

GEOLOGIJA

2012 | št.: **55/2**



Geološki zavod Slovenije
Geological Survey of Slovenia

ISSN 0016-7789
ISSN 1854-620X

GEOLOGIJA

55/2 – 2012



GEOLOGIJA	2012	55/2	157–288	Ljubljana
------------------	-------------	-------------	----------------	------------------

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 55/2 je bila sprejeta na seji Uredniškega odbora, dne 11. 12. 2012.

Manuscripts of the Volume 55/2 accepted by Editorial and Scientific Advisory Board on December 11, 2012.

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

Tehnična urednica / Technical Editor: BERNARDA BOLE

Uredniški odbor / Editorial Board

DUNJA ALJINOVIC

Rudarsko-geološki naftni fakultet, Zagreb

MIHAEL BRENČIČ

Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani

GIOVANNI B. CARULLI

Dip. di Sci. Geol., Amb. e Marine, Università di Trieste

KATICA DROBNE

Znanstveno Raziskovalni Center SAZU, Ljubljana

JADRAN FAGANELI

Nacionalni inštitut za biologijo, MBP, 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

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

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

FGG in geodezijo, Univerza v Ljubljani

Častni člani / Honorary Members

MATIJA DROVENIK

Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana

DANILO RAVNIK

Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani

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.

Recenzenti / Reviewers (2008 – 2012)

Atanackov Jure, Auersperger Primož, Bajraktarević Zlatan, Beguš Tomaž, Biester Harald, Bonacci Ognjen, Brenčič Mihael, Celarc Bogomir, Cimerman Franc, Conrad Marc Andre, Čar Jože, Čarman Magda, Čenčur Curk Barbara, Dolenc Matej, Dolinar Bojana, Drobne Katica, Faganeli Jadran, Gosar Mateja, Heat Ester, Herlec Uroš, Janež Jože, Jež Jernej, Jurkovšek Bogdan, Knez Martin, Koch Roman, Kočvar Marko, Kompare Boris, Kosjek Tina, Kralj Polona, Kreft Marko, Lapanje Andrej, Mali Nina, Marjanac Tihomir, Mikoš Matjaž, Miler Miloš, Miljević Nada, Mirtič Breda, Novak Matevž, Ogorelec Bojan, Oštir Krištof, Pavlovec Rajko, Pavšič Jernej, Pezdič Jože, Pezdir Gorazd, Pirc Simon, Placer Ladislav, Pleničar Mario, Poljak Marijan, Ratej Jože, Rettori Roberto, Ribičič Mihael, Rožič Boštjan, Skaberne Dragomir, Sudar Milan, Šajn Robert, Šmuc Andrej, Šturm Sašo, Šušteršič France, Trajanova Mirka, Turnšek Dragica, Veselič Miran, Vižintin Goran, Vrabac Sejfudin, Vukadin Vladimir, Zupančič Nina, Žibret Gorazd



Slika na naslovni strani: Visokotemperaturno geotermalno polje Wairakli – Nova Zelandija (foto: Elvin Marcelo)

Cover page: Wairakli high-temperature geothermal field, New Zealand (photo: Elvin Marcelo)

VSEBINA – CONTENTS

<i>Brenčič, M.</i> Uvodnik	161
<i>Ambrožič, B., Šturm, S., Jeršek, M. & Mirtič, B.</i> Klasifikacija kamnitih meteoritov in hondrul – primer meteorita Jesenice Classification of stony meteorites and chondrules – the case of meteorite Jesenice	163
<i>Dozet, S. & Ogorelec, B.</i> Younger Paleozoic, Mesozoic and Tertiary oolitic and oncolitic beds in Slovenia – An Overview Mlajše paleozojske, mezozojske in terciarne oolitne in onkolitne plasti v Sloveniji – Pregled	181
<i>Nádor, A., Lapanje, A., Tóth, G., Rman, N., Szócs, T., Prestor, J., Uhrin, A., Rajver, D., Fodor, L., Muráti, J. & Székely, E.</i> Transboundary geothermal resources of the Mura-Zala basin: a need for joint thermal aquifer management of Slovenia and Hungary Čezmejni geotermalni viri Mursko-Zalskega bazena: potreba po skupnem upravljanju geotermalnih vodonosnikov Slovenije in Madžarske	209
<i>Rman, N., Lapanje, A. & Rajver, D.</i> Analiza uporabe termalne vode v severovzhodni Sloveniji Analysis of thermal water utilization in the northeastern Slovenia	225
<i>Koroša, A. & Mali, N.</i> Pregled novih organskih onesnaževal v podzemni vodi v Sloveniji Review of emerging organic pollutants in groundwater in Slovenia	243
<i>Mikuž, V. & Bartol, M.</i> A new cephalopod find in the Eocene beds near Grdoselo in Istria, Croatia Nova najdba glavonožca v eocenskih plasteh pri Grdoselu v Istri	263
<i>Mikuž, V., Bartol, M. & Ulaga, Š.</i> Ramenonožec <i>Lingula</i> iz srednjemiocenskih – badenijskih plasti Slovenije The brachiopod <i>Lingula</i> from the Middle Miocene – Badenian beds of Slovenia	271
<i>Jeršek, M. & Milič, Z.</i> Ferromangan – izvrstna imitacija kovinskega meteorita Ferromanganese – an excellent imitation of metallic meteorite	275
Nova knjiga	
<i>Dimkovski, T.</i> : Nahajališča nekovinskih mineralnih surovin v Sloveniji – Površinski kopi II. del, Mineralne surovine za potrebe gradbeništva	279
Poročila	
<i>Komac, M.</i> : 34. Mednarodni geološki kongres, Brisban, Avstralija, 5.–12. 8. 2012	280
<i>Brenčič, M.</i> : 39. Mednarodni hidrogeološki kongres, Niagara Falls, Kanada 16.–21. 9. 2012	280
<i>Brenčič, M.</i> : 6. Hidrogeološki kolokvij, Ljubljana 22. 11. 2012	281
<i>Mencin, E.</i> : Predstavitev Društva študentov geologije	282

Nekrolog

Brenčič, M., Veselič, M. & Placer, L.

V spomin prof. dr. Dušanu Kuščerju	284
Navodila avtorjem	286
Instructions to authors	287

Uvodnik

Slovenska znanost se je kot del družbene nadstavbe znašla v veliki krizi in geologija pri tem ni nobena izjema. Toda pri tem se seveda vprašamo ali je to tudi kriza vrednot znanosti ali pa je to zgolj posledica zmanjšanja sredstev za njeno delovanje? Čeprav se zdi, da je pravilen slednji odgovor, pravi odgovor ni tako preprost. Znanost mora, ne glede kako jo razumemo, družbi pomagati in jo voditi. Torej je sedanja družbena kriza tudi posledica preteklega delovanja znanosti, ki se ni znala prilagoditi razmeram in ni znala pravočasno ponuditi ustreznih rešitev. Je tudi posledica delovanja znanstvenikov v slonokoščenih stolpih ozke specializacije posameznih disciplin, ko drug drugega ne razumemo več, ker je znanje tako zelo ozko in posebno. Hkrati to potrjuje, da je širše sodelovanje nujno. V moderni znanosti je uspeh možen predvsem takrat, kadar se problemov lotijo znanstveni kolektivi sestavljeni iz različnih profilov in prihajajoč iz različnih okolij. In kje se je znotraj tega znašla slovenska geologija?

Tako kot ostale znanstvene vede se slovenska geologija bori za svoj kos pogače in morda ji produkcija naravnana družba in politika ta trenutek nista najbolj naklonjeni, a hkrati je to velika prilika. Kriza v kateri smo se znašli ni zgolj kriza pomanjkanja ekonomskih sredstev, temveč je bolj kot to posledica pomanjkanja celostnega pogleda na svet, odsotnost razumevanja prepletenosti narave in civilizacije. Na to nas opominjajo tako spremenljivost klime, vplivi na okolje, ki jih povzroča človek, kot tudi vse posledice, ki izhajajo iz tega. Če se samo ozremo na posledice poplav, ki so divjale po Sloveniji v začetku novembra in so jih številne stroke sprejele kot nekaj posvem nenadejanega, zlasti za področje Podravja, bo geologova sposobnost razumevanja časa in prostora pokazala, da navkljub veliki škodi in osebnim tragedijam ljudi, ki jih je poplavlila visoka voda, ta dogodek geološko gledano ni prav nič izjemnega. Če je bil način izpusta poplavnega vala napaka, količina vode, ki je tekla po strugi ni bila nenavadna. Vpogled v profile kvartarnih plasti Ptujkega polja, ki jih je pri svojem divjanju odkrila Drava, pokaže, da so ti dogodki stalnica. Spreminjanje struge, nasipavanje vršajev in sipin, to so za Dravo le kratke vsakdanje epizode njene dolge zgodovine.

