaj na Madžarsko in izkazuje medsebojno hidravlično povezanost (RMAN & SZÓCS, 2011; RMAN et al., 2011b; TÓTH et al., 2011a).

Za proizvodnjo geotermalne elektrike so potencialno primerne le **globlje ležeče plasti Lendavske ter Špiljske in Haloške formacije** (*sensu* JELEN et al., 2006). Potencialni vodonosniki dosegajo debelino le nekaj 10 metrov in imajo manj ugodne hidrogeološke parametre (RMAN et al., 2011b). Celotna poroznost dosega 10-15 %, efektivna je še nižja. Horizontalna prepustnost sega do 10 mD in je bistveno višja kot vertikalna, trenutna izdatnost pa se giblje do 10 l/s. Neugodna je tudi kemijska sestava te vode Na-HCO<sub>3</sub> do Na-Cl tipa, saj je v raziskanih primerih mineralizacija vode od 3 do 16 g/l, pogosto so prisotni tudi tehnološko problematični plini, kot sta CO<sub>2</sub> in metan.

Neogenske kamnine so odložene na t.i. **pred-neogensko podlago** (slika 7), ki sestoji v pretežni meri iz slabo prepustnih **metamorfni kamnin**. V *Radgonsko-vaškem tektonskem poljarku* nastopajo nad metamorfno podlago do 100 m debele leče zakraselih **karbonatnih kamnin**. Tako karbonatne kot metamorfne kamnine so znotraj prelomne cone tektonsko porušene in dobro prepustne. V *Ptujsko-ljutomerski sinformi* (JELEN et al., 2006) (preoblikovanem zmičnem tektonskem poljarku), ki je globlja od Radgonsko-vaškega poljarka, je verjetnost nastopanja karbonatnih kamnin nad metamorfno podlago še manjša. Karbonatne in klastične kamnine mezozojske in paleozojske starosti podaljška Karavank



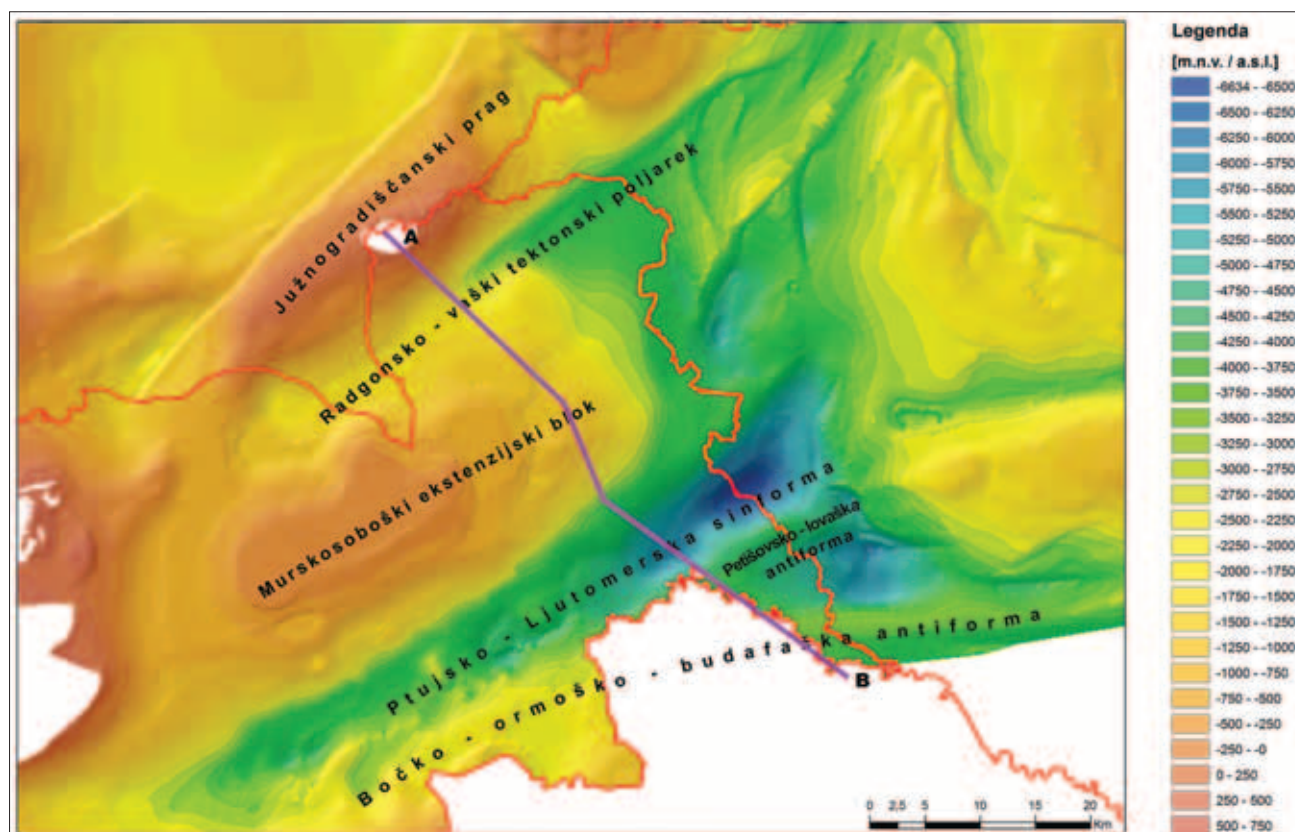


Slika 6. Geološki profil Mursko-Zalskega bazena v smeri SZ-JV (RMAN et al., 2011a; JELEN, 2009)

Figure 6. Geological cross-section of the Mura-Zala basin in NW-SE direction (RMAN et al., 2011a; JELEN, 2009)

so razvite v podlagi neogena v *Bočko-ormoško-budafaški antifirmi* (JELEN, 2009; FODOR et al., 2011) in *Petišovsko-lovaški antifirmi*. Globine do podlage so ocenjene na manj od 2 km v Haložah, na več od 3 km v Ormožu in Kogu, na več od 5 km v Lendavi in Petišovcih ter na območju Murskega gozda na manj od 4 km. Teoretično so za pridobivanje geotermalne elektrike v Sloveniji najbolj perspektivna območja Murskega gozda na

Bočko-ormoško-budafaški antifirmi in vzhodni del Goričkega v Radgonsko-vaškem poljarku, kjer je prepoznano najugodnejše razmerje med globino in temperaturo znotraj prepustnih prelomnih con. Kjer so na prepustno predneogensko podlago odložene prepustne bazalne plasti, kot so peščenjaki, breče in grebenski karbonati, jih je potrebno obravnavati kot povezano hidravlično enoto.



Slika 7. Relief predneogenske podlage severovzhodne Slovenije (MAROS et al., 2012) s potekom geološkega profila na sliki 6

Figure 7. Topography of the Pre-Neogene basement in Northeastern Slovenia (MAROS et al., 2012) with trace of geological cross-section in Figure 6

**Karbonatne kamnine** v Radgonsko-vaškem tektonskem poljarku tonejo v smeri od JZ proti SV od približno 1,5 do 4 km, v ozkem klinu ob Rabskem prelomu, od Radgone in Šalovcev proti Madžarski. Glede na poznavanje strukture kamnin domnevamo, da izkazujejo pomemben prekomejni značaj, kar aktivno raziskujemo. Dosežene so z vrtnami Rad-2 in Th3/3a (Radgona), Kor-1g/08 in Kor-1ga/08 (Korovci), St-1/82 (Strukovci), Peč-1/91 (Pečarovci), Dan-1/78 (Dankovci), Pan-1/76 (Panovci) in Šal-2/79 (Šalovci). Lateralna povezanost karbonatnih leč med posameznimi lokacijami še ni dokazana. Na jugovzhodnem krilu so se ob normalnih prelomih razvili izolirani karbonatni rezervoarji, primerni za skladiščenje zemeljskega plina (npr. Pečarovci) (SADNIKAR, 1993; GOSAR, 2005). Meritve celotne poroznosti na 14 vzorcih kažejo poroznost 5–10 %. Zaradi zakraselosti in razpokanosti apnenca in dolomita prevladuje kanalska in kanalsko-razpoklinska poroznost. Horizontalna prepustnost je izredno raznolika, saj sega od 0,5 do 400 mD (14 vzorcev), kar je predvsem posledica sekundarne poroznosti vzorcev. Pridobljena količina termalne vode med DST testiranjem je zanemarljiva. Najvišji trenutni pretoki so dosegli 8–11 l/s, pri čemer so bila znižanja nivojev zelo velika in tok fluida nestabilen zaradi razplinjevanja v vrtnah. Napajanje vodonosnika v Radgonsko-vaškem tektonskem poljarku je možno iz hribovja Bakony severno od Blatnega jezera na Madžarskem in z izcejanjem (angl. leakage) iz neogenskih sedimentnih kamnin. Kemične analize termomineralne vode iz predneogenske podlage (LAPANJE, 2006; RMAN & SZO ŹCS, 2011) kažejo na Na-HCO<sub>3</sub> do Na-Cl tip vode s srednjo do visoko mineralizacijo, 6–27 g/l raztopljenih snovi ter visoko vsebnostjo raztopljenih plinov, predvsem CO<sub>2</sub>, lokalno tudi CH<sub>4</sub> in H<sub>2</sub>S. Raziskovalci pojav pripisujejo coni Rabskega preloma (ŽLEBNIK, 1979; KRALJ & KRALJ, 1998; LAPANJE, 2007). Visoka mineralizacija in vsebnost plinov znižujeta energetska vrednost fluida, saj je že KESTIN (1980, V: LEE, 2001) pokazal, da v območju 100 do 200 °C prisotnost NaCl zniža eksergijo fluida do 7 % glede na čisto vodo, CO<sub>2</sub> pa do 17 %. Dodatni tehnološki problem predstavlja izločanje CO<sub>2</sub>, saj povzroča obarjanje mineralov po celotnem sistemu izrabe, ki ga sedaj preprečujejo z dodajanjem inhibitorja v vrtno (RMAN, 2011). Če bi termalno vodo izrabljali v zaprtem sistemu binarne geotermalne elektrarne s povišanim tlakom, bi morda obarjanje omejili, lahko pa bi se pojavilo celo v reinjicirni vrtni. Omenjeni plini ne kondenzirajo in so korozivni, zato jih je potrebno odstraniti pred vnosom vode v klasično parno turbino, vsekakor pa jih je potrebno odstraniti pred vtiskavanjem vode v reinjicirno vrtno. Na območju Ptujsko-ljutomerske sinforme so dolomiti ugotovljeni le v vrtni Ljut-1/88, kjer se je izkazalo, da je visokotemperaturni vodonosnik lateralno zelo omejen, kljub relativno dobri prepustnosti kamnine.

**Metamorfne kamnine** v podlagi so večinoma, razen znotraj prelomnih con, zelo slabo prepustne. Termalna voda se pridobiva iz treh vrtn v Mariboru, ki imajo zaradi omejenega napajanja zelo nizko izdatnost in omogočajo skupno črpanje do 1,5 l/s

pri padcu nivoja za več 100 m. Nasprotno je prepustnost razpokanih leč dolomitnega marmorja v metamorfnih kamninah Pohorske formacije močno povečana v Benediktu (KRALJ et al., 2009a), kjer izdatnost presega 20 l/s, pri čemer se izloča veliko CO<sub>2</sub>. Termalna voda v metamorfnih kamninah podlage ima od 1 do 7,5 g/l raztopljenih snovi ter je Na-HCO<sub>3</sub>-(Cl) tipa. Prelomne cone v podlagi sedimentacijskega bazena same po sebi ne zagotavljajo dovolj velike izdatnosti geotermalnega vira. Ker v Benediktu ni opaznih bistvenih sprememb vira zaradi izrabe vodonosnika, sklepamo na njegovo ustrezno napajanje. To je edini geotermalni sistem v Sloveniji, ki je prepoznan kot **konvekcijska celica**. Iz temperaturnih kart za globine med 1 in 2 km (TÓTH et al., 2011b) lahko slutimo na takšne celice tudi na območju med Mursko Soboto in Moravskimi Toplicami, vendar bi jih dokazale le dodatne geofizikalne raziskave (seizmika, magnetotelurika) in vrtno. Podobno, vendar globlje in bolj negotovo, velja za območje Murskega gozda in Lendave.

Geotermične in hidrogeološke značilnosti severovzhodne Slovenije kažejo, da so **geotermalni viri za pridobivanje elektrike**, ki jih je predlagal (RAVNIK, 1989), **izkoristljivi le z omejitvami**.

Navajamo in opisujemo jih pod alinejami a, b in c.

- a) Hidrotermalni rezervoarji v globini do 3 km in s temperaturo nad 80 °C
  - To so vodonosniki Lendavske, Špiljske in Haloške formacije severovzhodno od Murske Sobote in pri Lendavi, njihove omejitve pa so:
    - Imajo dokaj nizko izdatnost, zato bi bila potrebna *hidrofrakturacija*.
    - Visokomineralizirana voda z raztopljenimi plini obarja minerale in je primerna za izrabo preko zaprtega krogotoka geotermalnega fluida v *binarni elektrarni*.
    - Zaradi omejenega napajanja in dokazanega rudarjenja je obvezno *reinjiciranje* vse odvzete vode nazaj v rezervoar.
- b) Hidrotermalni rezervoarji v globini od 3 do 6 km in s temperaturo nad 150 °C
  - To so karbonatne kamnine predneogenske podlage v Radgonsko-vaškem tektonskem poljarku in Bočko-ormoško-budafaški anti-formi. Njihove omejitve so:
    - Zaradi omejenega rezervoarja imajo nizko izdatnost, zato bi bila potrebna *hidrofrakturacija*.
    - Obstoječe vrtno so redke in imajo velike toplotne izgube.
    - Za razvoj sistema je potrebno vrtnje *novih raziskovalnih, proizvodnih in reinjicirnih vrtn*.
    - Visokomineralizirana voda z raztopljenimi plini obarja minerale in je primerna za izrabo preko zaprtega krogotoka geotermalnega fluida v *binarni elektrarni*.
- c) EGS (HDR sistemi), ki ležijo vsaj 4 km globoko v slabo prepustnih metamorfnih ali magmat-skih kamninah



- To sta Pohorski granodioritni masiv in predneogenska podlaga Mursko-zalskega bazena.
- Zaradi slabe prepustnosti in nizke izdatnosti bi bila potrebna *hidrofrakturacija*.
- V novonastali rezervoar se bi *vtiskavala manj mineralizirana voda* s površja.
- Električna bi se proizvajala ali s *klasičnimi parnimi turbinami* ali z *binarnim sistemom*.
- Zaradi omejenega napajanja je obvezno *reinjiciranje*.

### Sklep

V medijih je izpostavljenih kar nekaj pobud za postavitev geotermalne elektrarne (Petišovci, Črenšovci, Dobrovnik, Murska Sobota). Nobe na izmed njih ne upošteva dovolj geoloških, geotermičnih in hidrogeoloških dejstev. Do sedaj še ni bilo opravljenih dovolj poglobljenih znanstvenih raziskav, ki bi potrdile zahtevan potencial za uspešno postavitev geotermalne elektrarne. Ustrezen pristop in zaporedje raziskav sta namreč odločilno vplivala na uspešen razvoj delujočih geotermalnih elektrarn v svetu. Nesistematičen pristop, kot ga trenutno opazujemo v Sloveniji, ima lahko dolgoročen negativen vpliv na razvoj celotnega sektorja geotermalne energije.

Slovenija s svojim severovzhodnim delom tvori del velikega Panonskega geotermalnega sistema. Geotermalne elektrarne v Sloveniji so glede na vedenje o kamninski podlagi Mursko-zalskega bazena v danem trenutku težko uresničljive. V svetovni strokovni literaturi nismo zasledili nobenega primera delujoče geotermalne elektrarne, zgrajene pri naših geoloških in geotermičnih pogojih. Primerjava z bližnjimi binarnimi elektrarnami v Avstriji in Nemčiji ter hidrogeološkimi zahtevami v tabeli 4 in na sliki 2 kaže, da so identificirani srednje temperaturni viri v SV Sloveniji zaradi bistveno prenizke izdatnosti brez tehnoloških izboljšav neprimerni za ekonomično proizvodnjo geotermalne elektrike. Zaradi prostorsko omejenih in izoliranih rezervoarjev je (brez sistema proizvodno-reinjicirnih vrtin) dvomljiva celo možnost vzpostavitve demonstracijske geotermalne elektrarne. Zaradi skopih hidrogeoloških podatkov raziskanih globokih vodonosnikov v podlagi govorimo le o verjetnem (hipotetičnem) obstoju visokotemperaturnih rezervoarjev na območju SV Slovenije. Zaradi zahtev po relativno velikem pretoku termalne vode bi dodatni strošek in morda tudi tehnične težave predstavljala hidrofrakturiranje rezervoarja in vračanje toplotno izrabljene vode vanj. V njih so pričakovane tehnološko neugodne slanice z visoko vsebnostjo plinov, kar bi upravičevalo uporabo binarnih sistemov.

Pred razvojem večjega geotermalnega projekta je potrebno s pilotnimi raziskavami ugotoviti lastnosti ciljanih geotermalnih virov in premisliti, ali je koristnejša/ekonomsko učinkovitejša neposredna raba geotermalne energije ali njena pretvorba v elektriko. Za perspektivna območja Petišovcev in Murskega gozda pričakujemo, da bodo geoznan-

stvene raziskave za potrditev potenciala izvedene sočasno z raziskavami plinonosti predneogenske podlage ali dodatnih potencialov plinskih vrtin. Na ostalih perspektivnih območjih bodo raziskave usmerjene le na geotermični potencial ter zato bolj tvegane in dražje.