In prav to je tisto, kar geologe loči od drugih in jim na široko odpira vrata v povezovanje z drugimi. Razumevanje časa in prostora, predvsem pa razumevanje Narave, ne samo skozi tukaj in zdaj, temveč neprestano, od začetka in v prihodnost. Ko pregledujemo dosežke slovenskih geologov, predvsem skozi objave v mednarodnih revijah opazimo, da ne posegajo več zgolj na tradicionalna področja geologije, temveč se vedno bolj in bolj uveljavljajo na področjih, ki jih opredelimo kot interdisciplinarne ali celo transdisciplinarne. Naše znanje je torej takšno, da odpira nove poti in sproža nove ideje.

V poenostavljenem razumevanju znanosti je zgolj ideja tista, ki uveljavlja znanstvenika, pa ni tako. Ideja je pomembna, ni pa zadostna. Še pomembnejše je natančno in vztrajno delo. Rezultati tega dela so postopni, in postopno jih je potrebno tudi predstavljati. In revija Geologija je ena od teh stopnic, je predpriprava za mednarodno izjemnost. Če ne izgradiš temelja, tudi razgleda ne bo. Revija Geologija je na prvi pogled le ena v množici geoloških revij. Že v Sloveniji ji družbo delajo druge geološke revije, kaj šele v srednjeevropskem prostoru, ali še širše v globalnem svetu. Pa kljub temu revija Geologija ni le ena izmed njih. Brez lažne skromnosti lahko zapišemo, da gre za osrednjo geološko revijo za območje ozemlja Slovenije in širše. Vsakdo, ki deluje na področju geoloških raziskav v Sloveniji in tudi v širšem območju Dinaridov in vzhodnih Alp, revijo prebira in jo mora uporabljati pri svojem delu. To je tako rezultat dolge tradicije, katere začetki segajo v leto 1953, kot tudi rezultat nove razvojno naravnane uredniške politike, ki je nastala iz spoja izkušenj starejših kolegov in iz vizije mlajše generacije. Takšna naravnost se že odraža v mednarodni odmevnosti revije in upajmo, da nas pripelje tudi na zemljevid svetovno relevantnih revij indeksiranih v referenčnih bazah.

V današnjem modernem svetu je postal splet medij brez katerega ne moremo več delovati, ne v znanosti in ne v stroki, celo več, prišli smo tako daleč, da publikacije, ki se ne pojavlja na spletu ali v bazah založb ali odprtih zbirkah ni, pa če je natisnjena še v tako všečni obliki. Na tem področju je naša revija naredila velik napredek, poleg referiranja v bazi GeoRef se je priključila bazi revij DOAJ – Directory of Open Access Journals (Arhiv revij z odprtim dostopom) in pridobila pravico uporabe *doi* številke, ki enoznačno opredeljuje vsakega od objavljenih člankov. V najpomembnejši referenčni bazi Web of Science, ki jo naša agencija za raziskave uporablja kot merilo odmevnosti znanstveno raziskovalnega dela, so se že pričele pojavljati reference iz revije skupaj z *doi* številko. Ta seveda ni namenjena sama sebi, omogoča hitrejšo iskanje člankov predvsem pa hitro in zelo učinkovito navzkrižno citiranje, kar še dodatno poveča možnost odmevnosti članka. Zaradi tega je zelo pomembno, da vsi, ki objavljamo znanstvene članke v kar največji meri zajemamo iz objav v reviji Geologija, jih citiramo in se nanje ustrezno sklicujemo, tudi z uporabo *doi* številke.

Internetne tehnologije se razvijajo izredno hitro. Temu trendu moramo slediti tudi z našo revijo, a to ni le obvladovanje tehnologije, temveč tudi razumevanje časa. Geologija je veda z zelo dolgo tradicijo in velikim intelektualnim kapitalom, naj se razvija še naprej, tudi skozi objavljanje v osrednji slovenski geološki reviji Geologija.

Klasifikacija kamnitih meteoritov in hondrul – primer meteorita Jesenice

Classification of stony meteorites and chondrules – the case of meteorite Jesenice

Bojan AMBROŽIČ¹, Sašo ŠTURM², Miha JERŠEK³ & Breda MIRTIC¹

¹Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana; e-mail: bojan.ambrozic@siol.net

²Institut Jožef Stefan, Jamova 39, SI-1000 Ljubljana

³Prirodoslovni muzej Slovenije, Prešernova 20, SI-1000 Ljubljana

Prejeto / Received 31. 5. 2012; Sprejeto / Accepted 29. 11. 2012

Ključne besede: kamniti meteoriti, meteorit Jesenice, hondrule, klasifikacija, mineralna sestava, kemična sestava

Key words: stony meteorites, meteorite Jesenice, chondrules, mineral composition, chemical composition, classification

Izvleček

Predstavljen je izvor meteoritov s posebnim poudarkom na kamnitih meteoritih hondritih, katerih predstavnik je tudi meteorit Jesenice, ki je navadni L hondrit. Ker v hondritih hondrule predstavljajo večinski delež mase, so v drugem delu posebej predstavljene njihove morfološke, strukturne, petrološke, mineraloške in kemične značilnosti. Predstavljene so teorije o nastanku hondrul in ostalih struktur hondritov. Podan je sistematičen pregled načinov delitev meteoritov. Klasifikacije se med sabo razlikujejo v odvisnosti od značilnih geokemijskih parametrov in mineraloških lastnosti meteoritov. V članku so uporabljeni tudi nekateri novi slovenski strokovni izrazi, povezani z meteoriti in mineralnim materialom. Klasifikacija meteorita Jesenice je bila narejena na podlagi makroskopsko in mikroskopsko prepoznavnih značilnosti. Meteorit Jesenice smo razvrstili na podlagi stopnje udarne metamorfoze, stopnje preperelosti, petroloških značilnosti in kemijske sestave olivina. Ugotovili smo, da je meteorit Jesenice nediferenciran navadni hondrit z nizko vsebnostjo železa, ki je šibko udarno metamorfiziran ter šibko preperel, kar je v skladu z razvrstitvijo, ki jo je opravili tudi Bischoff s sodelavci.

Abstract

In the first part of the paper there is a description about genesis of meteorites, in particularly about stony meteorites – chondrites, since meteorite Jesenice is an ordinary L chondrite. Chondrules represent main part of the mass of chondritic meteorites. For this reason the second part of the paper talks about morphology, texture, mineralogy and chemical properties of chondrules. Main theories about chondrule formation and other distinctive textures found in chondrites are also presented. The paper also presents a review across different meteorite classifications. Meteorite classifications differ depending on the geochemical and mineralogical properties of meteorites. In this paper are also used some new Slovenian terms correlated with the science of meteorites and mineral materials. Classification of meteorite Jesenice is based on its macroscopic and microscopic characteristics. We classified meteorite Jesenice on the basis of shock metamorphosis, grade of weathering, petrological properties and chemical composition of olivine. We found out that meteorite Jesenice is weakly shocked weakly weathered undifferentiated low total iron ordinary chondrite. Our results are in agreement with findings of Bischoff and his colleagues.

Uvod

Leta 2009 je na območje Mežakle padel meteorit (sl. 1), ki je dobil uradno ime meteorit Jesenice (SPURNÝ et al., 2010). Večino kosov meteorita danes hrani Prirodoslovni muzej Slovenije. Slovenski geologi smo tako dobili možnost preveriti in poglobiti znanje mineralogije tudi s proučevanjem tega meteorita. Pri tem se je pokazalo, da sta poleg poznavanja mineralogije meteoritov in njihove geneze pomanjkljiva tudi poznavanje metodologije karakterizacije meteoritov ter slovensko izrazoslovje, povezano z meteoriti.

Kot je bilo pričakovati, se je izkazalo, da se klasifikacije meteoritov spreminjajo ali dopolnjujejo, odvisno od njihovega avtorja. Pokazalo se je tudi, da avtorji za svojo klasifikacijo ne uporabljajo enakih parametrov oz. lastnosti meteoritov. Zato posamezne klasifikacije med seboj sploh niso primerljive. S časom pa se spreminjajo tudi zato, ker se metode preiskav razvijajo in še včeraj popolnoma neznana lastnost postane danes pomemben dejavnik, po katerem razlikujemo in klasificiramo meteorite.