Nove geološke raziskave in geotermalne vrtnice na območju SV Slovenije naj bodo usmerjene na iskanje geotermalnega sistema s temperaturo fluida na ustju vrtine nad 90 °C in izdatnostjo nad 25 kg/s, kar že omogoča uporabo v binarnem ciklu. V kolikor bo cilj postavitev klasične geotermalne elektrarne na parne turbine, sta potrebna temperatura in izdatnost bistveno višja. Ob prisotnosti visokomineraliziranega fluida z visoko vsebnostjo plinov, ki ne kondenzirajo, bo potrebno toploto odzemat v zaprtem krogu toplotnih izmenjevalcev binarnih sistemov. V primeru ugotovitve visokih temperatur in slabe prepustnosti kamnin bo potrebno razmisliti o razvoju izboljšane geotermalnega sistema (EGS), a zaradi visokih investicijskih stroškov je možnost njegovega razvoja v Sloveniji še dvomljiva. V vseh primerih bo potrebno izrabljeni fluid vračati v rezervoar.

Šele po hidrogeološki opredelitvi identificiranega geotermalnega rezervoarja lahko sledijo razprave o smiselnosti postavitve geotermalne elektrarne in izračuni njene moči.

Na osnovi razpoložljivih podatkov je težko pričakovati proizvodnjo geotermalne električne energije do leta 2020, kar je že upoštevano v akcijskem načrtu OVE. Glede na poznavanje razmer menimo, da je potrebno še naprej sistematično zbirati in interpretirati geotermične, hidrogeološke, geokemične, geofizikalne in geološke parametre iz globokih vrtin. Medtem, in v primeru manj uspešnih raziskav visokotemperaturnih virov, pa je smiselno pristopiti k oceni obstoječega nizko- in srednje-temperaturnega geotermalnega potenciala, perspektivnega za direktno izrabo in toplotne črpalke (LAPANJE et al., 2010).

### Zahvala

Obema recenzentoma, prof. dr. Miranu Veseliću in dr. Milošu Markiću, se avtorji lepo zahvaljujemo za koristne pripombe in popravke, ki so pripomogli pri izboljšanju članka, prav tako pa tudi sodelavcu Simonu Mozetiću za pripravo nekaterih slik.

### Akronimi, uporabljene enote in mnogokratniki

AN OVE	– akcijski načrt za obnovljive vire energije
ARB	– dosegljiva baza virov (angl. Accessible Resource Base)
CF	– razpoložljivost energije (angl. capacity factor)
EGS	– izboljšani (spodbujeni) geotermalni sistem (angl. Enhanced Geothermal System)
EPRI	– Electric Power Research Institute
HDR	– vroča suha kamnina (angl. Hot Dry Rock)



- HFR – vroča razpokana kamnina (angl. Hot Fractured Rock)  
 HWR – vroča vlažna kamnina (angl. Hot Wet Rock)  
 LASL – Los Alamos Scientific Laboratory  
 MIT – Massachusetts Institute of Technology  
 O&M – obratovanje in vzdrževanje (angl. Operation & Maintenance)  
 ORC – Rankinov organski cikel (angl. Organic Rankine Cycle)  
 OVE – obnovljivi viri energije  
 VSP – navpično seizmično profiliranje (angl. Vertical Seismic Profiling)

M = mega =  $10^6$

G = giga =  $10^9$

T = tera =  $10^{12}$

E = eksa =  $10^{18}$

J = Joule = W·s

MW<sub>e</sub> – megavat električni

GW<sub>e</sub> – gigavat električni

TW<sub>t</sub> – teravat termični

### Literatura in viri

- AXELSSON, G. & GUNNLAUGSSON, E. 2000: Long-term monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation. IGA, WGC2000 Short Courses, Japan: 226 p.
- BENDERITTER, Y. & CORMY, G. 1990: Possible approach to geothermal research and relative cost estimate. V: DICKSON M.H. & FANELLI M. (eds.): Small geothermal resources. A guide to development and utilization. UNITAR/UNDP Centre on small energy resources, Rome, 61-71.
- BERTANI, R. 2008: Geothermal power plants commissioned in the third millennium. IGA News, 72: 5-11.
- BERTANI, R. 2010: Geothermal power generation in the World 2005-2010 update report. V: HORNE R. (ed.): Proc. World Geothermal Congress 2010, Nusa Dua, Bali, Indonesia. IGA: 41 p.
- BERTANI, R. 2012: Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report. Geothermics, 41: 1-29, doi:10.1016/j.geothermics.2011.10.001.
- BERTANI, R., DUMAS, P. & GIBAUD, J.P. 2011: Geothermal electricity. 2) Analysis of geothermal electricity market in Europe. EGEC Deep Geothermal Market Report, 1<sup>st</sup> edition, Dec. 2011, Brussels, 6-23.
- BODVARSSON, G. & EGGERS, D. E. 1972: The exergy of thermal water. Geothermics, 1/3: 93-95.
- BOISSIER, F., DESPLAN, A. & LAPLAIGE, P. 2010: France country update. V: HORNE R. (ed.), Proc. World Geothermal Congress 2010, Nusa Dua, Bali, Indonesia. IGA: 9 p.
- BOŠNJK, D. 1992: Kako globoko bi se splačalo vrtati do vrelih najdišč? Geotermalna energija (3). Delo, Znanost, 11. nov. 1992.
- BROWN, D. 2000: A Hot Dry Rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO<sub>2</sub> instead of water. V: Proc. 25<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, 233-238.
- CAVNESS, C. 2011: Petroleum industry overlaps with enhanced geothermal systems (EGS) in market opportunities and reservoir engineering methodologies. IGA News, 84: 3-4.
- CHANDRASEKHARAM, D. & BUNDSCHUH, J. 2008: Low-enthalpy geothermal resources for power generation. CRC Press, Taylor & Francis Group, 149 p.
- CLAUSER, C. 2006: Geothermal energy. V: HEINLOTH K. (ed.): Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technology, vol. 3: Energy Technologies, subvol. C Renewable Energies, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, 493-604.
- DELLOITE (Swiss assoc.) 2008: Geothermal Risk Mitigation Strategies Report. Department of Energy - Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Geothermal Program, 43 p. [http://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/geothermal\\_risk\\_mitigation.pdf](http://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/geothermal_risk_mitigation.pdf).
- DICKSON, M. H. & FANELLI, M. 1990: geothermal energy and its utilization. V: DICKSON M.H. & FANELLI M. (eds.): Small geothermal resources. A guide to development and utilization. UNITAR/UNDP Centre on small energy resources, Rome: 1-29.
- DICKSON, M. H. & FANELLI, M. 2004: What is geothermal energy? IGA, 47 p. <http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php>.
- DiPIPO, R. 1987: Geothermal power generation from liquid-dominated resources. Geotherm. Sci. & Tech., 1: 63-124.
- DiPIPO, R. 1999: Small geothermal power plants: design, performance and economics. GHC Bulletin: 8 p.
- DiPIPO, R. 2004: Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. Geothermics, 33: 565-586, doi:10.1016/j.geothermics.2003.10.003.
- DiPIPO, R. 2007: Ideal thermal efficiency for geothermal binary plants. Geothermics, 36: 276-285, doi:10.1016/j.geothermics.2007.03.002.
- DiPIPO, R. 2009: Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact, 2<sup>nd</sup> Edition. Butterworth-Heinemann: Elsevier, Oxford, England, (Second printing): 517 p.
- DJURASEK, S. & GALOVIĆ, S. 1988: Značajnije pojave ugljikovodika i pregrijane slojne vode u istražnoj bušotini Ljut-1. INA Naftaplin, Zagreb. Interno obvestilo: 3 p.
- DVORŠAK, A. 2009: Analiza možnosti uporabe geotermalne energije za proizvodnjo električne energije. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Ekonomska fakulteta, Ljubljana: 34 p.
- EDWARDS, L. M., CHILINGAR, G. V., RIEKE III, H.H. & FERTL, W.H. (eds.) 1982: Handbook of geothermal energy. Gulf Publishing Company, Houston, itd., 613 p.
- EPRI, 1978: Geothermal energy prospects for the next 50 years. Special report ER-611-SR; February 1978.
- EVANS, K.F., ZAPPONE, A., KRAFT, T., DEICHMANN, N. & MOIA, F. 2012: A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geother-

- mal and CO<sub>2</sub> reservoirs in Europe. *Geothermics*, 41: 1-29, doi:10.1016/j.geothermics.2011.08.002.
- FODOR, L., UHRIN, A., PALOTÁS, K., SELMECZI, I., NÁDOR, A., TÓTH-MAKK, A., SCHAREK, P., RIŽNAR, I. & TRAJANOVA, M. 2011: Geološki konceptualni model v okviru projekta T-JAM. GeoZS-MAFI, Ljubljana - Budimpešta: 55 p. <http://www.t-jam.eu/rezultati-projekta/>
- FRANCO, A. & VILLANI, M. 2009: Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields. *Geothermics*, 38: 379-391, doi:10.1016/j.geothermics.2009.08.001.
- GARNISH, J., 2002: European activities in Hot Dry Rock research. V: *Open meeting on Enhanced Geothermal Systems*, U.S. Department of Energy, Reno/NV, 8-9.
- GARNISH, J. 2011: Editors' response to Petroleum industry overlaps with enhanced geothermal systems (EGS) in market opportunities and reservoir engineering methodologies. *IGA News*, 84: 4-5.
- GENTER, A., FRITSCH, D. & CUENOT, N. 2008: The Soultz EGS power plant: from the concept to power production. *IGA News*, 71: 4-7.
- GÉRARD, A. & BAUMGÄRTNER, J. 2004: Technology Focus – Geothermal, Hot Dry Rock. *Renewable Energy Newsletter*, 1, renews - 10.
- GÉRARD, A., GENTER, A., KOHL, T., LUTZ, P., ROSE, P. & RUMMEL, F. 2006: The deep EGS (Enhanced Geothermal System) project at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France). *Geothermics*, 35: 473-483. doi:10.1016/j.geothermics.2006.12.001.
- GOLDBRUNNER, J. 2005: State, possible future developments in and barriers to the exploration and exploitation of geothermal energy in Austria – country update. V: HORNE R. & OKANDAN E. (eds.), *Proc. World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey: 11 p.
- GOLDBRUNNER, J. 2010: Austria – country update. V: HORNE R. (ed.): *Proc. World Geothermal Congress 2010*, Nusa Dua, Bali, Indonesia. *IGA*: 14 p.
- GOLDSTEIN, B.A., HILL, A.J., LONG, A., BUDD, A.R., AYLING, B. & MALAVAZOS, M. 2009: Hot rocks down under – evolution of a new energy industry. *Geothermal Resources Council Transactions*, 33: 185-198.
- GOSAR, A. 2005: Geophysical and structural characteristics of the pre - Tertiary basement of the Mura Depression (SW Pannonian Basin, NE Slovenia). *Geologica Carpathica*, 56: 103-112.
- GOSAR, A. & RAVNIK, D. 2007: Uporabna geofizika. Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Ljubljana: 218 p.
- GOSNOLD, W. D. 2008: Heat flow in young oceanic crust: Is Earth's heat flux 44 TW or 31 TW? - T-21A Thermotectonic models of the Oceanic lithosphere and the problem of hydrothermal circulation: A New Look. 2008 Joint Assembly, Ft. Lauderdale, Florida, PP pres.
- GREEN ROCK ENERGY, 2007: Annual report. [www.greenrock.com.au](http://www.greenrock.com.au). Podobno tudi: <http://www.ebrdrenewables.com/sites/renew/Lists/EBRD%20Master%20Spreadsheet/DispForm.aspx?ID=551>.
- GROBOVŠEK, B. 2005: Izkoriščanje geotermalne energije v Sloveniji za proizvodnjo električne energije. *EGES 4/2005*, Obnovljivi viri energije, Ljubljana, 88-92.
- GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L.C.A. 2011: Global and regional geothermal potentials. *IGA News*, 85: 9-12.
- HAENEL, R. & STAROSTE, E. (eds.) 1988: Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland. Commission of the EC, Directorate-General for Science, Research and Development, Geothermal Energy Research, Publ.No. EUR 11026, Brussels-Luxembourg: 74 p.
- HAENEL, R., RYBACH, L. & STEGENA, L. 1988: Fundamentals of geothermics. In: HAENEL, R., et al. (eds.): *Handbook of terrestrial heat-flow density determination*. Kluwer Academic publ., Dordrecht, Netherlands, 9-57.
- HÄRING, M. O., SCHANZ, U., LADNER, F. & DYER, B. C. 2008: Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, 37: 469-495. doi:10.1016/j.geothermics.2008.06.002.
- HOCHSTEIN, M. P. 1990: Classification and assessment of geothermal resources, V: DICKSON M. H., FANELLI, M. (eds.): *Small geothermal resources*. UNITAR/UNDP Centre for small energy resources, Rome, Italy, 31-59.
- HOPKIRK, R. 2009: Basel EGS Project cleared of »deliberate damage«. *IGA News*, 78: 3.
- HUNDRIĆ, V. 1988: DST izvještaj. Ljutomer-1, DST-4. INA Naftaplin, Zagreb.
- INA NAFTAPLIN, 1976: EK meritve, Motvarjevci-1 (Mot-1). INA Naftaplin, Zagreb.
- JELEN, B. 2009: Structural map of the Tertiary basement and Provisional map of the Tertiary basement relief and interpreted faults for T-JAM Project. Geological Survey of Slovenia, Ljubljana.
- JELEN, B. & RIFELJ, H. 2011: Površinska litostratigrafska in tektonska strukturna karta območja T-JAM projekta, severovzhodna Slovenija, 1 : 100.000. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- JELEN, B., RIFELJ, H., BAVEC, M. & RAJVER, D. 2006: Opredelitev dosedanega konceptualnega geološkega modela »Murske depresije«. Geološki zavod Slovenije, GeoZS arh. št. R-II-30d-1/115, poročilo, 28 str., 22 slik (kot priloge).
- KALINA, A. 2005: New thermodynamic cycles and power systems for geothermal applications. *Geothermische Energie*, Special edition, 46, 12, 2/4, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 10-13.
- KAYAD MOUSSA, A. 2011: THM Modelling of a 3 Year Long Hydraulic Test at the Rosemanowes EGS Site, UK. In: 1<sup>st</sup> Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition. Technologies for Sustainable Use of the Deep Sub-surface, EAGE, Valencia, Spain, SP16, 4 p.
- KESTIN, J. 1980: Available work in geothermal energy. In: KESTIN et al. (eds.), *Source book on the production of electricity from geothermal*

- energy. US Government Printing Office, Washington, DC, 227-275.
- KRALJ, P. 1999: Načini izrabe termalnih voda – proizvodnja električne energije. EGES, 4/99, 108-110.
- KRALJ, P. 2008: Geotermalna energija – eden velikih slovenskih energetskega virov. Delo FT, 115 (1. september 2008), 11.
- KRALJ, P., KOZARSKI, A. & MLINARIČ, J. 1994: Geothermal pilot project Ljutomer. Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Expert Meeting Power Engineering. Thematic complex: Energy conservation, Fak. tehnoloških znanosti, Maribor, 177-185.
- KRALJ, P. & KRALJ, P. 1998: Poročilo za leto 1998. Geotermalna energija. Možnosti zajema termalne vode v Benediktu. II faza. GZL, Ljubljana.
- KRALJ, P., EICHINGER, L. & KRALJ, P. 2009a: The Benedikt hydrothermal system (north-eastern Slovenia). *Environmental Geology*, 58/8: 1653-1661, doi:10.1007/s00254-008-1631-3.
- KRALJ, P., RYCHAGOV, S. & KRALJ, P. 2009b: Changes in geothermal reservoir induced by exploitation: case studies from North-East Slovenia and South Kamchatka. In: ŠAJN, R. et al. (eds.): Proceedings of the Applied Environmental Geochemistry. Anthropogenic impact on the human environment in the SE Europe, Geological survey of Slovenia, 71-76.
- KUJBUS, A. 2005: Complex approach of establishing a geothermal power plant in Hungary. In: HORNE R. & OKANDAN E. (eds.): Proc. World Geothermal Congress 2005, Antalya, IGA: 4 p.
- KUJBUS, A. 2010: Problems and solution in realizing geothermal projects in Hungary. - GEO-FAR workshop, 15 Dec. 2010, GeoEx, PP pres.
- LAPANJE, A. 2006: Izvor in kemijska sestava termalnih in termomineralnih vod v Sloveniji. *Geologija*, 49/2: 347-370, doi:10.5474/geologija.2006.025.
- LAPANJE, A. 2007: Nekaj pojasnil k pripombam dr. Polone Kralj na članek „Izvor in kemijska sestava termalnih in termomineralnih vod v Sloveniji“, (*Geologija* 49/2, 2006). *Geologija*, 50/1: 215-220.
- LAPANJE, A. & RMAN, N. 2009: Termalna in termomineralna voda. V: PLENIČAR, M. et al. (eds.): *Geologija Slovenije*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, 553-560.
- LAPANJE, A., RAJVER, D., SZÉKELY, E., KUMELJ, Š., PRESTOR, J., MOZETIČ, S., JUHÁSZ, I., BÁNYAI, P., TÓTH, L. & HAMZA, I. 2010: Priročnik o uporabi geotermalnih toplotnih črpalk v okviru projekta T-JAM. GeoZS - MAFI, Ljubljana - Budimpešta, 45 str. <http://www.t-jam.eu/rezultati-projekta/>
- LAWLESS, J. 2007: Discussion paper on guidelines for geothermal reserves definition. Australian geothermal energy group, SKM: 112 p.
- LEE, K.C. 2001: Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30/ 431-442.
- MAJER, E. L., BARIA, R., STARK, M., OATES, S., BOMMER, J., SMITH, B. & ASANUMA, H. 2007: Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics*, 36/ 185-222, doi:10.1016/j.geothermics.2007.03.003.
- MARINKO, M. 1988: Predlog raziskav geotermalne energije v podlagi terciarja pri Lendavi. Interno poročilo, GZL IGGG Ljubljana: 4 p.
- MAROS, G., MAIGUT, V., BARCZIKAYNÉ SZEILER, R., FODOR, L., GYALOG, L., KERCSMÁR, Z., MAGYARI, Á., OROSZ, L., PALOTÁS, K., SELMECZI, I., UHRIN, A., VIKOR, Z., ATZENHOFER, B., BERKA, R., BOTTIG, M., BRÜSTLE A., HÖRFARTER, C., SCHUBERT, G., WEILBOLD, J., BARÁTH, I., FORDINÁL, K., KRONOME, B., MAGLAY, J., NAGY, A., JELEN, B., RIFELJ, H., RIŽNAR, I. & TRAJANOVA, M., 2012: Pre-Cenozoic model horizon grid for Supra-Regional Area, 1 : 500.000. Project TRANSENERGY.
- McKENNA, J., BLACKWELL, D., MOYES, C. & PATTERSON, P.D. 2005: Geothermal electric power supply possible from Gulf Coast, Midcontinent oil field waters. *Oil and Gas Journal*, 103/33: 34-40.
- MEDVED, S. & NOVAK, P. 2000: Varstvo okolja in obnove viri energije. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana: 231 p.
- MUFFLER, L. J. P. & CATALDI, R. 1978: Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7/ 53-89.
- ORMAT, 1989: Production of electrical energy from low enthalpy geothermal resources by binary power plants. Series of technical guides on the use of geothermal energy. UNITAR/UNDP centre on small energy resources, Rome: 104 p.
- PETTY, S. & LIVESAY, B. 2008: Engineering geothermal systems in oil and gas reservoirs. Black Mountain Technology, PP pres. [http://smu.edu/geothermal/Oil&Gas/2007/Petty\\_Susan%20Engineering%20Geothermal%20Systems%20in%20Reservoirs.pdf](http://smu.edu/geothermal/Oil&Gas/2007/Petty_Susan%20Engineering%20Geothermal%20Systems%20in%20Reservoirs.pdf)
- PLACE, J., LE GARZIC, E., GÉRAUD, Y., DIRAISON, M. & SAUSSE, J. 2011: Spacial distribution of fluid flow paths in fractured granites - Application to EGS. V: 1<sup>st</sup> Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition - Technologies for Sustainable Use of the Deep Sub-surface, EAGE, Valencia, Spain, C18, 6 p.
- POLLACK, H. N., HURTER, S. J. & JOHNSON, J. R. 1993: Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*, 31: 267-280.
- PORTIER, S., VUATAZ, F.-D., NAMI, P., SANJUAN, B. & GÉRARD, A. 2009: Chemical stimulation techniques for geothermal wells: experiments on the three-well EGS system at Soultz-sous-Forêts, France. *Geothermics*, 38/4: 349-359, doi:10.1016/j.geothermics.2009.07.001.
- PRUESS, K. 2006: Enhanced geothermal systems (EGS) using CO<sub>2</sub> as working fluid – A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon. *Geothermics*, 35/4: 351-367, doi:10.1016/j.geothermics.2006.08.002.
- RAJVER, D. & RAVNIK, D. 2002: Geotermalna slika Slovenije – razširjena baza podatkov in izboljšane geotermalne karte. *Geologija*, 45/2: 519-524, doi:10.5474/geologija.2002.058.
- RAJVER, D., RAVNIK, D., PREMUR, U., MIOČ, P. & KRALJ, P. 2002: Slovenia. V: HURTER S. & HAE-NEL R. (eds.): Atlas of Geothermal Resources in



- Europe. European Commission, Research Directorate-General, Publ. No.17811, Luxembourg: 92 p., 89 plates.
- RAJVER, D., RMAN, N. & LAPANJE, A. 2008: Existing geothermal resources and possibilities for discovery of new geothermal resources in Slovenia. V: Petroleum engineering summer school, Interactive Seminar – Workshop 26: Geothermal fields Development, Dubrovnik.
- RAVNIK, D. 1989: Možnosti konverzije srednje in visokoentalpijske geotermalne energije v električno na območju Slovenije. Interno poročilo, GZL IGGG, 10 p.
- RAVNIK, D. 1991: Geotermične raziskave v Sloveniji. *Geologija*, 34: 265-303.
- RENPU, W. 2011: Chapter 11 – Oil and Gas Well Corrosion and Corrosion Prevention. V: *Advanced Well Completion Engineering (Third Edition)*. Elsevier Inc, 617-700.
- RENZ, M. & FILIPOVIĆ, A. 2005: Geothermal power plant with Kalina cycle. *Geothermische Energie*, Special edition, 46, 12, 2/4, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 21-23.
- RMAN, N., LAPANJE, A. & RAJVER, D. 2009: Geotermalna energija kot »obnovljiv« in »trajnosten« vir energije. V: VOLFAND J. (ed.): *Obnovljivi viri energije (OVE) v Sloveniji*. Fit media, Celje, 95-101.
- RMAN, N. 2011: Database of users and database of current and potential utilization parameters. Poročilo projekta TRANSENERGY, GeoZS – MAFI – GBA – ŠGUDŠ, 36 str. <http://transenergy-eu.geologie.ac.at/index-Dateien/Page1620.html>
- RMAN, N. & SZŐCS, T. 2011: Hidrogeokemični konceptualni model v okviru projekta T-JAM. *GeoZS - MAFI*, Ljubljana – Budimpešta: 37 p. <http://www.t-jam.eu/rezultati-projekta/>
- RMAN, N., LAPANJE, A. & PRESTOR, J. 2011a: Water Concession Principles for Geothermal Aquifers in the Mura-Zala Basin, NE Slovenia. *Water Resources Management*, 25/13: 3277-3299.
- RMAN, N., TÓTH, G., MURÁTI, J., LAPANJE, A. & FUKS, T. 2011b: Hidrogeološki konceptualni model v okviru projekta T-JAM. *GeoZS - MAFI*, Ljubljana – Budimpešta, 21 p. <http://www.t-jam.eu/rezultati-projekta/>
- ROBERTS, V. W. (ed.) 1978: Geothermal energy prospects for the next 50 years. Feb., EPRI-611-SR, 5-5.
- ROWLEY, J. C. 1982: Worldwide geothermal resources. V: EDWARDS L. M., CHILINGAR G.V., RIEKE III H.H., FERTL W.H. (eds.): *Handbook of geothermal energy*. Gulf Publishing, Houston, TX, USA, 44-176.
- RUNJIĆ, S. 1985: DST izvještaj, DST-1,-2,-3 & DST-4,-5. Murski gozd-6 (Mg-6), INA Naftaplín, Zagreb.
- RYBACH, L. 2010: »The future of geothermal energy« and its challenges. V: HORNE R. (ed.): *Proc. World Geothermal Congress 2010*, Nusa Dua, Bali, Indonesia. IGA, 4 p.
- SADNIKAR, J. 1993: Raziskave za podzemno skladiščenje plina v Sloveniji. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 40/1-2: 149-167.
- SANYAL, S. K. 2005: Cost of geothermal power and factors that affect it. V: HORNE R. & OKANDAN E. (eds.): *Proc. World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 10 p.
- SANYAL, S. K. 2009: Cost of Electric Power from Enhanced Geothermal Systems - Its Sensitivity and Optimization. *GRC Transactions*, 33: 245-250.
- SANYAL, S. K. 2010: On minimizing the levelized cost of electric power from enhanced geothermal systems. V: HORNE R. (ed.): *Proc. World Geothermal Congress 2010*, Nusa Dua, Bali, Indonesia. IGA, 4 p.
- SANYAL, S. K. & BUTLER, S. J. 2010: Geothermal power capacity from petroleum wells – some case histories of assessment. V: HORNE R. (ed.): *Proc. World Geothermal Congress 2010*, Nusa Dua, Bali, Indonesia. IGA, 10 p.
- SANYAL, S.K., MORROW, J.W., BUTLER, S.J. & ROBERTSON-TAIT, A. 2007: Cost of electricity from enhanced geothermal systems. *Proc. 32<sup>nd</sup> workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford Univ., California, 11 p.
- SHELLSCHMIDT, R., SANNER, B., PESTER, S. & SCHULZ, R. 2010: Geothermal energy use in Germany. V: HORNE R. (ed.): *Proc. World Geothermal Congress 2010*, Nusa Dua, Bali, Indonesia. IGA, 19 p.
- STEFANSSON, V. 2005: World geothermal assessment. V: HORNE R. & OKANDAN E. (eds.): *Proc. World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 6 p.
- TESTER, J. W. 1982: Energy conversion and economic issues for geothermal energy. V: EDWARDS L. M., CHILINGAR G. V., RIEKE III H. H., FERTL W. H. (eds.): *Handbook of geothermal energy*. Gulf Publishing Company, Houston, 471-586.
- TESTER, J. W., MORRIS, G. E., CUMMINGS, R. G. & BIVINS, R. L. 1979: Electricity from Hot Dry Rock geothermal energy: Technical and economic issues. LA-7603-MS Informal report, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California: 24 p.
- TESTER, J. W., DRAKE, E. M., GOLAY, M. W., DRISCOLL, M. J. & PETERS, W. A. 2005: Sustainable energy – Choosing among options. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 850 p.
- TESTER, J. W., ANDERSON, B. J., BATCHELOR, A. S., BLACKWELL, D. D., DIPIPPO, R., DRAKE, E. M., GARNISH, J., LIVESAY, B., MOORE, M. C., NICHOLS, K., PETTY, S., TOKSÖZ, M. N., VEATCH JR., R. W., BARIA, R., AUGUSTINE, C., MURPHY, E., NEGRARU, P. & RICHARDS, M. 2006: The future of geothermal energy: Impact of Enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21<sup>st</sup> century. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA. <http://geothermal.inel.gov>; [http://www1.eere.energy.gov/geothermal/egs\\_technology.html](http://www1.eere.energy.gov/geothermal/egs_technology.html).
- TÓTH, G., MURÁTI, J., RMAN, N., KRIVIC, J. & BIZJAK, M. 2011a: Matematični model toka podzemne vode v okviru projekta T-JAM. *GeoZS- MAFI*, Ljubljana – Budimpešta, 35 p. <http://www.t-jam.eu/rezultati-projekta/>
- TÓTH, G., MURÁTI, J., RAJVER, D., LAPANJE, A. & NÁDOR, A. 2011b: Geotermični konceptualni model

- v okviru projekta T-JAM. GeoZS - MAFI, Ljubljana - Budimpešta, 39 p., <http://www.t-jam.eu/rezultati-projekta/>
- TUMA, M. & SEKAVČNIK, M. 2004: Energetski sistemi, Preskrba z električno energijo in toploto, 3. izpopolnjena in predelana izdaja. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana: 290 p.
- UNGEMACH, P. & ANTICS, M. 2010: The road ahead toward sustainable geothermal development in Europe. In: HORNE R. (ed.): Proc. World Geothermal Congress 2010, Nusa Dua, Bali, IGA: 17 p.
- VORŠIČ, J., KRANJC, V., JAKL, A., KROPE, J., KORITNIK, J., KRALJ, P. & DREV, J. 1995: New tracks for the power supply of residential areas. World Energy Council 16<sup>th</sup> Congress, Div. 2 Future sustainable energy supply, PS/SRD 2.4 Social aspects of energy supply, Tokyo, 29-48.
- WEA, 2004: World Energy Assessment: overview 2004 Update. UNDP, UN-DESA in Svetovni energetski koncil (WEC), New York: 85 p.
- ZIMMERMANN, G. H., BLÖCHER, M. G., MOECK, I., REGENSPURG, S., SAADAT, A. & HUENGES, E. 2011: Concepts for rock specific hydraulic fracturing and matrix acidizing for enhanced geothermal systems. In: 1<sup>st</sup> Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition. Technologies for Sustainable Use of the Deep Sub-surface, EAGE, Valencia, D23, 5 p.
- ŽLEBNIK, L. 1979: Letno poročilo; Karta termalnih in mineralnih vod Slovenije v merilu 1 : 200.000 (III. faza). GZL, Ljubljana.
- Internetni viri (dostopni 1. 6. 2012):
- Internet 1: [http://www.mg.gov.si/fileadmin/mg.gov.si/pageuploads/Energetika/Porocila/AN\\_OVE\\_2010-2020\\_final.pdf](http://www.mg.gov.si/fileadmin/mg.gov.si/pageuploads/Energetika/Porocila/AN_OVE_2010-2020_final.pdf)
- Internet 2: [http://www.mzip.gov.si/si/delovna\\_podrocja/energetika/zakonodaja/energetika\\_pomembni\\_dokumenti/nacionalni\\_energetski\\_program\\_za\\_obdobje\\_doleta\\_2030/](http://www.mzip.gov.si/si/delovna_podrocja/energetika/zakonodaja/energetika_pomembni_dokumenti/nacionalni_energetski_program_za_obdobje_doleta_2030/)
- Internet 3: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=proppant>
- Internet 4: <http://www.ove.si/index.php?P=12>
- Internet 5: <http://geothermal.marin.org/GEOpresentation/>
- Internet 6: <http://www.sensorsmag.com/specialty-markets/utilities/distributed-temperature-sensing-dts-geothermal-energy-applic-5866> (Geothermal Energy Association, The State of Geothermal Energy, Part II: Surface Technology)
- Internet 7: <http://www.geothermal-energy.org/files-12.html>
- Internet 8: <http://www.geysers.com/>

# Uporaba različnih preiskovalnih metod tal za forenzični namen

## Use of different investigation methods of soil for forensic purpose

Kristina ŠTIBELJ

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, 1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: kristina.stibelj@geo-zs.si

Prejeto / Received 24. 11. 2011; Sprejeto / Accepted 6. 2. 2012

*Ključne besede:* forenzična geologija, tla, barva, gostota, mineralna sestava  
*Key words:* forensic geology, soil, color, density, mineral composition

### Izvleček

Geologija, s svojim specifičnim znanjem in metodami, lahko pomaga forenzikom pri njihovih preiskavah in analizah. Na osnovi postopkov, ki jih uporabljajo v Nacionalnem forenzičnem laboratoriju pri Ministrstvu za notranje zadeve RS, smo preiskovali in med seboj primerjali 15 vzorcev tal z različnih lokacij. S primerjanjem njihove barve, gostote in mineralne sestave smo skušali ugotoviti, katera dva vzorca pripadata enaki lokaciji. Primerjali smo rezultate posameznih uporabljenih metod preiskav in ocenjevali, katera nam poda najboljše ujemanje med vzorci ter ujemanje mineralne sestave vzorcev tal z njihovo kamninsko podlago. Najboljše ujemanje vzorcev vzeti z enake lokacije smo dobili z metodo rentgenske praškovne difrakcijske analize. Pri merjenju gostote so vrednosti variirale v odvisnosti od mesta odvzema primerjalnega in spornega vzorca. Njena sprememba je bila opazna že na razdalji manj kot en meter. Za forenziko je bistvenega pomena točna lokacija odvzema vzorcev. Bližina odvzema vzorcev ima velik vpliv na gostoto, saj pri večjih razdaljah ne dobimo primerljivih rezultatov, na zelo kratke razdalje pa lahko prikaže visoko ujemanje. Z uporabo rentgenske difrakcijske analize pa dobimo primerljive rezultate še na oddaljenosti več metrov, kar pa v forenziki ne predstavlja sprejemljivih rezultatov za določanje istovetnosti lokacije.

### Abstract

With its specific background and methods, geology may help forensic scientists considerably when doing researches and analyses. Based on the procedures used in the National Forensic Laboratory, we have been researching and comparing 15 soil samples from different locations. We divided them into 3 groups, of which each comprised one pair of samples of the same location. By comparing colour, density and mineral composition in the soil samples, we tried to determine which two samples originated from the same location. We were comparing the results of individually used research methods and tried to evaluate which provide the best sample matches. Furthermore, we were comparing how the mineral composition of the samples and their bedrock match. The best match was achieved by applying the method of X-ray powder diffraction, which clearly showed identical samples collected from the same location. When measuring density, the values varied according to the location site, from which the comparative and conflicting samples were taken. The change of density was observed in the distance of less than one meter. For the field of forensic science the exact location of sample collection is of crucial importance. The proximity of sample collecting has considerable impact on density, as longer distances do not provide comparative results, whereas a short distance may present us with highly matching samples, the method which is widely considered applicable in forensic science. By applying the method of X-ray powder it is possible to acquire comparative results at the distance of several meters; in forensic science, however, this does not provide acceptable results for defining the identity of the location.

### Uvod

Forenzična geologija je veda, ki uporablja geološko znanje in metode pri forenzičnih analizah, ki so povezane z nekim kriminalnim dejanjem. Združuje geološke metode, ki vključujejo analize delcev (sejanje, tehtanje, velikost, oblika), mineraloške analize (petrografske preiskave, rentgenska difrakcijska analiza), kemične in geokemične analize (uporaba elektronskega mikroskopa, emisijska spektroskopija, rentgen-

ska fluorescenca) (MURRAY & TEDROW, 1992). Forenzika, oziroma kriminalistična tehnika je del kriminalistike, ki preiskuje sledi v kakršnikoli zvezi s kaznivim dejanjem in skuša iz njih narediti kriminalistično tehnični dokaz (GOLJA, 1997). Zelo dobro je razvita v državah Severne Amerike, kjer imajo za vsak tip preiskave svoje strokovnjake. V ostalih državah sveta je ta smer ponekod prav tako zelo dobro vpeljana v kriminalistična preiskovanja, drugod pa ne. Slednje velja tudi za Slovenijo. Pri tem je potrebno upoštevati, da



je zahteva po takih raziskavah v Sloveniji manjša. Razlog je v samem številu prebivalstva in posledično v manjšem številu kriminalnih dejanj, kjer bi bila potrebna prisotnost geologa. Ta dela opravijo strokovnjaki drugih področij, kot so fiziki in kemiki.