Vendar pa je za prepoznavanje meteoritov potrebno najprej osnovno poznavanje procesov na-



Sl. 1. Meteorit Jesenice. Rumeno-rjave lise so sekundarni železovi minerali, ki so posledica oksidacije železovih mineralov. Črni sloj je žgalna skorja meteorita.

Fig. 1. Meteorite Jesenice. Brown-yellow rims are secondary iron minerals, which were formed by oxidation of iron minerals. Black layer is fusion crust.

stanka meteoritov. Tudi to poznavanje ne daje enega samega odgovora in zato v nadaljevanju podajamo najpomembnejša dognanja o njihovem nastanku, ki jih povzemamo po monografijah avtorjev Searsa (SEARS, 2004) in Nortona (NORTON, 2002).

V članku je predstavljen primer klasifikacije meteorita Jesenice na podlagi morfoloških in strukturnih značilnosti, ki so vidne in prepoznavne z optičnim mikroskopom v presevni svetlobi in z opazovanjem poliranega zbruska z odbitimi elektroni z vrstičnim elektronskim mikroskopom. Preiskave so bile narejene na Oddelku za geologijo NTF UL in na Inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani.

Nastanek in klasifikacija meteoritov

Sončev sistem, katerega del je tudi Zemlja, je nastal, ko se je gravitacijsko sesedel oblak medzvezdne mase plinaste in trdne snovi. Iz obeh skupaj je nato nastala Sončeva meglica. Velika večina te mase se je zaradi gravitacije koncentrirala v protozvezdo, drugi del trdne snovi v obliki prahu pa se je s plinasto maso združil v primitiven planetarni material – meglični sediment ali celo v večje telo – planetezimal. Zato imajo prvotna telesa meteoritov iz različnih območij v Sončevi meglici različno kemično sestavo in strukturo (SEARS, 2004). Meteoriti oz. pripadajoči meteoroidi imajo različna izvorna območja. Navadni hondriti so nastali v notranjem delu asteroidnega pasu, kjer so bili izpostavljeni višjim temperaturam in so izgubili večji del lahkih komponent. Ogljikovi hondriti pa vsebujejo več lahkih komponent, kar dokazuje, da so nastali v zunanjih predelih asteroidnega pasu (WASSON (1985 v SEARS, 2004), WEISBERG et al., 2006). Za CI ogljikov hondrit Orgueil obstaja celo sum, da je nastal izven asteroidnega pasu, v kometni orbiti (GOUNELLE et al., 2010). Asteroidni pas je predel osončja, ki ga omeujeta orbiti

Marsa in Jupitra. Asteroidi predstavljajo telesa, ki se med nastajanjem planetov niso združila v večje planete. Večina asteroidov v asteroidnem pasu je bila izpostavljena številnim medsebojnim trkom. Nekateri fragmenti teh asteroidov so se kasneje združili v nove asteroide, imenovane tudi kup gravitacijsko šibko vezanega drobirja (*angl. rubble pile*) (ATANACKOV et al., 2010). V osrednjem delu asteroidnega pasu so številni asteroidi zelo različnih dimenzij, na katerih je možno raziskovati različne stopnje gravitacijske diferenciacije in nastanek planetov.

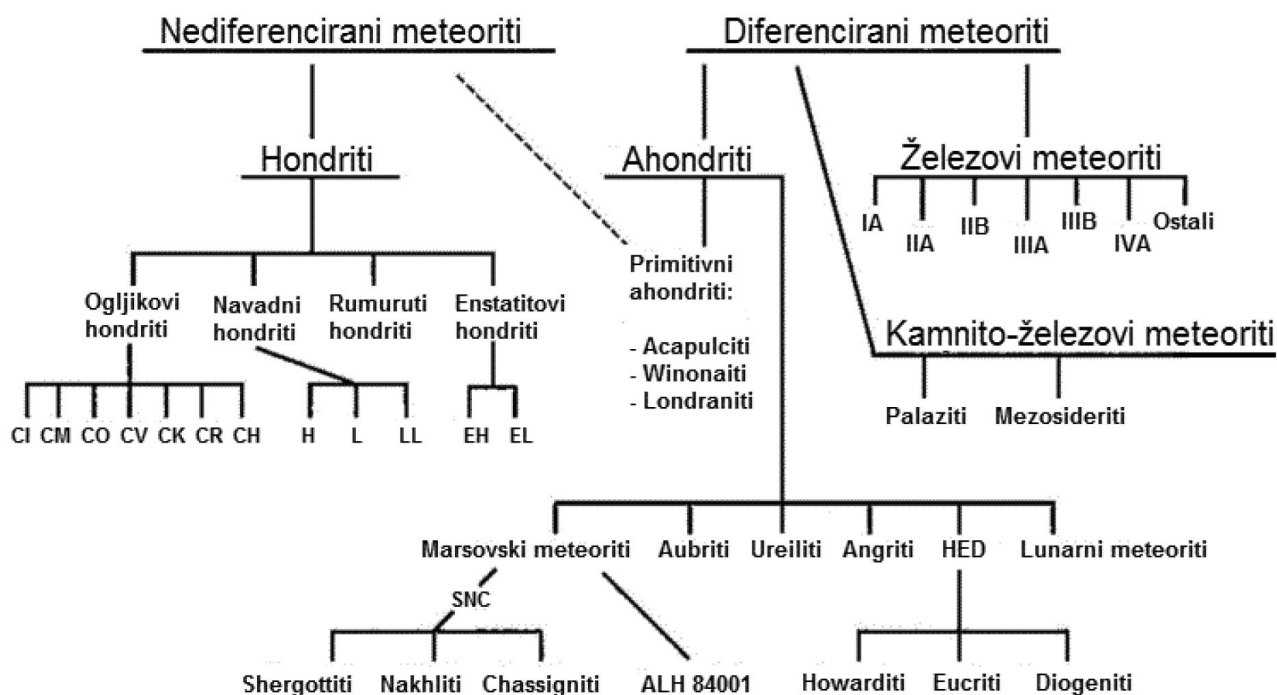
Meteoriti so v času svojega obstoja med potovanjem po vesolju izpostavljeni tudi zunanjim fizikalnim vplivom, katerih posledice se lahko v obliki strukturnih sprememb odražajo na telesu meteorita. Ena takih posledic je metamorfoza, ki jo je povzročil trk z drugim telesom. Druge pomembne spremembe se dogajajo, ko je meteorit izpostavljen spremenjenim pogojem temperature in tlaka atmosfere na površini Zemlje. Prej stabilni minerali, ki sestavljajo telo meteorita, se pričnejo spreminjati – preperevati. Preperevanje je značilnost procesov, ki jim je meteorit izpostavljen v prisotnosti kisika (Zemljina atmosfera) ter drugih fizikalnih in kemijskih procesov na Zemljskem površju. Oba pojava, tako udarna metamorfoza kot procesi preperevanja v atmosferskih razmerah, vplivajo na sestavo in strukturo meteorita, zaradi katerih meteorite še dodatno klasificiramo.

Pregled klasifikacij meteoritov je v svoji diplomski nalogi že naredila CURK (2009). Danes veljavna klasifikacija meteoritov sloni na razlikovanju znanih meteoritov glede na njihovo kemično in mineralno sestavo ter glede na izotopsko sestavo kisika (DAVIS, 2005).

Meteorite delimo glede na način nastanka iz matične trdne in plinaste snovi, iz katere so nastali in ki posledično vpliva na strukturo telesa meteorita, na nediferencirane in diferencirane (sl. 2).

Nediferencirani meteoriti so deli planetezimalov, ki v vsej svoji zgodovini niso bili nikoli izpostavljeni tako visoki temperaturi in tlaku, da bi se lahko vsaj delno stalili. Zaradi tega se njihova kemična sestava v splošnem ne razlikuje od sestave starševskega telesa oz. planetezimala. Nekaterne razlike v kemični sestavi so posledica nehomogenosti v masi starševskega telesa, Sončeve meglice, iz katere izhajajo ter v spremembah zaradi neravnotežnih pogojev med nastankom trdne snovi meteorita. Predstavniki nediferenciranih meteoritov so hondriti.

Diferencirani meteoriti so deli planetezimalov ali starševskih teles, ki so se zaradi svoje velikosti močno segreli, delno natalili in ponovno kristalili. Pri tem je prišlo do diferenciacije starševskega telesa meteorita v več slojev: npr. jedro, plašč in skorjo. Različni sloji starševskega telesa meteoritov se med seboj razlikujejo v kemični in mineraloški sestavi. Zato je sestava diferenciranih meteoritov tudi drugačna od sestave matične mase planetezimala in / ali Sončeve meglice. Med diferencirane meteorite spadajo tudi ahondriti.



Sl. 2. Klasifikacijska shema meteoritov (povzeto po INTERNET 2)

Fig. 2. Classification scheme of meteorites (adopted according to INTERNET 2)

Meteoriti se po sestavi delijo na kamnite, železove in kamnito-železove meteorite. Po podatkih iz spletne baze podatkov vseh doslej znanih meteoritov muzeja The Meteoritical Society (INTERNET 1) je kamnitih meteoritov (skupno padcev in najdb) daleč največ (95,6 %), medtem ko je železovih meteoritov 3,8 % in kamnito-železovih le 0,5 %. Za preostale najdbe (0,1 %) pa bodisi ni nedvoumno dokazano, da gre za prave meteorite, bodisi niso še klasificirane. Pregled železovih meteoritov sta predstavila že Miler in Gosarjeva (MILER & GOSAR, 2012), ko sta raziskovala železov meteorit iz Javorij (MILER & GOSAR, 2011), kratek pregled kamnitih meteoritov pa je naredila CURK (2009). Za posamezne razrede meteoritov (železove, hondrite, ahondrite) obstajajo podrobnejše klasifikacije. Kamnite meteorite lahko sestavljajo hondrule. Potem govorimo o hondritih. Če kamnit meteorit ne vsebuje hondrul, pa govorimo o ahondritih CURK (2009).

Nadalje se meteoriti delijo v posamezne skupine na osnovi značilnosti meteorita (sl. 2), po kateri se razlikuje od ostalih meteoritov (mineralna ali kemična sestava značilnega minerala, mesto najdbe, ime najditelja, ...). Po tej značilnosti se skupina tudi imenuje. Tako je npr. enstatitov hondrit ime skupine meteoritov glede na prevladujoč mineral enstatit. Nekateri meteoriti posamezne skupine pa se delijo še v podskupine. Te podskupine imajo lahko svoje ime ali samo oznako v obliki kratice (npr. H, L, LL, EH, CI, itd...). Npr. oznaka L pomeni, da gre za navadni hondrit z nizko vsebnostjo železa.

Prva značilnost meteoritov iz razreda hondritov, ki jo lahko opazimo s prostim očesom na površini meteorita, zagotovo pa na svežem prelomu, je pojav hondrul. Hondrule so makroskopsko pa tudi mikroskopsko vidnih dimenzij. Vidne so bile tudi na meteoritu Jesenice, zaradi česar smo

ga zlahka uvrstili med meteorite hondrite, ki spadajo med nediferencirane kamnite meteorite.

Večina meteoritov je bila v svoji dolgi zgodovini izpostavljena določeni stopnji udarne metamorfoze (SOKOL et al., 2005). Stöffler, Keil in Scott (1991) so meteorite glede na stopnjo metamorfoze razdelili v šest skupin. Stöffler-Keil-Scottova lestvica udarne metamorfoze (STÖFFLER et al., 1991 v NORTON, 2002) se opira na lastnosti olivina ter plagioklaza, ki so vidne z optičnim mikroskopom. Ker lestvica temelji na teh dveh mineralih, je primerna predvsem za določevanje stopnje udarne metamorfoze v navadnih hondritih. Lestvica je razdeljena na stopnje od S1 do S6 na podlagi napredujoče stopnje metamorfoze:

- S1 – nemetamorfozirani meteoriti: v zrnih olivina in plagioklaza se pojavljajo posamezne drobne nepravilne razpoke. Olivin pod presevnim mikroskopom ne kaže nobene valovite potemnitve. Meteorit je bil izpostavljen tlaku, ki ni presegal 5 GPa.
- S2 – zelo šibko metamorfozirani meteoriti: zrna olivina in plagioklaza kažejo valovito potemnitev. Zrna olivina so preprejena z nepravilnimi razpokami. Tlak je znašal 5-10 GPa.
- S3 – šibko metamorfozirani meteoriti: v olivinu so planarne ali udarne razpoke, ki so vzporedne s kristalografskimi ploskvami. Poleg tega olivin kaže izrazito valovito potemnitev. V tej stopnji glinenec ne kaže planarnih razpok. Prisotne so žile, zapolnjene z nepresevnost talino. Tlak je znašal 15-20 GPa.
- S4 – srednje metamorfozirani meteoriti: v olivinu in plagioklazih so planarne razpoke. Poleg njih ima olivin mozaično teksturo. Plagioklaz (oligoklaz) začne prehajati v steklo maskelynit. Tlak je znašal 30-35 GPa.
- S5 – močno metamorfozirani meteoriti: oligoklaz popolnoma preide v steklo maskelynit z

identično kemično sestavo, kot jo imajo plagioklazi. Olivin ima izrazito mozaično teksturo. Meteorit postane prepreden z žepi in žilami, ki jih je zapolnila talina (LLORCA et al., 2009). Tlak je znašal 45–55 GPa.

- S6 – zelo močno metamorfozirani meteoriti: olivin in piroksen rekristalizirata v trdno raztopino (JANOTS, 2011). Nekateri kristali olivina rekristalizirajo v ringwoodit. Maskelynit se spremeni v običajno steklo. Tlak je znašal 75–90 GPa.

Višja udarna metamorfoza kot pri stopnji S6, meteorit stali, uniči hondritno strukturo in ga spremeni v nov tip meteoritov, imenovan udarne breče (*angl. impact melt breccias*) (KEIL et al., 2008).

Z izrazom termična metamorfoza označujemo spremembe v mineralni sestavi in strukturi zunanjih delov telesa meteorita – skorje zaradi segrevanja telesa meteorita, ko le-ta potuje skozi Zemljino ozračje. Zaznamo jo kot taljenje posameznih mineralov in nastanek steklaste faze (LENART et al., 2010).

V primeru meteorita Jesenice, zrna kažejo valovito potemnitev ter vsebujejo planarne razpoke, kar je opazno z optičnim mikroskopom v presewni svetlobi. Oboje predstavlja dokaz za šibko stopnjo metamorfoze. Meteorit Jesenice je bil uvrščen v S3 stopnjo metamorfoze (BISCHOFF et al., 2011).

»Naravno« okolje meteoritov je skorajda popoln vakuum vesolja. Oksidacijske razmere v Zemljini atmosferi pa povzročajo zelo hitro kemično preperevanje meteoritov (SOKOL et al., 2005). WLOTZKA (1993) je meteorite razdelil glede na napredujočo stopnjo preperevanja v 7 razredov od nepreperelih (W0) do popolnoma preperelih (W6):

- W0: oksidacija s prostim očesom ni opazna. V presewni svetlobi pod optičnim mikroskopom opazimo rumeno-rjavkasto limonitno obarvanje.
- W1: v manjši meri se okoli kovinskih mineralov pojavljajo oksidacijski robovi. V posameznih žilah in razpokah je opazna oksidacija.
- W2: napredujoča oksidacija kovinskih mineralov prizadene 20–60 % kovinskih zrn.
- W3: 60–95 % kovinskih mineralov in troilita je nadomeščenih s sekundarnimi železovimi minerali.
- W4: popolna (več kot 95 %) oksidacija kovinskih mineralov in troilita. Spremembe v silikatih še niso prisotne.
- W5: olivin in piroksen sta deloma spremenjena predvsem vzdolž razpok.
- W6: silikatni minerali so močno spremenjeni in nadomeščeni z glinenimi minerali ter oksidi.

V primeru meteorita Jesenice na prelomni površini meteorita, ki je nastala, ko je meteorit udaril ob tla in razpadel na več manjših kosov, lahko že s prostim očesom vidimo oksidacijski rob okrog zrn kovinskih mineralov. Nastal je kot posledica oksidacije teh mineralov v podnebnih razmerah na Mežakli. Glede na velikost oksidacijskega roba je meteorit Jesenice uvrščen na lestvici preperelosti v stopnjo W0 do W1 (sl. 1).

Nastanek in klasifikacija hondritov

Kamniti meteoriti hondriti so dobili ime po hondrolah, ki v njih prevladujejo. Starost hondritov je bila določena z absolutnimi datacijami z radioaktivnimi izotopi Sr, Pb in Nd na povprečno 4.56 milijarde let, kar ustreza starosti Zemlje in astrofizikalnim ocenam starosti Sonca (SEARS, 2004). Hondriti naj bi nastali s procesi akrecije (SOKOL et al., 2007), aglomeracije, brečizacije in končnega oblikovanja (*angl. final assembly*) (SEARS, 2004). Proces akrecije naj bi obsegali bodisi zgoščevanje (nebularnega) prahu Sončeve meglice v planetezimale, bodisi zbiranje tega prahu na površini planetezimalov. V procesu aglomeracije naj bi nebularni prah predstavljal osnovo za nastanek kamnine na površini planetezimalov. Brečizacija je posledica udarne sile (trk z drugim telesom), zaradi katere je planetezimal razpadel. Nastali fragmenti so se kasneje ponovno združili v brečasta telesa. Končno oblikovanje pa pomeni združitev materiala v meteoroidne in asteroide, kot jih vidimo danes.