Uporabo geologije v forenziki, kot opisujeta MURRAY in TEDROW (1992), je v svojih knjigah preko glavnega junaka Sherlocka Holmesa prvi podal Arthur Conan Doyle. Njegova domneva je bila, da so vsaka tla specifična za določeno manjše območje na Zemljinem površju. Zato ljudje, ki so v stiku s tlemi, lahko delce tal namerno ali nenaumno pustijo na svojih osebnih predmetih. Njegove ideje niso bile v praksi do takrat še nikoli uporabljene. Prvi, ki je začel vključevati geologijo v preiskovanje kriminala, je bil avstrijski preiskovalec Hans Gross (1847–1915). Razmišljal je, da je iz umazanije na čevlju lažje ugotoviti, kje povsod je človek hodil, kot pa iz utrudljivih izpraševanj, kjer se pogosto ne dobi potrebnih informacij. Prvi primer umora, pri katerem so kot dokazno gradivo uporabili mikroskop za preiskavo mineralov v tleh, je rešil nemški forenzik Georg Popp leta 1904 na podlagi mikroskopskega prepoznavanja mineralov tal.

Danes preučevanje in analiziranje tal poteka rutinsko že v vseh kriminalističnih laboratorijih po svetu, v nekaterih z uporabo več različnih metod, v drugih pa z uporabo le ene. V Nacionalnem forenzičnem laboratoriju v Sloveniji analizirajo vzorce tal s primerjanjem barve in merjenjem gostote. V Združenih državah Amerike so tla del rutinskega preiskovanja (MURRAY & TEDROW, 1992). Osnovne podatke za posamezna območja zbirajo že vnaprej. Izdelujejo posebne karte s tolmači, na katerih je za različne vrste tal podana barva, struktura, mineralna sestava, kemične lastnosti, organska sestava ipd. Prikazane so tudi razlike v sestavi tal v odvisnosti od globine. Tako nek sporni vzorec lažje in hitreje umestijo na določeno lokacijo.

Forenzična geologija še vedno spreminja področje delovanja (MURRAY, 2005). Običajni način preiskovanj vključuje identifikacijo materialov, ki so ključni za določen primer. Tako je na primer preiskovanje pigmentov na pobarvani sliki ali materialov na kipu, mineralna sestava določenega materiala (dragi kamni), ko je njihova originalnost sporna. Kot pri drugih področjih je tudi v forenzični geologiji pomembna uporaba lastnega znanja in izkušenj, zaradi česar geologi opazimo specifične stvari, katerim drugi strokovnjaki ne posvečajo pozornosti.

Pri forenzičnih preiskavah tal in drugih materialov smo soočeni z dvema različnima tipoma vzorcev: *primerjalnimi*, ki jih odvzame preiskovalec na samem kraju kriminalnega dejanja, oziroma nesreče in *kontrolnimi*, oziroma *spornimi* vzorci. Ti so odvzeti za primerjavo z vzorci, povezanimi s kriminalom, oziroma nesrečo (MURRAY & TEDROW, 1992).

Geološke metode, ki se uporabljajo pri forenzičnih preiskavah, vključujejo raziskave barve tal in sedimentov, gostote delcev, porazdelitev del-

cev po velikosti ter njihovo štetje glede na maso in velikost v vzorcu, uporabo polarizacijskega mikroskopa (pregledovanje vlaken, kovin, barv, stekla, plastike v vzorcu, določevanje optičnih lastnosti kamnin in mineralov, težkih mineralov), elektronskega mikroskopa (natančen pregled las, barv, vlaken, primerjava mineralov, morfologija vzorca), rentgenska difrakcijska analiza (mineralna sestava tal in drugih kristaliničnih snovi), različne termične analize (primerjava keramičnih materialov, tal, gum), metoda z meritvijo lomnega količnika (primerjava stekla) in analize z drugimi inštrumentalnimi metodami (emisijska spektrometrija, rentgenska fluorescenca, atomska absorpcijska spektrometrija in druge) (MURRAY & TEDROW, 1992).

V delu smo želeli na praktičnem primeru prikazati enega izmed načinov uporabe geologije v forenziki. Z uporabo različnih metod smo preiskali petnajst vzorcev tal z dvanajstih različnih lokacij. Zaradi izvajanja meritev smo vzorce razdelili v tri skupine po pet in jih tako obravnavali v celotnem postopku. V vsaki skupini je bil prvi vzorec primerjalni, ostali pa kontrolni, oziroma sporni. Eden izmed kontrolnih vzorcev v vsaki skupini je bil odvzet z enake lokacije kot primerjalni. Cilj raziskave je bil, da bi z uporabo različnih preiskovalnih metod v vsaki skupini določili par vzorcev odvzetih z enake lokacije. Želeli smo ugotoviti, kateri od kontrolnih vzorcev ima isti izvor kot primerjalni ter določiti zanesljivost posamezne metode. Poleg samega primerjanja vzorcev glede na dokazno vrednost v forenzičnih preiskavah, nas je zanimala še njihova medsebojna primerljivost, odvisnost mineralne sestave tal od kamninske podlage ter spreminjanje gostote tal glede na njihove različne medsebojne razdalje.

Vzorce tal smo odvzeli na dvanajstih različnih lokacijah in sicer na območju Selške doline, Sorškega polja, v okolici Radovljice, na Krimu in v Fiesi (tabela 1). Namen te raznolikosti je bil predvsem v ugotavljanju enakosti ali različnosti mineralne sestave vzorcev tal glede na njihovo kamninsko podlago in morebitno povezanost z različno starostjo kamninske podlage. Vzorca 1 in 2, vzeta z enake lokacije, ležita na podlagi, ki jo predstavlja skrjavni glinavec permske starosti. Z enake lokacije sta tudi vzorca 6 in 9, katerima podlago predstavlja anizijski dolomit (RAMOVŠ, 2004) ter vzorca 11 in 13, katerih kamninska podlaga je jurski apnenec (BUSER, 1970). Vzorca 4, 8 in 12 so odvzeti na različnih lokacijah, vendar starostno enakih, pleistocenskih kamninskih podlagah. Vzorec 4 smo odvzeli na prodnatih sedimentih (BUSER, 1976), vzorec 8 na konglomeratnih zasipih in vzorec 12 na prodnih zasipih (BUSER, 1980). Kamninska podlaga vzorcu 3 je permski apnenec, vzorcu 5 oligocenski konglomerat, vzorcu 7 permski peščenjak (RAMOVŠ, 2004), vzorcu 10 eocenski fliš (PLENIČAR, 1973), vzorcu 14 ladinjski keratofir in vzorcu 15 kredni skrjavni glinavec (RAMOVŠ, 2004).

## Vzorčenje in metode

Pravilen način odvzema vzorcev je prvi pogoj za točnost končnih rezultatov analiz. Kriminalistični tehniki na kraju kaznivega dejanja zberejo več vzorcev tal, ki jih potem kriminalistični strokovnjaki oziroma izvedenci v laboratoriju primerjajo z vzorci, odvzetimi z osumljenčevih osebnih predmetov. Glede na vrsto kaznivega dejanja se na temu primeren način odvzamejo vzorci. Za neko kaznivo dejanje, ki ima stik le s površino tal, se vzorec odvzame s površine. Če je na kraju ugotovljen globlji poseg v tla, se tudi vzorci za preiskave odvzamejo globlje v tleh. S tem se zmanjša možnost za napake pri primerjanju in pri sami točnosti in zanesljivosti končnih rezultatov.

V raziskavi smo vzorce odvzeli s površine tal. Vzorcev nismo definirali pod »isto« lokacijo, saj smo jih odvzeli na medsebojni oddaljenosti 5–7 metrov. Pri tem smo že posegli v prostor, ki v kriminalističnem pogledu ne predstavlja več iste lokacije. Zato jih obravnavamo kot vzorce enake lokacije, saj je v kriminalistiki mesto kaznivega dejanja samo eno. Vse ostalo je okolica, ki je ne obravnavajo kot eno in se kot eno tudi ne sme obravnavati.

Obstaja več načinov in možnosti preučevanja mineralov, kamnin, tal in drugih materialov. Namen primerjalnih metod je, da s primerjanjem vzorcev ugotovimo stopnjo ujemanja in možnost

poistovetenja vzorcev z istim virom. Posledično se lahko potrdi ali zavrne vpletenost osumljenca za določeno kaznivo dejanje. Metode se med seboj razlikujejo, tako se glede na forenzični namen, razlikuje tudi njihova dokazna vrednost.

V nalogi smo za preiskovanje tal uporabili tri različne metode: metoda določanja barve in gostote ter določanje mineralne sestave z uporabo praškovne rentgenske difrakcijske analize.

### Barva tal

Barva tal je ena najpomembnejših optičnih identifikacijskih lastnosti tal v forenziki. Predstavlja prvi korak pri sami primerjavi vzorcev. Na podlagi le-te lahko pripravimo vzorec za nadaljnje analize ali pa ga izločimo iz preiskave. Barvo določajo z barvnim atlasom Munsell soil color chart, ki temelji na barvah: R (rdeča), Y (rumena) ter YR (rumeno-rdeča) in na faktorjih: tonu (ang. hue), svetlosti (ang. value) in čistosti (ang. chroma) spektralne barve. Upošteva se še faktor vlažnosti (m-vlažen, d-suh). Tla so zmes mineralov, oksidov, organskih snovi, mikroorganizmov in drugih snovi, ki so se vanje vključila med njihovim nastajanjem. Zato se barva tal lahko spremeni na zelo majhne razdalje. Za njeno določitev je potrebno te snovi z različnimi postopki odstraniti iz vzorcev tal. Po sušenju na sobni temperaturi in sejanju na velikost pod 2 mm sledi odstranjevanje organskih snovi, odstranjevanje oksidnih prevlek,

	Št. vzorca Nu. of sample	Kamninska podlaga Bedrock	Starost Age	Kraj Location
I. skupina vzorcev I. group of samples	1	skrilavi glinavec Clayshale	spodnji perm Lower Permian	Stirpnik
	2	skrilavi glinavec Clayshale	spodnji perm Lower Permian	Stirpnik
	3	apnec Limestone	zgornji perm Upper Permian	Golica
	4	prodnati sedimenti Gravelly sediments	pleistocen Pleistocene	Lesce
	5	konglomerat Conglomerate	srednji oligocen Middle Oligocene	Škofja Loka
II. skupina vzorcev II. group of samples	6	dolomit Dolomite	anizij Anisian	Rovte
	7	peščenjak Sandstone	srednji perm Middle Permian	Mlaka
	8	konglomeratni zasip Conglomerate fill	pleistocen Pleistocene	Hrastnik
	9	dolomit Dolomite	anizij Anisian	Rovte
	10	fliš Flysch	eocen Eocene	Fiesa
III. skupina vzorcev III. group of samples	11	apnec Limestone	jura Jurassic	Krim
	12	prodni zasip Gravel fill	pleistocen Pleistocene	Reteče
	13	apnec Limestone	jura Jurassic	Krim
	14	keratofir Keratophyre	ladinij Ladinian	Selca
	15	skrilavi glinavec Clayshale	kreda Cretaceous	Zali log

Tabela 1. Pregled vzorcev glede na vrsto in starost kamninske podlage ter kraja odvzema vzorcev. Pari potemnjenih vzorcev so z enakih lokacij.

Table 1. Review of the samples, depending on the type and age of the bedrock and the place of collection of the samples. Pairs of obscured samples are from the same sites.

navlažitev vzorca in segrevanje. Vse to zahteva strokovnost, natančnost in čas (SUGITA, 1996). Dokazna vrednost barve glede na forenzični namen je nizka, saj kot taka nima velike veljave pri samem izvoru vzorca, kar je eden izmed razlogov, da je primerjava barve z barvnim atlasom v praksi manj v uporabi. Barvo večinoma določajo glede na medsebojno primerjavo vzorcev, kar smo naredili tudi v našem primeru.

### Merjenje gostote tal

Gostoto smo merili na Centru za forenzične preiskave (danes Nacionalni forenzični laboratorij). Posušene vzorce smo sejali na velikost debelozrnatega peska in zatehtali 50 mg vzorca s premerom zrn 0,8–0,060 mm. Stresli smo ga v že pripravljeno stekleno cevko s premerom 4 mm. Vsaka steklena cevka je razdeljena na 7 enakih plasti, višine 6 cm. Vanje smo predčasno vlili različne mešanice tekočin bromoforma ( $\text{CHBr}_3$ ) ter bromobenzena ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$ ). V spodnji plasti je njuna mešanica z gostoto  $2,8 \text{ g/cm}^3$ , nad njo sledi mešanica z gostoto  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , nato  $2,6 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,5 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,3 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,0 \text{ g/cm}^3$  ter na vrhu še čisti brombenzen z gostoto  $1,5 \text{ g/cm}^3$ . Vzorce smo v stekleni cevki pustili stati 24 ur, da so se delci razvrstili po gostoti.

Ker je gostota specifična na vsakem delu tal posebej, smo naknadno naredili še pet dodatnih meritev gostote, da bi ugotovili, kako se spreminja na krajše razdalje.

### Praškovna rentgenska difrakcijska analiza – RTG

Praškovna rentgenska difrakcijska analiza je ena najpomembnejših in najbolj zanesljivih metod identificiranja mineralne sestave tal (MURRAY & TEDROW, 1992). Pri tem moramo upoštevati, da je za forenziko pomembno ujemanje vzorcev istih lokacij in ne enakih, saj slednje ne predstavljajo nobene dokazne vrednosti. Posušene vzorce smo uprašili in jih dali v analizo na oddelku za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani. Potrebovali smo 200 mg homogenega vzorca. Rentgenogrami so bili posneti z rentgenskim difraktometrom PHILIPS. Snemali so v kotnem območju  $2\theta$   $2^\circ$ – $70^\circ$ , s hitrostjo  $3^\circ$   $2\theta/\text{min}$ . Pogoji snemanja so bili: 1,2 kW moči, napetost 20 kV, tok 30 mA, valovna dolžina uporabljene rentgenske svetlobe  $\text{CuK}\alpha = 1,5418 \text{ \AA}$ , sekundarni grafitni monokromator in proporcionalni števec. Mineralno sestavo vzorcev smo določili s pomočjo računalniškega programa Phillips x'Pert Organizer in ICSD baze podatkov.

## Rezultati

### Barva vzorcev

Barve primerjalnih in kontrolnih vzorcev z enakih lokacij niso bile enake. Pari vzorcev 1 in 2, 6 in 9 ter 11 in 13 so si bili barvno podobni, vendar bi bila pri določanju z barvnim atlasom le-ta različna. Vsi vzorci imajo različne odtenke rjave

barve od bolj svetlih do bolj temnih, razen vzorcev 5 in 7, ki imata različen odtenek rdečkaste barve ter vzorec 10, ki je siv. Po svetlosti odtenka od bolj svetlih do temnih odtenkov rjave barve si sledijo 3, 15 (izrazito svetlejši barvi), 12, 6, 1, 9, 14, 2, 11, 13, 4 in 8, ki ima izrazito temnejšo barvo (slika 1).



Slika 1. Pregled vzorcev tal glede na barvo.

Fig. 1. Review of soil samples, according to color.

### Gostota vzorcev

Rezultati meritev gostote prve skupine vzorcev ne prikažejo ujemanja primerjalnega (vzorec 1) in kontrolnega (vzorec 2) vzorca z enake lokacije (slika 2, tabela 2). Opazno je ujemanje njunih posameznih delcev, ki pa je premajhno, da bi lahko določili isti vir. Primerjalni vzorec ima največjo koncentracijo delcev pri  $2,7$  in  $2,8 \text{ g/cm}^3$ , ostali vzorci vsebujejo največje zgostitve delcev pri nižjih gostotah. Delno se ujema delci primerjalnega vzorca s tretjim, ki pa je z druge lokacije. Vzorca 4 in 5 imata drugačno razporeditev delcev.

V drugi skupini vzorcev je opazno majhno ujemanje gostote primerjalnega vzorca (vzorec 6) s kontrolnim enake lokacije (vzorec 9) (slika 2, tabela 2). Največjo koncentracijo delcev imata sicer na različnih mestih (vzorec 1 pri  $2,6$  in  $2,5 \text{ g/cm}^3$ , vzorec 9 pri  $2,5 \text{ g/cm}^3$ ), vendar pa se delci v cevi pojavljajo na enakih višinah. Njunu ujemanje je še vedno premajhno, da bi jima lahko pripisali isti izvor. Ostali vzorci te skupine (vzorec 7, 8 in 10) so si glede razporeditve delcev po gostoti različni in nimajo podobnosti s primerjalnim.

Slika tretje skupine vzorcev kaže podoben položaj delcev primerjalnega vzorca (vzorec 11) s kontrolnima vzorcema 13 in 14 (slika 2, tabela 2). Glavne zgostitve vzorca 11 so pri  $2,0 \text{ g/cm}^3$  in  $2,3 \text{ g/cm}^3$ , posamezni delci pa imajo gostoto  $1,5 \text{ g/cm}^3$  in  $2,5 \text{ g/cm}^3$ . V vzorcu 13 je glavna koncentracija na  $2,0$ , posamezni delci se pojavijo še na  $1,5$ ,  $2,3$  in  $2,5$ , pri vzorcu 14 pa je glavna zgostitev na  $2,0$  in  $2,3 \text{ g/cm}^3$ , ostali delci pa se pojavljajo še višje po cevi. V vzorcu 13 je opazen pas zgostitve delcev v vrhnjem delu cevi, kar je lahko varljivo in ne poda pravih rezultatov. Medsebojno podobnost razvrstitve delcev imata tudi vzorca 12 in 15, ki pa sta z različnih lokacij.





Slika 2. Izmerjene gostote tal vseh treh skupin vzorcev in dodatnih petih vzorcev.

Fig. 2. Results of density measurements of all three sample groups and additional five samples.

Tabela 2. Odčitane gostote delcev, dobljenih pri meritvah gostote tal.

Table 2. Read density of the particles, obtained from density measurements.

Št. vzorca Nu. of sample	Izmerjene gostote (g/cm <sup>3</sup> ) Measured density				
	večina delcev most of particles		posamezni delci individual particles		
1	2,7	2,8	2,6	2,5	
2	2,6	2,7	2,8	2,5	2,3
3	2,7		2,6	2,5	
4	2,3	2,5	2,6		
5	2,6		2,5	2,7	
6	2,6	2,5	2,3	2,0	
7	2,7		2,8		
8	2,0	1,5	1,5		
9	2,5		2,3	2,0	2,7 2,8
10	2,6	2,7	2,5	2,3	
11	1,5	2,0	2,3	2,5	
12	2,5		2,6	2,3	2,0
13	2,0		1,5	2,3	2,5
14	2,0	2,3	1,5		
15	2,5	2,6	2,0		

Tla sestavljajo materiali, ki lahko poleg mineralov vključujejo še organske delce, kot so delci rastlin, vrsto antropogenih ali tujih delcev, ki so preneseni in vključeni v tla. Na gostoto torej vpliva več dejavnikov, zato je potrebno določiti, kako veliko območje se definira kot isto. Razdalja med vzorci z enakih lokacij je bila prevelika, da bi dobili zanesljivo ujemanje rezultatov gostote. Zato smo po osmih mesecih naredili še pet dodatnih meritev, da bi ugotovili, kako se gostota spreminja na manjše razdalje. Vzorce smo odvzeli na medsebojni oddaljenosti petih metrov. Prvega na mestu vzorca št. 1, da bi videli morebitno spremembo gostote v odvisnosti od časa. Lokacija

vsakega naslednjega vzorca je bila en meter stran od prejšnjega. Označili smo jih z 1-A, 1-B, 1-C, 1-D in 1-E.

Rezultati so pokazali, da se gostota lahko spreminja na oddaljenosti enega metra ali manj (slika 2). Zelo visoko stopnjo ujemanja kažejo vzorci 1-B, 1-C in 1-E. Zgostitve in posamezni delci se pojavljajo na enakih višinah (2,6 g/cm<sup>3</sup>). Med njimi pa je vzorec 1-D, ki ima nekoliko drugačno razvrstitev posameznih delcev, kar velja tudi za 1-A. Gostote so se spremenile tudi po času, vendar razlike niso velike, saj se delci pri vzorcu 1 in 1-A pojavljajo pri enakih gostotah (2,8 in 2,7 g/cm<sup>3</sup>) ampak z različnimi koncentracijami. Prav tako imajo vzorci 1-B, 1-C in 1-E podobne največje zgostitve delcev kot vzorec 2 (2,6 g/cm<sup>3</sup>), ostali delci se pa pojavljajo tudi pri 2,7 in 2,5 g/cm<sup>3</sup>.

#### Primerjava rezultatov meritev barve in gostote

Vzorec 8, z najtemnejšim odtenkom rjave barve, ima izmed vseh najmanjšo gostoto. Vzorci 4, 11 in 13 imajo svetlejši odtenek rjave barve. Od teh imata vzorca 11 in 13 nizko gostoto (med 2,0 in 2,3 g/cm<sup>3</sup>), kakršno ima tudi vzorec 14, ki je nekoliko svetlejša rjave barve. Vzorca 3 in 15 sta najbolj svetla, njuna gostota je različna: vzorec 3 je z gostoto med 2,8 in 2,7 g/cm<sup>3</sup> eden izmed najgostejših (poleg vzorcev 1 in 7), vzorec 15 pa ima gostoto med 2,6 in 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Pri ostalih vzorcih (2, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 15) se delci gibljejo med 2,7 in 2,3 g/cm<sup>3</sup>. Njihove barve so si podobne, razen vzorcev 4, 5 in 10.

#### Rentgenska praškovna difrakcijska analiza – RTG mineralna sestava

Glede na minerale, določene z rentgensko difrakcijo, smo ugotovili visoko stopnjo ujemanja vzorcev enakih lokacij (tabela 3).

Tabela 3. Minerali, ki gradijo tla ter kamninsko podlago, določeni z rentgensko praškovno difrakcijsko analizo.

Table 3. Minerals of soil and bedrock, determined by X-ray powder diffraction.

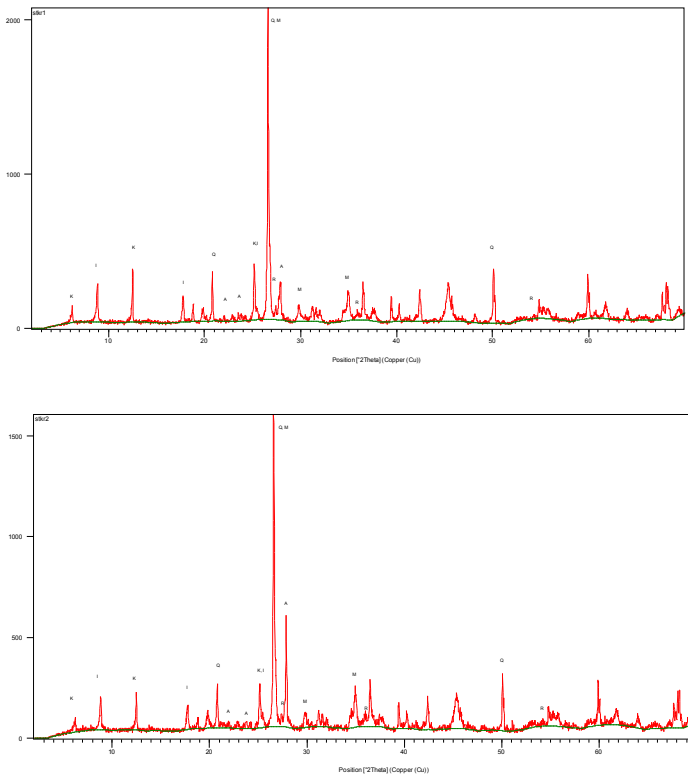
Št. vzorca/ Nu. of sample	Mineralna sestava/ Mineral composition		
	tal/ soil	tal in kamninske podlage/ soil and bedrock	kamninske podlage/ bedrock
1	rutil/ Rutile	kremen, muskovit, albit, klorit, illit/ Quartz, Muscovite, Albite, Chlorite, Illite	
2	rutil/ Rutile	kremen, muskovit, albit, klorit, illit / Quartz, Muscovite, Albite, Chlorite, Illite	
3	dolomit, illit, rutil, muskovit, sadra/ Dolomite, Illite, Rutile, Muscovite, gypsum	kremen, kalcit/ Quartz, Calcite	
4	albit, kaolinit/ Albite, Kaolinite	kremen, dolomit, kalcit, illit/ Quartz, Dolomite, Calcite, Illite	
5	illit, klorit/ Illite, Chlorite	kremen, dolomit, kalcit, kaolinit, hematit/ Quartz, Dolomite, Calcite, Kaolinite, Hematite	
6	muskovit, illit, klorit/ Muscovite, Illite, Chlorite	dolomit, kremen/ Dolomite, Quartz	kalcit, albit/ Calcite, Albite
7		kremen, muskovit, albit, klorit, illit, hematit/ Quartz, Muscovite, Albite, Chlorite, Illite, Hematite	
8	kalcit, anortit/ Calcite, Anorthite	illit, muskovit, kremen/ Illite, Muscovite, Quartz	albit / Albite
9	muskovit, illit, klorit/ Muscovite, Illite, Chlorite	dolomit, kremen/ Dolomite, Quartz	kalcit, albit/ Calcite, Albite
10	anortit/ Anorthite	dolomit, kalcit, kremen, illit, klorit/ Dolomite, Calcite, Quartz, Illite, Chlorite	Albit/ Albite
11	kremen, albit, illit, klorit, rutil, dolomit, muskovit/ Quartz, Albite, Illite, Chlorite, Rutile, Dolomite, Muscovite	kalcit	
12	kalcit, dolomit, anortit, klorit/ Calcite, Dolomite, Anorthite, Chlorite	kremen, illit, muskovit/ Quartz, Illite, Muscovite	albit / Albite
13	kremen, albit, illit, klorit, rutil, dolomit, muskovit/ Quartz, Albite, Illite, Chlorite, Rutile, Muscovite	Kalcit/ Calcite	
14	kremen, illit, muskovit/ Quartz, Illite, Muscovite	albit, klorit/ Albite, Chlorite	Dolomit/ Dolomite
15		kremen, albit, muskovit, klorit, illit/ Quartz, Albite, Muscovite, Chlorite, Illite	Kalcit/ Calcite

V prvi skupini vzorcev vidimo visoko stopnjo podobnosti primerjalnega in kontrolnega vzorca z enake lokacije (slika 3). Pri obeh (1, 2) smo določili enake minerale: kremen, illit, albit, muskovit, klorit in rutil (tabela 3). Pri ostalih (3, 4, 5) se mineralna sestava razlikuje. Vsi vsebujejo kremen, illit, kalcit in dolomit. Vzorec 3 poleg naštetih mineralov vključuje še muskovit, rutil in sadro, vzorec 4 albit in kaolinit, vzorec 5 pa klorit, kaolinit in hematit.

Tudi pri drugi skupini vzorcev je stopnja ujemanja med primerjalnim (6) in kontrolnim (9) vzorcem enake lokacije visoka (slika 4). Določili smo enake minerale: kremen, muskovit, illit, klorit in dolomit. Ostali kontrolni vzorci (7, 8, 10) ne kažejo podobnosti s primerjalnim in tudi med seboj se glede na mineralno sestavo razlikujejo. Vsi trije vsebujejo kremen in illit, poleg teh pa vzorec 7 še muskovit, klorit, albit in hematit, vzorec 8 muskovit, anortit in kalcit, vzorec 10 pa klorit, dolomit, anortit in kalcit.

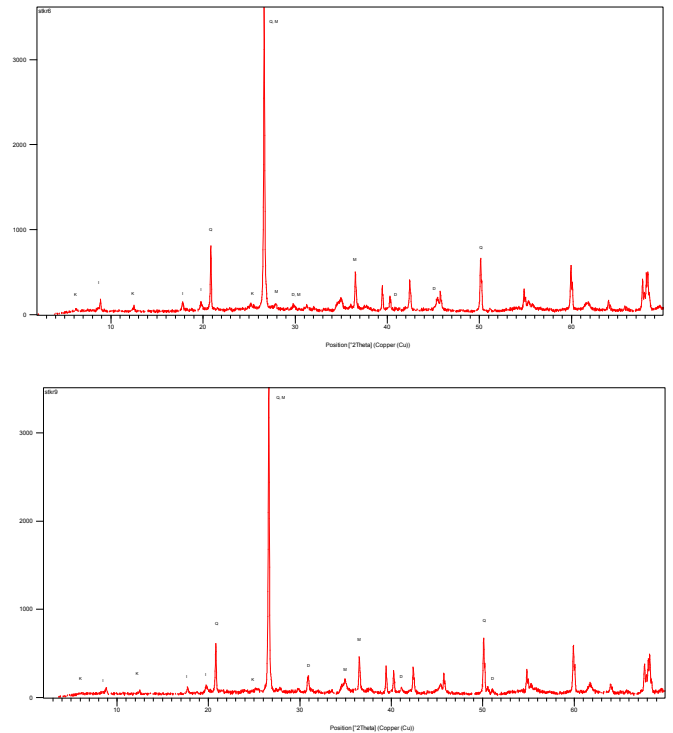
V tretji skupini vzorcev je slika nekoliko drugačna. Rentgenograma primerjalnega in kontrolnega vzorca enake lokacije (slika 5) imata visoko stopnjo ujemanja. Pri obeh (11, 13) smo določili kremen, albit, illit, klorit, kalcit, dolomit, rutil in muskovit. Prav tako pa kažeta na možnost istega izvora tudi vzorca 14 in 15, čeprav sta odvzeta na različnih lokacijah. Njuna mineralna sestava je enaka in vsebuje kremen, albit, illit, klorit in muskovit. Vzorec 12 vsebuje kremen, illit, klorit, kalcit, dolomit, muskovit in anortit (tabela 3).

Zanimala nas je tudi mineralna sestava kamninske podlage vzorcev. Kamninsko podlago vzorcev 1 in 2 predstavljajo minerali kremen, muskovit, albit, klorit in illit, vzorca 3 kremen in kalcit, vzorca 4 kremen, dolomit, kalcit in illit, vzorca 5 pa kremen, dolomit, kalcit, kaolinit in hematit. V drugi skupini kamninska podlaga vzorcev 6 in 9 vsebuje kremen, kalcit, dolomit in albit, vzorca 7 kremen, illit, albit, muskovit, hematit



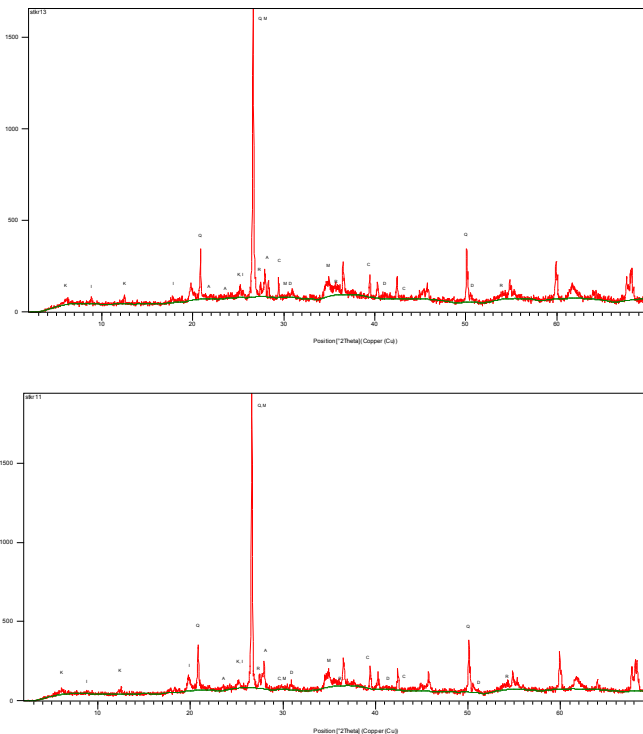
Slika 3. Mineralna sestava vzorcev 1 in 2, določena z rentgensko difrakcijo.

Fig. 3. Mineral composition of samples 1 and 2, determined by X-ray diffraction.



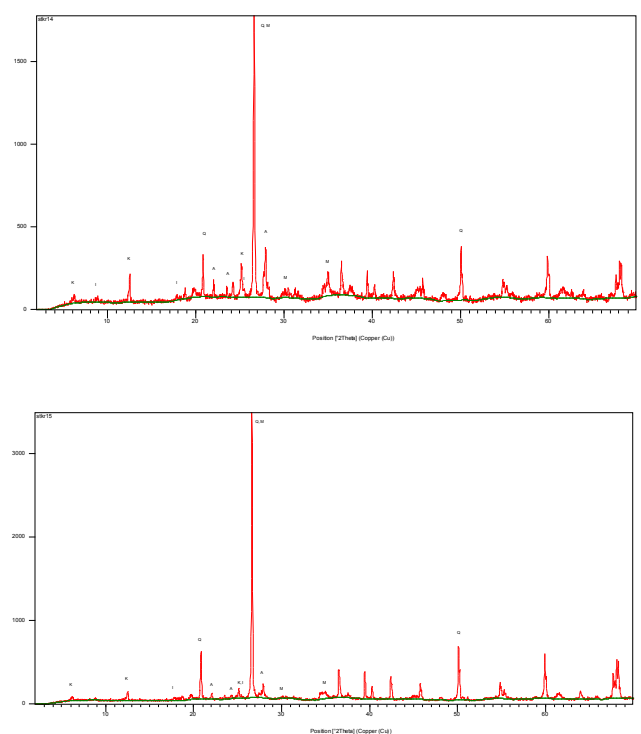
Slika 4. Mineralna sestava vzorcev 6 in 9, določena z rentgensko difrakcijo.

Fig. 4. Mineral composition of samples 6 and 9, determined by X-ray diffraction.



Slika 5. Mineralna sestava vzorcev 11, 13 ter 14, 15, določena z rentgensko difrakcijo.

Fig. 5. Mineral composition of samples 11, 13 and 14, 15, determined by X-ray diffraction.



in klorit, kamninski podlagi vzorcev 8 in 12 smo določili enake minerale in sicer kremen, illit, albit in muskovit, vzorcu 10 pa kremen, kalcit, dolomit, illit, albit in klorit. V tretji skupini nam ostanejo še vzorci 11 in 13, katerih kamninska podla-

ga vsebuje kalcit, vzorec 14, ki vsebuje dolomit, albit in klorit ter vzorec 15, kateremu smo določili kremen, kalcit, illit, albit, muskovit in klorit (tabela 3).



## Diskusija

Rezultati, pridobljeni s posameznimi metodami, se med seboj razlikujejo. Metoda praškovne rentgenske difrakcijske analize je podala zelo dobro ujemanje vzorcev enakih lokacij in hkrati opazne razlike vzorcev z drugih lokacij. Pri ostalih dveh metodah istovetnosti vzorcev enakih lokacij ni bilo mogoče zanesljivo določiti in sta dobro prikazali razlike med njimi in med vzorci drugih lokacij (barva, gostota).

S primerjavo barv nismo dobili zelenega ujemanja med primerjalnimi in kontrolnimi vzorci enakih lokacij (1 in 2, 6 in 9 ter 11 in 13). Da bi jim določili enake barve, bi morali odvzeti vzorce z iste lokacije ter jih medsebojno primerjati.