Meteoriti iz razreda hondritov se v osnovi delijo v več različnih skupin hondritov. Med temi je za skupino ogljikovih hondritov značilno, da so tekom svoje zgodovine prestali določeno metamorfozo, povezano z vodo (NORTON, 2002). Meteoriti iz skupine navadnih hondritov ter ogljikovi hondriti iz podskupin CV, CO in CH, pa so bili izpostavljeni določeni stopnji termične metamorfoze (SEPP et al., 2001). Pri hondritih petrološkega tipa 3 je ta potekala pri temperaturi pod 600 °C, pri petrološkem tipu 4 pri 600–700 °C, pri petrološkem tipu 5 pri 700–750 °C in pri petrološkem tipu 6 pri 750–950 °C (SEARS, 2009).

Z metodo Ar-Ar so raziskovalci ugotovili, da je bila večina meteoritov izpostavljena kozmičnemu sevanju vesolja le nekaj milijonov let. To pomeni, da so bili meteoriti prej del večjih teles oz. asteroidov, ki so kasneje razpadli. Večina H hondritov je bila izpostavljena kozmičnemu sevanju okoli 8 milijonov let, večina LL hondritov 17 milijonov let, L hondriti pa ne kažejo zelo izrazitega vrha pri času izpostavljenosti kozmičnemu sevanju (SEARS, 2004). Vendar se veliko znanstvenikov strinja, da pri L hondritih vseno obstaja dokaj dobro definiran vrh izpostavljenosti kozmičnemu sevanju, datiran na starost približno 470 milijonov let, kar ustreza srednjemu ordoviciju. V morskih sedimentih srednje ordovicijske starosti so našli stokrat več fosilnih L hondritov od povprečja. To nakazuje da je bila Zemlja takrat intenzivno bombardirana z L hondriti. Starševsko telo L hondritov je najverjetneje asteroid 8 Flora, ki je le eden izmed cele (istoimenske) družine asteroidov, ki je nastala z razpadom starševskega telesa pred 470 milijoni let (NESVORNÝ et al., 2007, 2009).

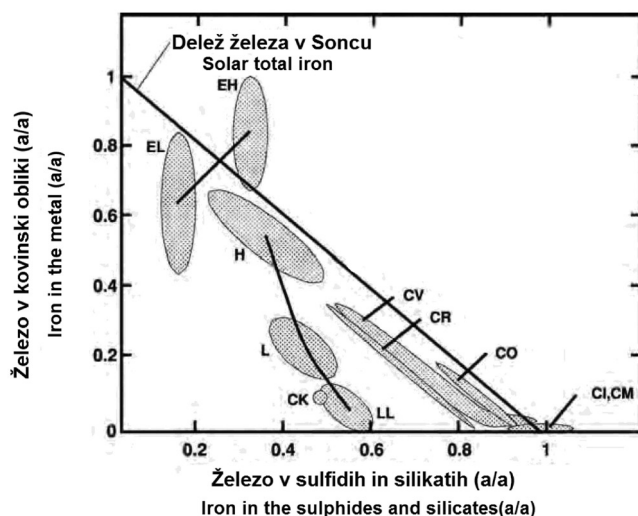
Prvo klasifikacijo hondritov je vpeljal PRIOR (1916). Po njej se meteoriti delijo na osnovi kemijskih lastnosti, ki sledijo t.i. Priorjevemu zakonu. Priorjev zakon pravi, da več kot je železa v meteoritu v oksidni obliki v silikatnih mineralih (kot sta olivin in piroksen), manj ga bo v meteoritu v kovinskih mineralih.

Hondritni meteoriti so po tej klasifikaciji razdeljeni na skupine na podlagi razmerja med količino železa v elementarni obliki ter železa v oksidni / sulfidni obliki (sl. 3). Poleg olivina je Prior v imenu uporabil ime najpogostejšega ortopiroksena, ki se pojavlja v meteoritu. Na podlagi tega je hondrite razdelil na enstatitove, olivinovo-broncitove, olivinovo-hiperstenove, olivinovo-pigeonitove in ogljikove hondrite. Danes ta klasifikacija ni več v uporabi, ker obstajajo podrobnejše klasifikacije, ki jih je omogočil razvoj elektronske mikroanalize. Na tem mestu pa jih omenjamo, ker se te klasifikacije pojavljajo v starejši literaturi. Vendar se meteoriti še vedno delijo glede na skupino na navadne, enstatitove, ogljikove in rumuruti hondrite.

Avtorja druge klasifikacije sta UREY in CRAIG (1953 v SEARS, 2004), ki sta hondrite razdelila na osnovi razmerja med vsebnostjo železa v kovinah in vsebnostjo železa v sulfidih in silikatih, razmerja med kalcijem in silicijem ter razmerja med elementarnim železom + železom v sulfidni obliki in železom v oksidni obliki. V vseh primerih so se merjena razmerja nanizala okrog treh različnih vrednosti, ki ustrezajo trem osnovnim skupinami hondritov – enstatitovim hondritom (E hondritom), navadnim hondritom (OC hondritom) ter ogljikovim hondritom (C hondritom).

Po danes veljavni klasifikaciji (NORTON, 2002) navadne hondrite klasificiramo na podlagi razmerja $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ v olivinu in piroksenu. Sestava olivina je običajno podana v obliki molskega deleža fayalita. Meteoriti imajo povprečno sestavo med 15 in 30 mol.% fayalita. V primeru piroksena pa se sestava zapiše v obliki molskega deleža ortopiroksena ferosilita.

Na podlagi teh lastnosti navadne hondrite klasificiramo v tri podskupine. Prvi so H hondriti ali meteoriti z visoko vsebnostjo železa. Ti hondriti imajo največ železa tako v kovinskih mineralih (15-19 mas.%), kot tudi skupno (25-30 mas.%).



Sl. 3. Klasifikacija hondritov glede na razmerje med vsebnostjo železa v kovinah in vsebnostjo železa v sulfidih in silikatih (povzeto po SEARS, 2004)

Fig. 3. Diagram plotting the amount of iron in the metal against the amount of iron in the oxide and sulfide forms (adopted according to SEARS, 2004)

Vendar olivin in piroksen vsebujeta relativno malo železa (Fa_{15-20} mol.% in Fs_{14-20} mol.%) (neposredna posledica Priorjevega zakona). H hondriti so najpogostejši meteoriti med vsemi podskupinami in vsemi razredi meteoritov. Po kemični sestavi piroksena ustrezajo sestavi broncita. Druga podskupina so L hondriti ali meteoriti z nizko vsebnostjo železa. Gre za drugo najpogostejšo podskupino meteoritov. Za L hondrite je značilno, da vsebujejo 1-10 mas.% železa v kovinskih mineralih in skupno 20-23 mas.% železa. Ti meteoriti imajo z železom že bolj bogat olivin (Fa_{21-25} mol%) ter prav tako ferosilit (Fs_{20-30} mol%). Tretja in najredkejša podskupina navadnih hondritov so t.i. LL hondriti ali hondriti z zelo nizko vsebnostjo železa. Ti hondriti vsebujejo v povprečju le še 1-3 mas.% železa v kovinskih mineralih. Skupno pa vsebujejo 19-22 mas.% železa. Imajo pa ti hondriti z železom najbolj obogatena minerala olivin (Fa_{26-32} mol%) ter ferosilit (Fs_{32-40} mol%).

Olivin v meteoritu Jesenice je sestave $\text{Fa}_{25.1 \pm 0.4}$ in $\text{Fa}_{21.1 \pm 0.4}$. Zato so Bischoff in sodelavci (BISCHOFF et al., 2011) meteorit Jesenice glede na kemično sestavo uvrstili v skupino navadnih hondritov in v podskupino L hondritov.