Vzorca, katerima barva izrazito izstopa (3, 8), se dobro ujemata z gostoto. Vzorec 3 ima najbolj svetel odtenek rjave barve in najvišjo gostoto, vzorec 8 pa najtemnejši odtenek rjave barve in najnižjo gostoto. Za njiju bi lahko rekli, da sta si barva in gostota soodvisni in imajo temnejši vzorci zaradi prisotnosti organske snovi nižjo gostoto. To bi lahko potrdili še za vzorca 11 in 13, ki imata prav tako močan odtenek rjave barve, njuna gostota pa je precej nizka. Vendar pa to ne velja za vzorec 14, ki ima svetlejši odtenek rjave barve, gostoto pa podobno vzorcema 11 in 13 in je med 2,3 in 2,0 g/cm<sup>3</sup>. Soodvisnost med barvo in gostoto vzorcev bi prav tako lahko prikazali na vzorcu 1, ki je svetlo rjave barve in ima gostoto med 2,8 in 2,7 g/cm<sup>3</sup>, kar pa ne velja za vzorce 6, 9, 12, 14, ki imajo prav tako svetel odtenek rjave barve, njihova gostota pa je nižja. Med vzorci se jasne korelacije med barvo in gostoto ne da določiti, kar nakazuje, da barva in gostota vzorcev nista neposredno primerljivi. Z meritvami gostote nismo dobili enakosti med primerjalnimi in spornimi vzorci. Le v tretji skupini vzorcev je opazna podobnost med primerjalnim in kontrolnim vzorcem enake lokacije (vzorca 11 in 13), hkrati pa je imel vzorec 14 njima podobno gostoto.

Oddaljenost vzorcev 5 metrov in več je bila prevelika, da bi nam meritve gostote lahko prikazale ujemanje med vzorci. Z dodatnimi meritvami gostote smo ugotovili, da so tla specifična za vsako lokacijo posebej in da se gostota vzorcev spremeni tudi po času. V času osmih mesecev so se delci pri vzorcih 1 in 1-A pojavili pri enakih gostotah (med 2,7 in 2,8 g/cm<sup>3</sup>), vendar v različnih koncentracijah. Spreminjanje gostote vzorcev 1-A, 1-B, 1-C, 1-D in 1-E, glede na medsebojno oddaljenost 1 m prikazujejo, da se gostota lahko spremeni v oddaljenosti manj kot 1 m, lahko pa imajo tla enako gostoto na oddaljenosti 1, 2, 3 m, čeprav se njihove vmesne gostote razlikujejo. Vzorca 1-B in 1-C imata razporeditev delcev enako, z vzorcem 1-E se razlikujeta v koncentraciji posameznih delcev. Rezultati kažejo, da je gostota specifična za določeno območje. Pri enakih lokacijah smo dobili različne gostote vzorcev, pri istih lokacijah pa so si bile gostote zelo podobne. To predstavlja dobro dokazno vrednost v forenziki, kjer je ključen kraj odvzema primerjalnega in spornega vzorca, ki mora biti isti in ne enak.

Pri meritvah se lahko pojavijo napake, ki bremenijo končni rezultat (MURRAY & TEDROW, 1992). Delci so lahko sprijeti, pri čemer se sprimeta dva minerala ali več in se zato pojavita na vmesni višini, torej vmesni vrednosti njune prave specifične teže. Težki minerali so sicer lahko razpoznavni, vendar se zaradi gostote višje od 2,8 začnejo kopičiti na dnu cevi. Kremen je eden izmed najbolj pogostih mineralov na Zemlji. Ker neredko vsebuje tekočinske vključke in vključke drugih mineralov, je njegova gostota spremenljiva. Minerali z zelo podobno gostoto se pojavijo na enaki višini, kar lahko vodi do varljivega zgoščevanja delcev na določeni višini. Zaradi naštetega lahko, ne glede na natančnost merjenja, dobimo napačen rezultat. Taka napaka se je lahko zgodila tudi pri vzorcu 13, pri katerem je prišlo do močne koncentracije delcev pri gostoti 2,0 g/cm<sup>3</sup>, kar je lahko posledica napake pri meritvi. Možno je, da imajo nekateri delci na vrhnjem delu zgostitve rahlo večjo gostoto, vendar se zaradi zgostitve delcev pod njimi ne morejo spustiti nižje po cevi.

Na podane primere lahko ob upoštevanju možnih napak, z uporabo obeh dveh metod (določitev barve in gostote), podamo visoko stopnjo njune zanesljivosti. Njune razlike se vidijo že na kratke razdalje (nekaj metrov; enake in druge lokacije), enakosti med vzorci pa na razdalji 3, 2, 1 meter ali manj, kar pride v poštev pri forenziki.

Mineralna sestava tal je podala zelo dobro ujemanje primerjalnih in kontrolnih vzorcev enakih lokacij. Prav tako pa so bile jasne razlike v mineralni sestavi z ostalimi vzorci. Izjema sta vzorca 14 in 15, katerima smo določili enake minerale. Ker imajo vzorci enakih lokacij enako mineralno sestavo tal, ne pride v poštev v forenziki, saj je tu pomembna ista lokacija. Sklepamo lahko, da bi mineralna sestava vzorcev istih lokacij prav tako prikazala njihovo ujemanje, vendar pa to za forenziko ni dovolj. Vidne morajo biti tudi razlike med njimi, ko gre za vzorce z enake lokacije. V primeru, ko imamo podobno barvo in gostoto za posamezni par vzorcev, vendar pa o njuni istovetnosti nismo prepričani, lahko z RTG preverimo, če so vzorci res z iste lokacije. S tem bi dobili zelo visoko stopnjo ujemanja primerjalnih in kontrolnih vzorcev.

Tabela 4. Gostote mineralov, določenih z RTG.

Table 4. Densities of minerals, which were determined by X-ray diffraction.

Mineral Mineral	Gostota g/cm <sup>3</sup> Density	Mineral Mineral	Gostota g/cm <sup>3</sup> Density
kremen/ Quartz	2,63	illit / Illite	2,69
kalcit/ Calcite	2,71	albit/ Albite	2,62
dolomit/ Dolomite	2,90–3,00	anortit/ Anorthite	2,65
sadra/ Gypsum	2,30	klorit/ Chlorite	2,50–3,30
hematit/ Hematite	5,30	kaolinit/ Kaolinite	2,60
rutil/ Rutile	4,20–4,30	muskovit/ Muscovite	2,83

Iz primerjave izmerjenih gostot tal (tabela 2) in gostot mineralov (tabela 5), ki smo jih določili z RTG vidimo, da imajo minerali, ki se v vzorcih, določenih z RTG, najpogosteje pojavljajo (kremen, illit, muskovit, albit, klorit), gostote med 2,6 in 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Najbolj odstopata vrednosti za rutil (5,3 g/cm<sup>3</sup>) in hematit (4,2–4,3 g/cm<sup>3</sup>), ki sta gostejša. Izmerjene gostote vzorcev 1, 2, 3, 7 in 10 se zelo dobro ujemajo z gostotami mineralov, ki smo jih določili z RTG. Manjše ujemanje je z vzorci 5, 6, 12, 15, zelo slabo pa pri vzorcih 4 in 9. Pri vzorcih 8, 11, 13 in 14 podobnosti ni. Tako odstopanje pripisujemo morebitnim vsebnostim organskih snovi v vzorcih ali pa napakam pri meritvah, omenjenih zgoraj.

Mineralna sestava kamninske podlage vzorcev kaže, da ima kamninska podlaga in njeno prepeprevanje bistven vpliv na mineralno sestavo tal. Tla vsebujejo minerale, ki so prisotni v kamninski podlagi, poleg teh pa vključujejo še druge minerale, med katerimi so nekateri posledica prepeprevanje kamninske podlage, za druge pa sklepamo, da so naknadno vključeni v tla z višje ležečih delov.

Z analizo kamninske podlage smo ugotovili, da starost in vrsta kamninske podlage ne vplivata na mineralno sestavo tal drugih lokacij (ne enakih!). Mineralne sestave vzorcev z apnenca (3, 6 in 9), skrilavih glinavcev (1 in 2, 15) in s pleistocenske kamninske podlage (4, 8, 12), se razlikujejo (tabela 3).

## Zaključki

Vsaka od metod, tako primerjanje barve, merjenje gostote, kot tudi rentgenska praškovna difrakcijska analiza, s katerimi smo preiskovali tla, je podala drugačne rezultate. Različna je tudi njihova dokazna vrednost glede na forenzični namen.

Meritve med seboj niso neposredno primerljive. Barve vzorcev ne sovpadajo z gostotami, ki smo jih dobili pri merjenju. Gostote le delno sovpadajo z gostotami mineralov, določenih z RTG.

Kamninska podlaga ima vpliv na mineralno sestavo tal. Minerali, ki gradijo kamnine sovpadajo z minerali, ki gradijo tla. Zato lahko določeno mineralno sestavo tal pričakujemo, vendar pri tem ni izključena možnost prisotnosti drugih ali pa odsotnost pričakovanih mineralov.

Da bi lahko določili, katera metoda je za forenzični namen najboljša, je potrebno najprej določiti, kakšni rezultati se lahko opredelijo kot točni.

Gostota tal je specifična za vsako območje tal posebej, saj se lahko spreminja že na zelo majhne razdalje (manj kot en meter). Tudi barva vzorcev enakih lokacij si je le podobna. Če pri merjenju gostote ugotovimo ujemanje razporeditve delcev dveh (ali več) vzorcev, lahko podamo visoko stopnjo dokazne vrednosti, da sta z enake lokacije, vendar pa ni nujno, da sta z iste. V primeru, da upoštevamo še barvo vzorcev in je le-ta

enaka, pa lahko podamo že dokaj visoko stopnjo zanesljivosti, da sta vzorca z iste lokacije. Vendar pa v obratnem primeru, ko rezultati gostote ne pokažejo ujemanja med vzorci enakih lokacij, možnost, da imajo vzorci isti vir, ni izključena.

Mineralna sestava, določena s praškovno rentgensko difrakcijo, je podala zelo dobro ujemanje vzorcev enakih lokacij. Vendar pa ujemanje vzorcev enakih lokacij v forenziki ne predstavlja zadovoljivih rezultatov, saj je v primeru forenzike potrebno nedvoumno določiti kraj kriminalnega dejanja. Zato so rezultati, določeni z RTG, nezanesljivi. Kot smo že omenili, 5 ali več metrov oddaljena lokacija ne predstavlja več kraja kriminalnega dejanja. S to metodo ne moremo določiti ali je bil vzorec odvzet na samem kraju ali le blizu kraja kriminalnega dejanja. Zato se v tem primeru njena dokazna vrednost močno zmanjša. Metoda sama po sebi ne predstavlja dovolj zanesljive dokazne vrednosti za forenzični namen.

Za forenziko je pri primerjanju vzorcev bistvenega pomena uporaba metod, ki prikažejo jasno ujemanje vzorcev istih lokacij in jasne razlike vzorcev enakih in drugih lokacij. Pri tem ena sama metoda (od metod, ki smo jih uporabila v raziskavi) ni zadosti. Metoda določanja barve sama zase ni dovolj močna za uporabo v forenziki, vendar pa se skupaj z metodo merjenja gostote lahko vidi že izrazito ujemanje med vzorci iste lokacije, hkrati pa so opazne razlike, ko imamo vzorce drugih lokacij. Še vedno pa v primeru, ko enakosti barve in gostote niso jasno izražene, lahko uporabimo še metodo rentgenske praškovne difrakcije. Ob nadgraditvi prvih dveh metod s slednjo, pa lahko podamo zelo visoko stopnjo zanesljivosti ali sta vzorca z iste lokacije ali ne. To pa predstavlja v forenzičnem preiskovanju vzorcev že zanesljivo dokazno vrednost.

Stopnjo zanesljivosti posamezne metode bi lahko ugotovili z večjim številom sistematično odvzetih in analiziranih vzorcev. To predvsem velja za rentgensko difrakcijsko analizo, pri kateri smo dobili zelo dobro ujemanje dveh vzorcev enake lokacije. Tako bi z vedenjem, kako se rezultati v ujemanju ali razlikovanju vzorcev spreminjajo glede na oddaljenost od primarnega vzorca, lahko podali večjo dokazno vrednost. Enako velja za barvo in gostoto.

## Zahvala

Predstavljeni rezultati so del diplomskega dela z naslovom »Mineralna sestava tal kot dokazno gradivo v forenziki«. Zahvaljujem se Gorazdu Pezdirju in Ester Ceket za pomoč pri meritvah gostote v Nacionalnem forenzičnem laboratoriju. Zahvala gre tudi vsem trem recenzentom prof. dr. Bredi Mirtič, Mirki Trajanovi in Gorazdu Pezdirju za kritične in dosledne vsebinske pripombe ter za razjasnitev določenih pojmov, postopkov in zakonitosti, pomembnih v forenziki. Prav tako se zahvaljujem tudi ARRS in MNZ, ki so omogočili raziskavo.

### Literatura

- GOLJA, J. 1997: Kriminalistična tehnika. In: MAVER, D.: Kriminalistika. Ljubljana: Uradni list Republike Slovenije: 239-245.
- MURRAY, R. C & TEDROW, J. 1992: Forensic geology. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall: 203 p.
- MURRAY, R. C. 2005: Collecting crime evidence from earth. Internet: <http://www.forensicgeology.net/science.htm> (17.9.2009)
- SUGITA, R. & MARUMO, Y. 1996: Validity of color examination for forensic soil identification. Forensic Science international, 83/3: 201-210, doi:10.1016/S0379-0738(96)02038-5.
- BUSER, S. 1970: Osnovna geološka karta SFRJ. 1 : 100.000. Tolmač lista Postojna. Zvezni geološki zavod, Beograd: 58 p.
- BUSER, S. 1976: Osnovna geološka karta SFRJ. 1 : 100.000. Tolmač lista Kranj. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- BUSER, S. 1980: Osnovna geološka karta SFRJ. 1 : 100.000. Tolmač lista Celovec. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- PLENIČAR, M. 1973: Osnovna geološka karta SFRJ. 1 : 100.000. Tolmač lista Trst. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- RAMOVŠ, A. 2004: Geološki razvoj Selške doline. V: Železne niti. Zbornik Selške doline. Muzejsko društvo železniki: 17-51.



## Nova knjiga

Minoru OZIMA, Jun KORENAGA, Qing-Zhu YIN, 2012: **The Earth – Its Birth and Growth**, druga izdaja. Cambridge University Press, 164 str.

Pred nami je druga, popolnoma predelana izdaja knjige »The Earth« profesorja Ozime s Tokijske univerze, ki je širši znanstveni javnosti znan po svojih številnih prispevkih s področja geokemije izotopov, predvsem žlahtnih plinov. Tokrat sta se mu pridružila še dva soavtorja.

Izboljšane tehnike analiz izotopov so v zadnjih dveh desetletjih pomagale temeljito prevetriti znanje o nastanku Zemlje in izboljšati številne teorije ali pa jih povsem postaviti na glavo. Posebnost knjige je, da razvoj Zemlje v veliki meri obravnava skozi rezultate izotopske geokemije. Avtorji izotope pogosto imenujejo geokemični fosili. Tako se lotijo opisa pomena številnih izotopov, kot na primer argona, hafnija, volframa, niobija, samarija in seveda tudi »klasičnih« stabilnih in radioaktivnih izotopov. Z njihovo pomočjo opišejo različne dogodke v Zemljini preteklosti, od nukleosinteze v vesolju, do razlage različnih akrecijskih modelov planeta ter razlage razvoja in razdelitve Zemljinega jedra, razvoja atmosfere in oceanov, lotijo pa se tudi trenutno zelo aktualnih vprašanj o spremembah klime v geološki preteklosti.

Razlaga nastanka Zemlje temelji tudi na kratkih opisih razvoja metod izotopske geokemije ter kratkih opisih temeljnih referenc, ki so ta odkritja predstavila. Po eni strani so ti zapisi zanimivi, ker so podkrepljeni z neposredno izkušnjo prof. Ozima, ki je pri teh odkritjih v veliki meri sodeloval, hkrati pa so zaradi narave knjige, ki skuša biti kratka in informativna, nekoliko pomanjkljivi in v tekstu kar obvisijo. Knjiga ima zelo lep in natančno izbran referenčni aparat, ki omogoča nadaljnji in poglobljen študij teorij o razvoju Zemlje. Da gre res za aktualen pregled literature potrjujejo citirana dela iz leta 2010.

V knjigi, ki se ukvarja z razvojem Zemlje, bi pričakovali, da nas avtorji najprej seznanijo z nastankom planeta od solarne nebule dalje. Toda temu ni tako, najprej opišejo osnove toplotne bilance planeta, ta opis pa služi kot osnova za opis pomena izotopov, s tem pa tudi že nakažejo metodo svojega opisa, ki sloni na izotopski geokemiji.

Sledi poglavje o akreciji in akrecijskih teorijah. To se nadaljuje v poglavje o nastanku Zemljine plastovite strukture, sledi poglavje o časovni komponenti tega razvoja in poglavje o vzpostavitvi tektonike plošč. Posebno poglavje avtorji namenijo razvoju Zemljinega plašča ter hidrosferi in atmosferi. Sledi poglavje z zanimivim naslovom »Izotopi kot DNK narave«, kjer se še bolj podrobno kot v prejšnjih poglavjih, lotijo ocene pogojev, ki so na Zemlji vladali v preteklosti, zlasti temperaturnih razmer v ozračju s pomočjo analiz izotopov vodika, kisika, ogljika in žvepla. Obvezno poglavje podobnih knjig je seveda posvečeno Zemljinemu magnetizmu, ki je v tej knjigi zanimivo, ker podajo avtorji nekaj osebnih izkušenj s tega področja. Poglavje o Luni podaja najnovejša dognanja, ki mečejo nekoliko drugačno luč na razvoj Zemlje in njenega satelita, kot smo jih poznali do sedaj. Ti opisi izhajajo prav iz novejših izotopskih analiz elementov v sledovih. In povsem za konec je v knjigi še poglavje, ki podaja opis naravnega reaktorja Oklo v Gabonu ter kratek pogled na vpliv človekovega življenja v mestih na nadaljnji razvoj.

Knjiga skuša na pregleden način razložiti nastanek Zemlje, od njenih začetkov z akrecijo, do nastanka atmosfere, oceanov ter tektonike plošč. Pri tem pa ne gre za poljudno pisanje ali pa celo za znanstven esej, temveč za znanstveno naravnano povzetek najnovejših dognanj o razvoju Zemlje. Prav zaradi tega knjiga ni povsem enostavno branje, temveč terja nekaj znanja s področja geofizike in geokemije. Morda je ravno zaradi tega dobrodošlo branje za geologe, ki se lahko na ta način seznanijo z zadnjimi dognanji o nastanku in razvoju Zemlje.

Kot dopolnilno gradivo pri študiju knjigo priporočam v branje studentom geologije na različnih stopnjah študija in seveda tudi vsem ostalim, ki jih zanimajo novejša spoznanja o nastanku Zemlje in Lune. Knjiga je napisana berljivo in pregledno, z enostavnim stilom, predvsem pa se izogiba matematičnim zapisom, kar jo dela za geologe še posebej privlačno.

*Mihael Brenčič*

# Poročilo

## Predstavitev Slovenskega geološkega društva in letno poročilo za leto 2011

Timotej VERBOVŠEK

Oddelek za geologijo, NTF, UL, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana; e-mail: timotej.verbovsek@geo.ntf.uni-lj.si

Slovensko geološko društvo (Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana) je strokovno združenje slovenskih geologov. Ustanovljeno je bilo leta 1951 in povezuje raziskovalce, učitelje, druge poklicne geologe in ljubitelje stroke. Njegov cilj je napredek znanosti in prakse na področju vseh vej geologije. Društvo zato prireja javna predavanja, strokovne ekskurzije, razstave in znanstvene sestanke, skrbi za popularizacijo geologije in za vključevanje geoloških ved v osnovnošolske in srednješolske učne programe. Sodeluje pri prizadevanjih za varstvo okolja in pri izdelavi zakonskih aktov in normativov s področja geologije. Sodeluje tudi z drugimi strokovnimi društvi v Sloveniji in tujini in je vključeno v mednarodne organizacije: Mednarodno združenje za geološke znanosti (IUGS), Evropsko zvezo geologov (EFG), Mednarodno mineraloško zvezo (IMA), ProGeo. V okviru društva deluje pet sekcij; *sekcija za geokemijo* (predsednica Mateja Gosar), *sekcija za sedimentarno geologijo* (predsednik Bojan Otoničar), *sekcija za mineralogijo* (predsednica Meta Dobnikar), *sekcija za geološko dediščino* (predsednica Martina Stupar) in *študentska sekcija* (predsednik Klemen Černič). Društvo sestavlja ožji izvršni odbor (predsednik Timotej Verbovšek, podpredsednica Nadja Zupan Hajna, tajnica Mirjam Vrabc, blagajničarka Bernarda Bole, Boštjan Rožič, Vladimir Vukadin, Suzana Fajmut Štrucelj, Bojan Režun, Matevž Novak), razširjeni izvršni odbor (predsedniki sekcij), nadzorni odbor (Špela Goričan, Franci Čadež, Bojan Ogorelec) in častno razsodišče (Katica Drobne, Dragica Turnšek, Pavle Florjančič).

Slovensko geološko društvo za uresničitev svojega cilja opravlja naslednje aktivnosti:

- povezovanje raziskovalnega, strokovnega in vzgojno-izobraževalnega dela na področju vseh vej geoloških ved in sorodnih strok,
- popularizacijo geoloških ved s pomočjo poljudnih člankov, z organizacijo ekskurzij, poletnih taborov, izdajanjem razglednic in brošur z geološko vsebino,
- sodelovanje z upravnimi službami in organi pri izdelavi zakonskih aktov ter pravnih in tehničnih normativov in pri drugih strokovnih vprašanjih z navedenih področij,
- sodelovanje z univerzami, raziskovalnimi organizacijami, javnimi ustanovami in zavodi, s podjetji in z osebami, katerih dejavnost sega na strokovno področje različnih vej geoloških ved,
- sodelovanje z drugimi strokovnimi društvi v Sloveniji in v tujini, ki delujejo na področju različnih vej geoloških ved,
- sodelovanje z mednarodnimi organizacijami; predvsem z Mednarodno zvezo geoloških društev (IUGS), Zvezo evropskih geoloških društev

(AEGS), IUGS pridruženimi specializiranimi mednarodnimi strokovnimi zvezami in z drugimi sorodnimi nacionalnimi ali mednarodnimi strokovnimi organizacijami in društvi,

- sodelovanje pri prizadevanjih za varstvo okolja,
- obveščanje članov in širše javnosti v okviru možnosti z:
  - informacijami o najnovejših dosežkih znanosti in stroke,
  - organizacijo strokovnih seminarjev, simpozijev, kongresov in drugih znanstvenih sestankov, s področja delovanja društva,
  - organizacijo javnih predavanj, s področja delovanja društva,
  - organizacijo strokovnih ekskurzij,
  - publiciranjem v sredstvih javnega obveščanja, o perečih strokovnih in organizacijskih vprašanjih,
  - izdajanjem tiskanih Obvestil društva in drugih izdaj nekomercialnega značaja.

Redni član društva lahko postane vsak, ki se poklicno ali kako drugače ukvarja z vsaj eno od vej geoloških ved in s svojim raziskovalnim, strokovnim, pedagoškim ali ljubiteljskim delom in ki z drugimi aktivnostmi prispeva k razvoju geoloških ved in z njimi povezanih strok. Častni člani lahko postanejo posamezniki, ki so pomembno prispevali k razvoju geoloških ved v Sloveniji in v mednarodnem prostoru. Častni člani ne plačujejo članarine. Pridruženi člani so fizične osebe, ki se ljubiteljsko ukvarjajo z zbiranjem mineralov in fosilov ali se drugače zanimajo za geologijo. Podporni člani so fizične in pravne osebe, ki finančno podpirajo delovanje društva, lahko sodelujejo na sejah skupščine, vendar nimajo pravice odločanja. **Za včlanjenje v društvo** je treba predložiti pisno pristopnico (dostopna na spletni strani), s katero se posameznik zaveže, da bo deloval v skladu s statutom in plačeval članarino. Članarina za leto 2012 za člane znaša 15 EUR, za študente 5 EUR. Izpolnjeno pristopnico s potrdilom o plačilu pošljite na naslov društva (Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana). Več informacij o društvu je dostopnih na spletni strani <http://www.geoloskodrustvo.si/>

### Poročilo o delu Slovenskega geološkega društva v letu 2011

V preteklih letih je društvo delovalo v skladu z določili društva in programom dela, ki je bil sprejet na IO društva v vsakem koledarskem letu. Del zastavljenega programa iz prejšnjega leta je bil realiziran, nekaj nalog pa nam ni uspelo izvesti, zato so bile predstavljene na naslednje leto.

Slovensko geološko društvo (SGD) si je kot nevladna in neprofitna organizacija prostovoljno združenih strokovnjakov in ljubiteljev geologije zadalo za temeljni cilj napredek znanosti in prakse na področju vseh vej geologije, ki je zapisan tudi v njegovem statutu.

V okviru društva delujejo naslednje sekcije: Sekcija za sedimentarno geologijo, Sekcija za geokemijo, Sekcija za mineralogijo, Sekcija za geološko dediščino in Študentska sekcija.

**Strokovna predavanja.** Namen predavanj na SGD je, da se slovenski geologi srečamo, predstavimo svoje strokovno delo na zelo različnih področjih geologije (sedimentologija, stratigrafija, paleontologija, mineralogija, petrologija, geokemija, hidrogeologija, inženirska geologija, GIS) in razpravljamo o novih idejah ter o naši vpetosti v svetovne geološke tokove. V letu 2011 so bila izvedena naslednja predavanja:

1. četrtek, 13. 1. 2011 ob 17 uri: **Dolomite Formation in Time and Space in Stromatolite Structures in Sedimentary Sequences**; dr. Judith Mc Kenzie (ETH Zürich, Švica), Dvorana zemljepisnega muzeja GIAM ZRC SAZU, Gosposka 16, Ljubljana.
2. sreda 1. 6. 2011 ob 18 uri: **Uporaba fosilnih koralnih grebenov in geomorfoloških oblik v karbonatih kot indikatorjev nihanja morske gladine**, Blaž Miklavčič, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana.
3. sreda 21. 9. 2011 ob 18 uri: **The European Federation of Geologists - supporting and promoting professional geology in the service of society and sustainable use of land and natural resources**. dr. Ruth Allington (European Federation of Geologists, Velika Britanija), Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana.
4. petek 25. 11. 2011 ob 18 uri: **60 let Slovenskega geološkega društva**, doc. dr. Timotej Verbovšek (UL NTF OG). Predavanje na 20. posvetovanju Slovenskih geologov, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana.
5. četrtek, 1. 12. 2011 ob 18 uri: **Permafrost and rock glaciers of the Alps: Distribution, dynamics and problems**, prof. dr. Karl Krainer (Univerza v Innsbrucku, Avstrija), Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana. Organizirano v sodelovanju z Geomorfološkim društvom Slovenije.
6. sreda 14. 12. 2011 ob 18 uri: **Vpliv zakonodaje na geološka dela v gospodarstvu – primer gospodarjenja z mineralnimi surovinami**, dr. Zeljko Pogačnik (Salonit Anhovo d.d.), Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana.

**Strokovna ekskurzija.** Ekskurzija na Potočko zijalko in Olševo dne 22. 10. 2011 je bila zaradi slabega vremena prestavljena na pomlad 2012.

### **Ostali dogodki**

1. Letno poročilo o delovanju SGD za minulo leto je bilo objavljeno v številki revije *Geologija* 54/1, 147-148 (Verbovšek, 2011: **Predstavitev Slovenskega geološkega društva in letno poročilo za leto 2010**), Geološki zavod Slovenije.
2. Letno poročilo o delovanju SGD za minulo leto je bilo objavljeno v periodični publikaciji biltena **Mineralne surovine v letu 2010**, Geološki zavod Slovenije.
3. Na 20. posvetovanju slovenskih geologov dne 25. 11. 2011 je bilo organizirano uvodno predavanje s tematiko predstavitve in aktivnosti SGD.
4. Spletna stran SGD ([www.geoloskodrustvo.si](http://www.geoloskodrustvo.si)) je ažurirana in dopolnjena s prijavnico in navodili za prijavo na mailing listo (GEORG) za obveščanje članov.
5. S Slovensko inženirsko zvezo oz. z Zvezo strojnih inženirjev Slovenije poteka sodelovanje v zvezi s projektom HE na srednji Savi.
6. Začeti so bili postopki za ustanovitev tričlanske komisije (NVC - National Vetting Committee), ki bo v zvezi EFG delovala kot nacionalna komisija za podeljevanje naziva Evrogeolog (Eurogeol) na območju Slovenije

### **Za leto 2012 so načrtovane naslednje aktivnosti društva**

Predvidena so *strokovna predavanja o XRF analitski tehniki* (Matej Dolenc in Nastja Rogan Šmuc), predavanje o rezultatih geoloških raziskav v zadnjih 6 letih na področju *Pohorja* (Mirjam Vrabc) ter izvedba okrogle mize in strokovnega posvetovanja na temo *Geoparki v Sloveniji* (Martina Stupar, Bojan Režun in Suzana Fajmut Štrucl) ter izvedba neuresničenih tem od lanskega leta (organizacija okrogle mize na temo vključevanja geoloških vsebin v programe osnovnih in srednjih šol ter posvetovanje o kvartarni geologiji Slovenije). Predvidene so strokovne ekskurzije v *Potočko zijalko in na Olševo* (neuresničena v 2011), na *območje fosilnega plazu v Ilirski Bistrici* (organizator: Ladislav Placer) ter na *Medvednico* (organizator: študentska sekcija SGD). Predvideno je tudi sodelovanje društva s Hrvaškim geološkim društvom, večja promocija oz. popularizacija geologije ter aktivno sodelovanje društva in Zavoda RS za varstvo narave pri akcijah čiščenja ogroženih geoloških profilov na terenu.

Ker jedro društva tvorijo njegovi člani, pozivam vse izmed njih k večji aktivnosti, izvedbi predavanj in ekskurzij ter seveda k spodbujanju debat in reševanju odprtih problemov slovenske geologije.



## V spomin Antonu Nosanu



V Ljubljani je 31. januarja 2012 v 89. letu starosti sklenil svojo življenjsko pot naš dolgoletni sodelavec inženir Anton Nosan, priznan strokovnjak s področja hidrogeologije, ki se je uveljavil kot začetnik in utemeljitelj sodobnih raziskav virov mineralnih in termalnih vod v Sloveniji. Kljub številnim dolgoletnim vodstvenim obveznostim na Oddelku za hidrogeologijo in kasneje na mestu prvega direktorja tedanjega TOZD-a za geološke raziskave pri Geološkem zavodu Ljubljana, je vseskozi ostajal zvest strokovnemu poslanstvu. S sodelavci je nesebično delil svoje bogato znanje in izkušnje, ter kot mentor vzgajal nove generacije mladih geologov. Njegova plemenita in brezkompromisna predanost delu ter želja po doprinosu k razvoju geologije in celotne slovenske družbe nam ostajata za vzgled in spodbudo. »Voda je ali pa je ni«, je pogosto kratko dejal, kadar je neposredno ali v prisposodbi govoril o ciljih in merilih uspešnosti našega delovanja.

Inženir Anton Nosan se je rodil 4. junija 1922 na Drulovki pri Kranju, kjer je preživel mladost in zaključil osnovno izobraževanje. Po končani gimnaziji se je vpisal na Prirodoslovno-matematično fakulteto Univerze v Ljubljani. V letu 1951 je diplomiral in se zaposlil na Geološkem zavodu Ljubljana, kjer je deloval vse do upokojitve leta 1989.

Strokovna pot je inženirja Antona Nosana najpogosteje vodila v vzhodno Slovenijo, v gričevnat svet panonskega obrobja med Voglajno, Sotelskim, Bohorjem, Rogaško Slatino in Čatežem. V prvih letih po prihodu na Geološki zavod Ljubljana je na tem območju tudi kartiral in si pridobil bogato znanje o tamkajšnjih stratigrafskih in tektonskih razmerah, koncem petdesetih let pa ga je tedanje vodstvo napolnilo na zahtevne hidrogeološke projekte. Med prva znanstveno odmevna ter gospodarsko in družbeno uspešna dela, nedvomno sodijo raziskave v Čateških toplicah med leti 1957-58 in 1969-72. V začetku sedemdesetih let so pod vodstvom inženirja Antona Nosana stekle obsežne raziskave virov mineralnih in termalnih vod v Rogaški Slatini, ki so trajale več kot dvajset let. Za polnilnico mineralnih vod Donat in Tempel sta bili poleg številnih manjših zajetij, v bližini izvirov izvrtani tudi vrtini v Podplatu in Spodnji Kostrivnici, ki sta skupaj zagotovili novih 370 L/min mineralne vode in preko 250 kg/h ogljikovega dioksida. Koncem sedemdesetih in v začetku osemdesetih let je inženir Anton Nosan uspešno zaključil dela v Dolenjskih, Šmarjeških in Rimskih Toplicah, v Podčetrtku, Topolšici, Laškem in na Bledu. Novi in izdatnejši viri termalne vode so omogočili razmah zdraviliško-rekreacijskega turizma, kar je ugodno vplivalo na celoten gospodarski razvoj savinjske, spodnje posavske in jugovzhodne slovenske regije. Pomemben je tudi njegov doprinos k oskrbi Novega mesta in širše okolice s pitno vodo, katero so omogočila bogata zajetja v Družinski vasi ter na podnožju Gorjancev.

Več let je deloval tudi v Makedoniji, v Banji Kočani, Istibanji pri Vinici, Katlanovski banji in Kneževiški banji v Štipu. Velike količine termalne vode zajete z vrtinami na Kočanskem polju so omogočile intenzivno pridelavo kakovostne povrtnine v rastlinjakih, na temeljih samooskrbe iz lastnega in kontroliranega vira. Za izjemen dosežek mu je mesto Kočani leta 1984 podelilo posebno priznanje.

Inženir Anton Nosan je aktivno sodeloval v velikih, večletnih projektih Geološkega zavoda Ljubljana, kot sta »Pitne in mineralne vode« ter »Geotermalna energija«, pri projektih slovenskih hidroelektrarn in številnih nalogah izven meja tedanje Jugoslavije, predvsem na Bližnjem vzhodu v Alžiriji in na Sinaju. Skrb za razvoj geologije in naše ustanove je ohranjal tudi po upokojitvi s sodelovanjem na projektih in svetovanjem. Za doprinos k razvoju slovenske znanosti je leta 1974 prejel Kidričevo nagrado, leta 2003 pa je postal tudi prvi častni član Geološkega zavoda Slovenije.

Vsi, ki smo inženirja Antona Nosana osebno poznali se s hvaležnostjo spominjamo skupaj prehojene poti na Geološkem zavodu Slovenije, njegove predanosti delu in neustavljive želje ustvariti boljši jutri za vse nas. Zapustil nam je bogato zbirko preko 270-ih objavljenih in arhivskih del, ki so temelj sodobne hidrogeologije mineralnih in termalnih, vir znanja in zgled tudi za prihodne rodove. Tiha in neizrečena zahvala pa zagotovo ostaja med ljudmi, katerim so novi in izdatnejši viri mineralne in termalne vode, odkriti z znanjem in požrtvovalnim delom inženirja Antona Nosana, zagotovili delo in s tem boljše in varnejše življenje.