Poleg navadnih hondritov med hondrite sodijo tudi enstatitovi hondriti (E), ogljikovi hondriti (C) in rumuruti hondriti (R). Za vse te skupine meteoritov je značilno, da so njihovi predstavniki precej redki (NORTON, 2002, HORSTMANN et al., 2010). Enstatitove hondrite imenujemo po magnezijevem silikatu, ki zavzema 60-80 vol.% hondritov. Za enstatitove hondrite je značilno, da je praktično vse železo prisotno v elementarni ali sulfidni obliki. V oksidni obliki je železa v olivinu manj kot en molski odstotek. Zato se v enstatitovih hondritih pojavlja presežek kremenice, ki kristali kot kristobalit in tridimit. Enstatitovi hondriti so edina vrsta meteoritov, v katerih se pojavlja kremen oz. njegove modifikacije. Dodatno se od navadnih hondritov ločijo po nizkem razmerju med magnezijem in silicijem. Enstatitovi hondriti so (podobno kot navadni hondriti) razdeljeni na podlagi skupne količine železa na enstatitove hondrite z visoko vsebnostjo železa (EH) in enstatitove hondrite z nizko vsebnostjo železa (EL). EH hondriti vsebujejo 30 mas.% železa, EL hondriti pa 25 mas.% železa. Ogljikovi hondriti so redka skupina kamnitih meteoritov, ki na površju Zemlje, izpostavljeni preperevanju in zaradi poroznosti, zelo hitro razpadejo. Za njih je značilno, da vsebujejo precejšnje količine kemično vezane vode (< 22 mas.%), medtem ko navadni hondriti vsebujejo manj kot 1 mas.% vode. Prav tako vsebujejo ogljikovi hondriti bistveno več lahke hlapne komponente kot navadni hondriti. V ogljikovih hondritih so našli številne organske spojine (NORTON, 2002). Domnevajo, da so ogljikovi hondriti ena prvih trdnih snovi, ki so nastale v našem osončju. Ogljikovi hondriti so v času svoje zgodovine prišli v stik z vodo in doživeli t. i. spremembo v reakciji z vodo (angl. *aqueous alteration*). Zaradi te spremembe so vsi ogljikovi hondriti razvrščeni v petrološke tipe 1-4. V ogljikovih hondritih so tudi kalcijevo-aluminijevi

vklučki (CAI), ki jih v drugih vrstah meteoritov ne najdemo. Sestavljajo jih minerali oksidi, kot sta spinel in perovskit ter silikati, kot sta npr. klinopiroksen in anortit. Predstavljali naj bi prvo trdno snov v osončju. Ogljikovi hondriti se delijo na 7 podskupin: CK, CV, CO, CH, CR, CM in CI hondrite. Posebnost so CI hondriti, za katere je značilno, da imajo hondritno strukturo, a ne vsebujejo hondrul. Rumuruti hondriti so najnovejša skupina hondritov. Predstavljajo eno redkejših vrst meteoritov, saj v bazi podatkov vseh znanih meteoritov najdemo zapise o le 129 primerkih (INTERNET 1). Za njih je značilno, da skorajda ne vsebujejo železa v elementarni obliki, kar je ravno nasprotno kot pri enstatitovih hondritih. Večino volumna zavzemajo silikati, med katerimi prevladuje olivin (70 vol.%) sestave Fa_{38-41} . Poleg olivina pa nastopa še plagioklaz (14 vol.%) in s Ca bogat piroksen (5 vol.%).

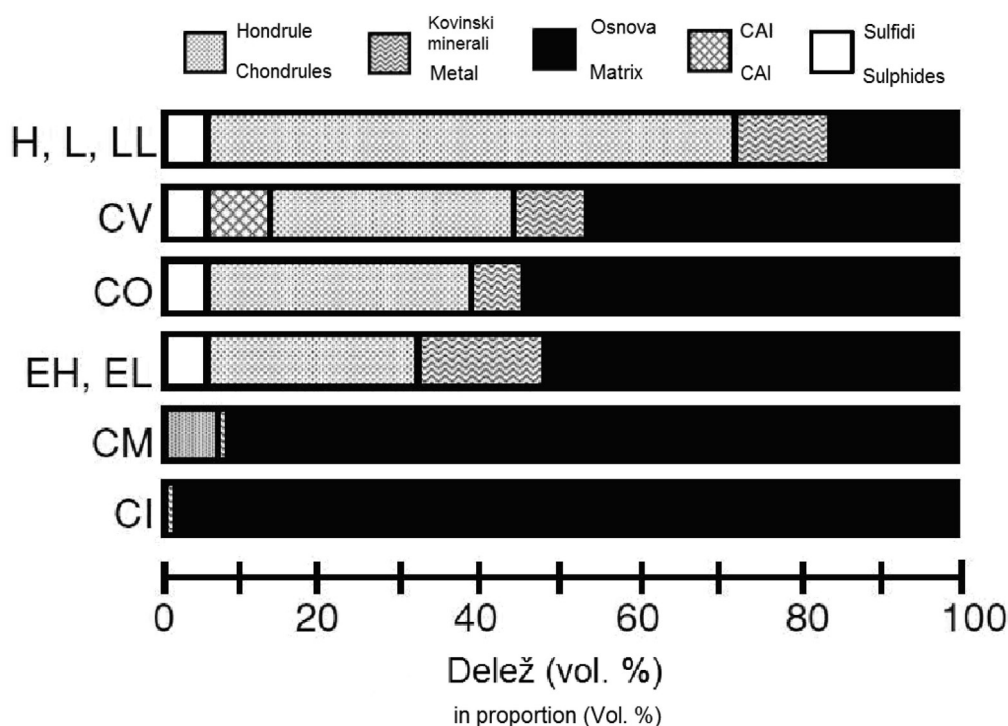
Meteoriti hondriti se med seboj razlikujejo tudi po zgradbi oz. v razmerjih med povprečnim volumnom hondrul, kovinskih mineralov, sulfidov in CAI vključkov (SEARS, 2004) (sl. 4). Navadni hondriti v povprečju vsebujejo največ hondrul (65-75 vol.%), medtem ko enstatitovi hondriti vsebujejo v povprečju 20-40 vol.% hondrul. Vsebnost hondrul v ogljikovih hondritih se močno spreminja. CH hondriti vsebujejo okoli 70 vol.% hondrul, medtem ko CI hondriti sploh ne vsebujejo hondrul. Največ kovinskih mineralov vsebujejo enstatitovi hondriti (18-22 vol.%). V navadnih hondritih pa je kovinskih mineralov od 2 do 16 vol%. Ogljikovi hondriti se glede na vsebnost kovin zelo močno razlikujejo. V povprečju vsebujejo okoli 5 vol.% kovin. Osnova sestavlja 10-15 % prostornine navadnih hondritov in več kot 50 % prostornine enstatitovih hondritov. Ogljikovi hondriti se po vsebnosti osnove zelo razlikujejo. Največ (> 98 vol.%) je vsebujejo CI hondriti, najmanj (5 vol.%) pa CH hondriti. Razporeditev sulfi-

dov je v hondritih relativno enakomerna. Navadni hondriti, enstatitovi hondriti ter celo nekateri ogljikovi hondriti vsebujejo okoli 7 vol.% sulfidnih mineralov. Kalcijevo-aluminijevi vključki – CAI (GRESHAKE et al., 1997) so posebnost, ki se pojavlja izključno v CV in CO ogljikovih hondritih. V CV hondritih CAI vključki zavzemajo do 10 % prostornine.

Srednji premer hondrul je naslednja značilnost, po kateri hondrite razlikujemo med seboj. Povprečna velikost hondrul v navadnih hondritih znaša 450 μm in nekoliko variira med posameznimi podtipi. V H-hondritih je povprečni premer hondrul 300 μm (SOKOL et al., 2005), v L-hondritih 500 μm in v LL-hondritih 650 μm . Pri enstatitovih hondritih znaša premer hondrul podtipa EH 220 μm in 550 μm v podtipu EL. Pri ogljikovih hondritih pa premer hondrul variira med 150 in 1000 μm (NORTON, 2002). Podtip CV ima hondrule največjega premera (1000 μm), kateremu sledijo podtipi CK (800 μm), CR (700 μm), CM (270 μm) in CO (150 μm). CI hondriti ne vsebujejo hondrul. R hondriti pa imajo povprečen premer hondrul 400 μm (NORTON, 2002).

Navadni hondriti se med seboj jasno ločijo tudi na podlagi velikosti (premera) zrn kovinskih mineralov. Poleg tega obstaja še povezava med velikostjo zrn kovinskih mineralov in velikostjo hondrul. Pri navadnih hondritih velja pravilo, da večje kot so hondrule v meteoritu, manjša bo povprečna velikost zrn kovinskih mineralov. Tako imajo H hondriti, ki sicer vsebujejo najmanjše hondrule, največja zrna kovinskih mineralov (190-210 μm), sledijo L hondriti (160-200 μm) in LL hondriti (120-160 μm) (SEARS, 2004).

William Randall Van Schmus in John A. Wood sta leta 1967 razvila Van Schmus-Woodovo petrokemijsko klasifikacijo hondritov (VAN SCHMUS et al., 1967 v NORTON, 2002). Opazila sta, da se hondriti z enako kemijsko sestavo še vedno pre-



Sl. 4. Povprečna sestava različnih vrst hondritov (povzeto po SEARS, 2004)

Fig. 4. Average composition of different types of chondrites (adopted according to SEARS, 2004)

cej razlikujejo že, če jih opazujemo z optičnim mikroskopom (NORTON, 2002). Poleg tega njuna klasifikacija omogoča osnovno, a vseeno dokaj dobro določitev vrste meteorita že zgolj z uporabo optičnega mikroskopa. Klasifikacija, ki sta jo vpeljala, obsega 10 različnih kriterijev (tabela 1), na podlagi katerih meteorite razvrščamo v 6 (oz. 7) petroloških tipov. Petrološke oznake meteorita se dodajajo za kemijskimi oznakami (npr. L6 hondrit). Petrološki tipi od 1-3 pomenijo, da je bil hondrit v geološki zgodovini izpostavljen vodi oz. je reagiral z njo. Nižji petrološki tip po-

meni, da je bila sprememba hondrita bolj izrazita zaradi reakcije z vodo. V petrološke tipe med 1 in 3 sodijo vsi ogljikovi hondriti. Petrološki tipi od 4 do 6 pa pomenijo, da je bil meteorit tekom svoje zgodovine izpostavljen termični metamorfozi. Višji, kot je petrološki tip, pri višji temperaturi je potekala ta metamorfoza. V strukturi hondritov se izraža predvsem v tem, kako dobro so hondrule ohranjene in definirane. Pri hondritih petroloških tipov 3 in 4 so hondrule zelo dobro ohranjene. Pri višjih petroloških tipih pa hondrule postajajo vse manj razpoznavne in vse

Preglednica 1. Kriteriji za razvrščanje meteoritov v petrološke tipe (povzeto po LAURETTA et al., 2006)

Tip Kriterij	1	2	3	4	5	6	7
Homogenost sestave olivina	–	> 5 % stadnardna deviacija		≤ 5 %	Homogen		
Simetrijski razred piroksena z nizko vsebnostjo Ca	–	Večinoma monoklinski		>20 % monoklin.	≤ 20 % monoklinski	Ortorombski	
Glinenec	–	Primarna zrna		Sekundarna <2 μm zrna	Sekundarna 2-50 μm zrna	Sekundarna >50 μm zrna	
Steklo v hondrulah	Spremenjeno ali odsotno	Večinoma spremenjeno	Čisto, izotropno	Devitrifici -rano	Odsotno		
Kovinski minerali: maks. Ni (mas. %)	–	<20 % taenit	>20 % kamacita in taenita v obliki trdne raztopine				
Sulfidi: srednja Ni (mas. %)	–	>0.5 %	<0.5%				
Osnova	Drobnozrnata, nepresevna	Večinoma drobno-zrnata, nepresevna	Nepresevna do prozorna	Prozorna, rekristalizirana			
Izoblikovanost hondrul	Brez hondrul	Hondrule imajo jasno vidne meje		Nekatere hondrule so zdrobljene, redke z jasno vidnimi mejami		Hondrule so večinoma zdrobljene	Primarne teksture so uničene
Ogljik (mas. %)	3-5 %	0.8-2.6%	0.2-1 %	<0.2 %			
Voda (mas. %)	18-22 %	2-16 %	0.3-3 %	<1.5 %			

Table 1. Criteria for classification of meteorites in petrologic types (adopted according to LAURETTA et al., 2006)

Type \ Criterion	1	2	3	4	5	6	7
Homogeneity of olivine compositions	–	> 5 % mean deviations		≤ 5 %	Homogenous		
Structural state of low-Ca pyroxene	–	Predominantly monoclinic		>20 % monoclinic	≤ 20 % monoclinic	Orthorombic	
Feldspar	–	Minor primary grains		Secondary <2 μm grains	Secondary 2-50 μm grains	Secondary >50 μm grains	
Chondrule glass	Altered or absent	Mostly altered, some preserved	Clear, isotropic	Devitrified	Absent		
Metal: Maxium: Ni (wt %)	–	<20 % taenite minor or absent	>20 % kamacite and taenite in exsolution relationship				
Sulfide: Mean Ni (wt %)	–	>0.5 %	<0.5%				
Matrix	Finegrained, opaque	Mostly fine-grained opaque	Opaque to transparent	Transparent, recrystallized			
Chondrule-matrix integration	No chondrules	Sharp chondrule boundaries		Some chondrules can be discerned, fewer sharp edges		Chondrules poorly delineated	Primary textures destroyed
Carbon (wt %)	3-5 %	0.8-2.6%	0.2-1 %	<0.2 %			
Water (wt %)	18-22 %	2-16 %	0.3-3 %	<1.5 %			

bolj rekristalizirane. Robove oz. meje hondrul je vse težje določiti. Pri hondritih petrološkega tipa 6 so dobro definirane večinoma le večje hondrule, ker so le te bolj odporne na termično metamorfozo. Petrološki tip 7 pa označuje strukturo, kjer so hondrule povsem uničene. Do danes je znanih le nekaj 10 meteoritov, ki sodijo v petrološki tip 7. Nekateri te meteorite razumejo kot vmesni člen med hondriti in primitivnimi ahondriti. Termična metamorfoza poteka pri temperaturah med 400 in 950 °C, pri čemer vse kemijske reakcije potekajo izključno v trdnem stanju. Omogočena je bila le migracija določenih elementov ter rast novih mineralov. Termična metamorfoza je imela vpliv tudi na osnovo hondritov, ki pri hondritih višjih petroloških tipov vsebuje vse manj steklaste faze. Zaradi teh učinkov termične metamorfoze so meteoriti višjih petroloških tipov bolj homogeni po kemični sestavi kot meteoriti nižjih tipov. Zato hondrite petroloških tipov 1-4 imenujemo neuravnoteženi hondriti (angl. *unequilibrated chondrites*), tiste petroloških tipov 5-6, pa uravnoteženi hondriti (angl. *equilibrated chondrites*) (NORTON, 2002).

V meteoritu Jesenice so s prostim očesom vidne samo redke velike hondrule. Tudi v zbrusku so pod optičnim mikroskopom le tu in tam hondrule vidne v svoji značilni okroglasti obliki, kljub temu, da naj bi maso meteorita hondrita v veliki večini sestavljale samo večje ali manjše hondrule. V primeru meteorita Jesenice je večina hondrul razpadla v sestavne dele nepravilnih oblik. Med temi poligonalnimi kosi plavajo posamezne pravilno oblikovane hondrule. Naše ugotovitve potrjujejo uvrstitev meteorita Jesenice v petrološki tip 6 (sl. 5), za katerega je značilna srednja stopnja rekristalizacije zaradi termične metamorfoze (po Van Schmus-Woodovi petrokemijski klasifikaciji). Pri tej stopnji metamorfoze je že prišlo do homogenizacije kemične sestave v masi meteorita, zaradi česar spada meteorit Jesenice med homogene hondrite (NORTON, 2002).

Nastanek hondrul

Hondrule so sferične do subsferične strukture v hondritih, za katere je značilno, da so bile nekoč v preteklosti popolnoma ali vsaj deloma staljene. Ker večino mase hondritov sestavljajo hondrule, je naslednje poglavje namenjeno razlagi njihovega pojavljanja. Teorije nastanka hondrul so povezane po Searsu (SEARS, 2004), ki je zbral posamezne teorije več kot šestdesetih avtorjev, kar kaže na to, da je o nastanku hondrul še veliko nerešenih vprašanj. V nadaljevanju so predstavljene najbolj aktualne teorije, ki so poimenovane kar po njihovih avtorjih. Glede na podobnost med teorijami nastanka hondrul lahko večino teorij združimo v dve glavni skupini. Prva skupina teorij zagovarja nastanek hondrul iz prvotne solarne meglice. Druga teorija pa razlaga nastanek hondrul s procesi na starševskih telesih meteoritov.