Najpomembnejša objavljena dela:

Nosan, A. 1973: Termalni in mineralni vreli v Sloveniji. *Geologija*, 16: 5-81.

Nosan, A. 1959: Hidrogeologija Čateških toplic. *Geologija*, 5: 63-79.

Nosan, A. 1975: Nov vrelc mineralne vode v Spodnji Kostrivnici. *Geologija*, 18: 311-313.

Nosan, A. & Grad, K. 1955: Stratigrafske in tektonske razmere na južnem pobočju Bohorja. *Geologija*, 3: 110-115.

Pleničar, M. & Nosan, A. 1958: Paleogeografija panonskega obrobja v Sloveniji. *Geologija*, 4: 94-110.

Kuščer, D., Grad, K., Nosan, A. & Ogorelec, B. 1974: Geološke raziskave soške doline med Bovcem in Kobaridom. *Geologija*, 17: 426-476.

*Polona Kralj*

## Navodila avtorjem

**GEOLOGIJA** objavlja znanstvene in strokovne članke s področja geologije in sorodnih ved. Revija od leta 2000 izhaja dvakrat letno. Članke recenzirajo domači in tuji strokovnjaki z obravnavanega področja. Ob oddaji člankov avtorji predlagajo **tri recenzente**, vendar pa si uredništvo pridržuje pravico do izbire recenzentov po lastni presoji. Avtorji morajo članek popraviti v skladu z recenzentskimi pripombami ali utemeljiti zakaj se z njimi ne strinjajo.

**Avtorstvo:** Za izvirnost podatkov, predvsem pa mnenj, idej, sklepov in citirano literaturo so odgovorni avtorji. Z objavo v GEOLOGIJI se tudi obvežejo, da ne bodo drugje objavili prispevka z isto vsebino.

**Jezik:** Članki naj bodo napisani v angleškem, izjemo ma v slovenskem jeziku, vsi pa morajo imeti slovenski in angleški izvleček. Za prevod poskrbijo avtorji prispevkov sami.

### Vrste prispevkov:

#### Izvirni znanstveni članek

Izvirni znanstveni članek je prva objava originalnih raziskovalnih rezultatov v takšni obliki, da se raziskava lahko ponovi, ugotovitve pa preverijo. Praviloma je organiziran po shemi IMRAD (Introduction, Methods, Results, And Discussion).

#### Pregledni znanstveni članek

Pregledni znanstveni članek je pregled najnovejših del o določenem predmetnem področju, del posameznega raziskovalca ali skupine raziskovalcev z namenom povzeti, analizirati, evalvirati ali sintetizirati informacije, ki so že bile publicirane. Prinaša nove sinteze, ki vključujejo tudi rezultate lastnega raziskovanja avtorja.

#### Strokovni članek

Strokovni članek je predstavitev že znanega, s poudarkom na uporabnosti rezultatov izvirnih raziskav in širjenju znanja.

#### Diskusija in polemika

Prispevek, v katerem avtor ocenjuje ali dokazuje pravilnost nekega dela, objavljenega v GEOLOGIJI ali z avtorjem strokovno polemizira.

#### Recenzija, prikaz knjige

Prispevek, v katerem avtor predstavlja vsebino nove knjige.

**Oblika prispevka:** Besedilo pripravite v urejevalniku Microsoft Word. Prispevki naj praviloma ne bodo daljši od 20 strani formata A4, v kar so vštete tudi slike, tabele in table. Le v izjemnih primerih je možno, ob predhodnem dogovoru z uredništvom, tiskati tudi daljše prispevke.

Članek oddajte uredništvu vključno z vsemi slikami, tabelami in tablamami v elektronski obliki po naslednjem sistemu:

- Naslov članka (do 12 besed)
- Avtorji (ime in priimek, naslov, e-mail naslov)
- Ključne besede (do 7 besed)
- Izvleček (do 300 besed)
- Besedilo
- Literatura
- Podnaslovi k slikam in tabelam
- Tabele, Slike, Table

**Citiranje:** V literaturi naj avtorji prispevkov praviloma upoštevajo le tiskane vire. Poročila in rokopise naj navajajo le v izjemnih primerih, z navedbo kje so shranjeni. V seznamu literature naj bodo navedena samo v članku omenjena dela. Citirana dela, ki imajo DOI identifikator, morajo imeti ta identifikator izpisan na koncu citata. Za citiranje revije uporabljamo standardno okrajšavo naslova revije. Med besedilom prispevka citirajte samo avtorjev priimek, v oklepaju pa navajajte letnico izida navedenega dela in po potrebi tudi stran. Če navajate delo dveh avtorjev, izpišite med tekstom prispevka oba priimka (npr. PLENIČAR & BUSER, 1967), pri treh ali več avtorjih pa napišite samo prvo ime in dodajte et al. z letnico (npr. MLAKAR et al., 1992). Citiranje virov z medmrežja v primeru, kjer avtor ni poznan zapišemo (INTERNET 1). V seznamu literaturo navajajte po abecednem redu avtorjev.

Imena fosilov (rod in vrsta) naj bodo napisana poševno, imena višjih taksonomskih enot (družina, razred, itn.) pa normalno. Imena avtorjev taksonov naj bodo prav tako napisana normalno, npr. *Clypeaster pyramidalis* Michelin, *Galeanella tollmanni* (Kristan), Echinoidea.

### Primeri citiranja članka:

- MALI, N., URBANC, J. & LEIS, A. 2007: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environ. geol.*, 51/8: 1401–1412, doi:10.1007/s00254-006-0437-4.
- PLENIČAR, M. 1993: *Apricardia pachiniana* Sirna from lower part of Liburnian beds at Divača (Triest-Komen Plateau). *Geologija*, 35: 65–68.

### Primer citirane knjige:

- FLÜGEL, E. 2004: *Mikrofacies of Carbonate Rocks*. Springer Verlag, Berlin: 976 p.
- JURKOVŠEK, B., TOMAN, M., OGORELEC, B., ŠRIBAR, L., DROBNE, K., POLJAK, M. & ŠRIBAR, L. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote – Kredne in paleogenske kamnine 1 : 50.000 = Geological map of the southern part of the Trieste-Komen plateau – Cretaceous and Paleogene carbonate rocks. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 143 p., incl. Pls. 23, 1 geol. map.

### Primer citiranja poglavja iz knjige:

- TURNŠEK, D. & DROBNE, K. 1998: Paleocene corals from the northern Adriatic platform. In: HOTTINGER, L. & DROBNE, K. (eds.): *Paleogene Shallow Benthos of the Tethys*. Dela SAZU, IV. Razreda, 34/2: 129–154, incl. 10 Pls.

### Primer citiranja virov z medmrežja:

Če sta znana avtor in naslov citirane enote zapišemo: ČARMAN, M. 2009: Priporočila lastnikom objektov, zgrajenih na nestabilnih območjih. Internet: [http://www.geo-zs.si/UserFiles/1/File/Nasveti\\_lastnikom\\_objektov\\_na\\_nestabilnih\\_tleh.pdf](http://www.geo-zs.si/UserFiles/1/File/Nasveti_lastnikom_objektov_na_nestabilnih_tleh.pdf) (17. 1. 2010)

Če avtor ni poznan zapišemo tako:  
Internet: <http://www.geo-zs.si/> (22.10.2009)

Če se navaja več enot z medmrežja, jim dodamo še številko  
Internet 1: <http://www.geo-zs.si/> (15.11.2000)  
Internet 2: <http://www.geo-zs.si/> (10.12.2009)

**Slike, tabele in table:** Slike (ilustracije in fotografije), tabele in table morajo biti zaporedno oštevilčene in označene kot sl. 1, sl. 2 itn., oddane v formatu TIFF, JPG ali EPS z ločljivostjo 300 dpi. Le izjemno je možno objaviti tudi barvne slike, vendar samo po predhodnem dogovoru z uredništvom. Obvezno je treba upoštevati zrcalo revije **172 x 235 mm**. Večjih formatov od omenjenega zrcala GEOLOGIJE ne tiskamo na zgib, je pa možno, da večje oziroma daljše slike natisnemo na dveh straneh (skupaj na levi in desni strani) v vmesnim »rezom«. V besedilu prispevka morate omeniti vsako sliko po številčnem vrstnem redu. Dovoljenja za objavo slikovnega gradiva iz drugih revij publikacij in knjig, si pridobijo avtorji sami. Table pripravite v formatu zrcala naše revije.

Če je članek napisan v slovenskem jeziku mora imeti celotno besedilo, ki je na slikah in tabelah tudi v angleškem jeziku. Podnaslovi naj bodo čim krajši.

**Korekture:** Te opravijo avtorji člankov, ki pa lahko popravijo samo tiskarske napake. Krajši dodatki ali spremembe pri korekturah so možne samo na avtorjeve stroške.

Avtorji prejmejo 25 separatov brezplačno, sicer pa so prispevki dostopni tudi na internetnih straneh <http://www.geo-zs.si/slo-text/geologija.htm>.

### Oddajanje prispevkov:

Avtorje prosimo, da prispevke pošljejo na naslov uredništva: GEOLOGIJA  
Geološki zavod Slovenije  
Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana  
[bernarda.bole@geo-zs.si](mailto:bernarda.bole@geo-zs.si) ali [urednik@geologija-revija.si](mailto:urednik@geologija-revija.si)

Uredništvo Geologije

## Instructions for authors

**Scope of the journal:** **GEOLOGIJA** publishes scientific papers which contribute to understanding of the geology of Slovenia or to general understanding of all fields of geology. Some shorter contributions on technical or conceptual issues are also welcome. Occasionally, a collection of symposia papers is also published.

All submitted manuscripts are sent for review by at least two specialists. When submitting their paper, authors should recommend at least **three reviewers**. Note that the editorial office retains the sole right to decide whether or not the suggested reviewers are used. Authors should correct their papers according to the instructions given by the reviewers. Should you disagree with any part of the reviews, please explain why. Revised manuscript will be reconsidered for publication.

**Author's declaration:** Submission of a paper for publication in *Geologija* implies that the work described has not been published previously, that it is not under consideration for publication elsewhere and that, if accepted, it will not be published elsewhere.

**Language:** Papers should be written in English or Slovene, and should have both English and Slovene abstracts.

### Types of papers:

#### *Original scientific paper*

In an original scientific paper, original research results are published for the first time and in such a form that the research can be repeated and the results checked. It should be organised according to the IMRAD scheme (**I**ntroduction, **M**ethods, **R**esults, **A**nd **D**iscussion).

#### *Review scientific paper*

In an overview scientific paper the newest published works on specific research field or works of a single researcher or a group of researchers are presented in order to summarise, analyse, evaluate or synthesise previously published information. However, it should contain new information and/or new interpretations.

#### *Professional paper*

Technical papers give information on research results that have already been published and emphasise their applicability.

#### *Discussion paper*

A discussion gives an evaluation of another paper, or parts of it, published in *GEOLOGIJA* or discusses its ideas.

#### *Book review*

This is a contribution that presents a content of a new book in the field of geology.

### Style guide:

Submitted manuscripts should not exceed 20 pages of A4 format (12 pt typeface, 1 line-spacing, left justification) including figures, tables and plates. Only exceptionally and in agreement with the editorial board longer contributions can also be accepted.

Manuscripts submitted to the editorial office should include figures, tables and plates in electronic format ordered according to the following scheme:

- Title (*maximum 12 words*)
- Authors (*full name and family name, postal address and e-mail address*)
- Key words (*maximum 7 words*)
- Abstract (*maximum 300 words*)
- Text
- References
- Figure and Table Captions
- Tables, Figures, Plates

**References:** References should be cited in the text as follows: (FLÜGEL, 2004) for a single author, (PLENIČAR & BUSER, 1967) for two authors and (MLAKAR et al., 1992) for multiple authors. Pages and figures should be cited as follows: (PLENIČAR, 1993, p. 67) and (PLENIČAR, 1993, fig. 1). Anonymous internet resources should be cited as (INTERNET 1). Only published references should be cited. Manuscripts should be cited only in some special cases in which it also has to be stated where they are kept. Cited reference list should include only publications that are mentioned in the paper. Authors should be

listed alphabetically. Journal titles should be given in standard abbreviated form. A doi identifier, if there is any, should be placed at the end as shown in the first case.

Taxonomic names should be in italics, while names of the authors of taxonomic names should be in normal, such as *Clypeaster pyramidalis* Michelin, *Galeanella tollmanni* (Kristan), Echinoidea.

### Articles should be listed as follows:

MALI, N., URBANC, J. & LEIS, A. 2007: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environ. geol.*, 51/8: 1401–1412, doi:10.1007/s00254-006-0437-4.

PLENIČAR, M. 1993: *Apricardia pachiniana* Sirna from lower part of Liburnian beds at Divača (Triest-Komen Plateau). *Geologija*, 35: 65–68.

### Books should be listed as follows:

FLÜGEL, E. 2004: *Mikrofacies of Carbonate Rocks*. Springer Verlag, Berlin: 976 p.

JURKOVŠEK, B., TOMAN, M., OGORELEC, B., ŠRIBAR, L., DROBNE, K., POLJAK, M. & ŠRIBAR, Lj. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote – Kredne in paleogenske kamnine 1 : 50.000 = Geological map of the southern part of the Trieste-Komen plateau – Cretaceous and Paleogene carbonate rocks. *Geološki zavod Slovenije, Ljubljana*: 143 p., incl. Pls. 23, 1 geol. map.

### Book chapters should be listed as follows:

TURNŠEK, D. & DROBNE, K. 1998: Paleocene corals from the northern Adriatic platform. In: HOTTINGER, L. & DROBNE, K. (eds.): *Paleogene Shallow Benthos of the Tethys*. *Dela SAZU, IV. Razreda*, 34/2: 129–154, incl. 10 Pls.

### Internet resources should be listed as follows:

Known author and title:

ČARMAN, M. 2009: Priporočila lastnikom objektov, zgrajenih na nestabilnih območjih. Internet: [http://www.geo-zs.si/UserFiles/1/File/Nasveti\\_lastnikom\\_objektov\\_na\\_nestabilnih\\_tleh.pdf](http://www.geo-zs.si/UserFiles/1/File/Nasveti_lastnikom_objektov_na_nestabilnih_tleh.pdf) (17. 1. 2010)

Unknown authors and title:

Internet: <http://www.geo-zs.si/> (22.10.2009)

When more than one unit from the internet are cited they should be numbered:

Internet 1: <http://www.geo-zs.si/> (15.11.2000)

Internet 2: <http://www.geo-zs.si/> (10.12.2009)

**Figures, tables and plates:** Figures (illustrations and photographs), tables and plates should be numbered consequently and marked as Fig. 1, Fig. 2 etc., and saved as TIFF, JPG or EPS files and submitted at 300 dpi. Colour pictures will be published only on the basis of previous agreement with the editorial office. The maximum size of full-page illustrations and tables is **172 x 235 mm**. Larger formats can only be printed as a double-sided illustration (left and right) with a cut in the middle. All figures should be referred to in the text and should normally be numbered in the sequence in which they are cited. The approval for using illustrations previously published in other journals or books should be obtained by each author.

When a paper is written in Slovene it has to have the entire text which accompanies illustrations and tables written both in Slovene and English. Figure and table captions should be kept as short as possible.

**Proofs:** One set of page proofs (as pdf files) will be sent by e-mail to the corresponding author. Corrections are made by the authors. They should correct only typographical errors. Short additions and changes are possible but should be paid by the authors.

**Offprints:** Authors receive 25 offprints free of charge. As *Geologija* is an open access journal, all pdfs can be downloaded from its website: <http://www.geo-zs.si/slo-text/geologija.htm>.

**Submission:** Authors should submit their papers to the address of the editorial office:

### **GEOLOGIJA**

Geological Survey of Slovenia

Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana, Slovenia

bernarda.bole@geo-zs.si or urednik@geologija-revija.si

The Editorial Office



- 5 Miler, M. & Gosar, M.  
Dve leti raziskav meteorita Javorje
- 17 Gale, L.  
Rhaetian foraminiferal assemblage from the Dachstein Limestone of Mt. Begunjščica (Košuta Unit, eastern Southern Alps)
- 45 Oprčkal, P., Gale, L., Kolar-Jurkovšek, T. & Rožič, B.  
Dokaz za norijsko-retijsko natezno tektoniko v Slovenskem bazenu (Južne Alpe)
- 57 Mikuž, V., Škedelj - Petrič, A. & Bartol, M.  
Anelidi v miocenskem litotamnijskem apnencu iz Zgornje Pohance
- 67 Mikuž, V., Gašparič, R., Bartol, M., Horvat, A. & Pavšič, J.  
Miocenski pteropodi s Poličkega Vrha v Slovenskih goricah
- 77 Dozet, S., Kanduč, T. & Markič, M.  
A contribution to petrology of dark grey to black interbeds within Upper Permian and Triassic carbonate rocks in the area between Ljubljana and Bloke, Central Slovenia
- 93 Ali, M.A.  
Mineral chemistry of monazite-(Nd), xenotime-(Y), apatite, fluorite and zircon hosting in lamprophyre dyke in Abu Rusheid area, South Eastern Desert, Egypt
- 107 Šram, D., Brenčič, M., Lapanje, A. & Janža, M.  
Prostorski model visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju
- 117 Rajver, D., Lapanje, A. & Rman, N.  
Možnosti proizvodnje elektrike iz geotermalne energije v Sloveniji v naslednjem desetletju
- 141 Štibelj, K.  
Uporaba različnih preiskovalnih metod tal za forenzični namen