Teorije nastanka hondrul v meglici lahko v grobem razdelimo na teorije, ki razlagajo nastanek

hondrul s Sončevo aktivnostjo in teorije, ki trdijo, da so hondrule nastale neposredno s kondenzacijo iz meglice. Nastanek hondrul kot posledica Sončeve aktivnosti zahteva, da so se starševska telesa meteoritov nahajala v bližini Sonca. Protuberance, koronarni izbruhi in druge površinske Sončeve aktivnosti pa naj bi neposredno vplivale na starševska telesa hondritov. Zaradi Sončeve aktivnosti naj bi bil material iz starševskih teles iztrgan in odnesen iz notranjega v zunanje predele osončja. SORBY (1877 v SEARS, 2004) in BOSS in sod. (1993 v SEARS, 2004) menijo, da starševsko telo sploh »ni bilo potrebno«, ampak so hondrule neposreden kondenzat Sončevega izvrženega materiala. V to skupino teorij sodi tudi teorija Shu-ja, ki trdi, da so hondrule nastale ob nastanku osončja skupaj s Soncem. V eni izmed začetnih faz v procesu nastanka zvezde iz zgoščujoče se protozvezde z veliko hitrostjo izhajata dva nasprotno usmerjena curka plina in prahu (zvezde razreda T Tauri). Po mnenju Shu-ja in soavtorjev (SHU et. al, 1996 v SEARS, 2004) naj bi hondrule nastale iz materiala iz obeh zvezdnih curkov. Skupina teorij o neposredni kondenzaciji iz meglice podpira mnenje, da so hondrule nastale neposredno iz prvotne solarne meglice. Hondrule naj bi nastajale pri visokih tlakih in temperaturah, ki jih običajno v meglicah ni. Nastanek hondrul bi lahko spodbudili močni Sončevi koronarni izbruhi v začetni fazi nastajanja Sonca. Druge možnosti pa so, da naj bi nastanek hondrul inducirale strele v meglicah ali pa močno magnetno polje. Nekateri menijo, da je nastanek hondrul sprožil močan udarni val, ki se je razširil skozi meglico. Naslednja skupina teorij razlaga nastanek hondrul z medzvezdnim prahom, ki se je razširil skozi (Sončevo) meglico z veliko hitrostjo in se ob tem (zaradi trenja z meglico) tako močno ogrel, da se je (deloma) stalil. Iz nastale taline so kristalile hondrule.

Tudi teorije nastanka hondrul na starševskih telesih se delijo v osnovi na dve skupini teorij. Prva zagovarja, da so hondrule posledica vulkanske dejavnosti na površini starševskih teles. Druga teorija pa trdi, da so hondrule nastale ob trkih starševskih teles. Teorije nastanka z vulkanizmom in ostalo vulkansko dejavnostjo na starševskih telesih so se pojavile že na prehodu iz 19. v 20. stol. (SEARS, 2004). V tem času so nastaveniki menili, da so hondrule posamezni ločeni (mikro)meteoriti, ki so nastali z razpadom trdnih teles. TSCHERMARK (1883 v SEARS, 2004) je menil, da hondrule kažejo značilnosti tufov. HADINGER (1867 v SEARS, 2004) je bil prvi, ki je hondrule povezal z vulkansko aktivnostjo oz. z vulkansko erupcijo na starševskem telesu. BORGSTROM (1904 v SEARS, 2004) je opazil, da je raznovrstnost hondrul tako velika, da so hondrule morale nastati ločeno in so se kasneje združile v skupnem telesu. V hondritih je opazil tudi žile kovinskih mineralov, ki so nastale po združitvi hondrul, kar zopet kaže na to, da so bili hondriti nekoč del večjih teles. BREZINA (1885 v SEARS, 2004) je predlagal, da so hondrule kristalizirale iz magme. KLEIN (1906 v SEARS, 2004) je hondrule povezal s sferoliti. WAHL (1910 v SEARS, 2004) pa je menil, da so hondrule

silikatna talina, ki se je ohladila v ogreti atmosferi starševskega telesa. MERRILL (1920 v SEARS, 2004) je bil prvi, ki je razložil nastanek porfirskih in neporfirskih hondrul. Porfirske hondrule naj bi bile abradirani fragmenti taline, neporfirske hondrule pa naj bi bile združene kapljice »dežja« staljene taline. RINDGWOOD (1959 v SEARS, 2004) je predlagal nastanek hondrul z dvigom z vodo obogatene magme na površje starševskega telesa. Hondrule naj bi ob tem nastale na tri različne načine: s sferolitsko kristalizacijo, s hitro precipitacijo z magnezijem bogatih silikatov kot posledica izgube železa na površju in s kavitacijo (hitro kristalizacija viskozne taline, ujete v mehurčke pare). Prva, ki sta razlagala nastanek hondrul s kolizijo med starševskimi telesi, sta bila UREY in CRAIG (1953 v SEARS, 2004). Hondrule naj bi nastale ob trku med telesoma (asteroidoma) s premerom 10 in 100 km. Ob tem naj bi se sprostila dovolj velika količina energije, da sta se telesi deloma stalili. Iz nastale taline pa so kristalizirale hondrule. Obe telesi sta ob koliziji tudi razpadli in se kasneje tudi združili v kup gravitacijsko šibko vezanega drobirja (angl. *rubble pile asteroid*). Teorijo je UREY (1967 v SEARS, 2004) dopolnil s tem, da je šlo za trk z očetovskim telesom velikosti Lune, ker imajo manjša telesa (majhni asteroidi) premajhno gravitacijo, da bi lahko zadržale ob koliziji nastale hondrule. Nekateri petrologi so mnenja, da imajo hondrule petrološke značilnosti, ki nakazujejo na to, da so bile nekoč del večjega telesa. UREY in CRAIG (1953 v SEARS, 2004) sta predlagala, da naj bi hondrule nastale ob udarcu z bazeni staljene magme, ki so nastale ob koliziji med večjimi telesi. Teorijo o nastanku hondrul s trkom s staljenim telesom je nadgradil SANDERS (1996 v SEARS, 2004).

Posamezne hondrule niso homogene čez celoten presek hondrule, pač pa jih obdaja skorjica, ki ima drugačno teksturo kot njeno jedro. Obstajata dva osnovna tipa skorjic hondrul – drobnozrnate in debelo-zrnate skorjice. Drobnozrnate skorjice sestavljajo zrna premera 10–30 μm s posameznimi zrni submikronskih dimenzij. Drobnozrnate skorjice naj bi nastale z akrecijo prahu iz solarne meglice na že formirane hondrule. Zato se ta tip skorjic v literaturi pojavlja tudi pod imenom akrecijski prašni plašč (angl. *accretion dust mantle*). Ta tip skorjice obdaja tudi reliktna zrna, drobce hondrul ter kalcijevo-aluminijeve vključke. Po kemični sestavi so skorjice zelo podobne sestavi osnove hondrita, s katero so v stiku. Sestava posameznih skorjic je zelo homogena. Vendar vsebnost FeO in MgO ter litofilnih elementov v skorjicah v navadnih hondritih lahko zelo variira med posameznimi hondrulami. Skorjice ne kažejo znakov taljenja in delujejo kot »sedimentne« teksture. (VOGEL et al., 2003). Pogosto hondrule obdaja več plasti drobnozrnatih skorjic z različno kemično sestavo.

Debelozrnate skorjice sestavljajo zrna, ki imajo v navadnih hondritih v povprečju premer 150 μm , v CV3 hondritih pa celo do 400 μm . Kemična sestava debelo-zrnatih skorjic je zelo podobna sestavi osnove meteorita in tudi drobnozr-

natih skorjic. Delijo se na skorjice z visoko vsebnostjo FeO in skorjice z nizko vsebnostjo FeO. Prve so v 80 % primerov deloma ali popolnoma staljene, druge pa v okoli 50 % primerov. Zaradi tega, ker debelo-zrnate hondrule kažejo znake taljenja, jih imenujemo tudi magmatske hondrule. To nakazuje, da so debelo-zrnate skorjice nastale iz hondrul samih. Pogosto so v debelo-zrnatih skorjicah vključki drobnozrnatih skorjic (NORTON, 2002).

MERRILL (1920 v SEARS, 2004) je opazil, da skorjice vsebujejo cone kovin in sulfidov. Morfill in sodelavci (MORFILL et al., 1993 v SEARS, 2004) so na podlagi debeline skorjic ugotavljali njihovo zgodovino. Opazili so, da imajo večje hondrule debelejšje skorjice. Vendar je razmerje med debelino in velikostjo skorjice odvisno od vrste hondrule. Hondrule, revne z lahko hlapnimi komponentami (tip A), imajo debelejšje skorjice kot hondrule, bogate z lahko hlapnimi komponentami (tip B). To nakazuje, da so skorjice nastale iz elementov, ki so izhlapeli iz hondrule in kasneje kondenzirali na zunanji strani hondrule (SEARS, 2004).

Klasifikacija hondrul

Raziskovalci so izdelali več klasifikacij, po katerih delimo in razlikujemo hondrule, ki sestavljajo kamnite hondrite. Klasifikacije smo povzeli po Searsu (SEARS, 2004) in Nortonu (NORTON, 2002) in jih enako kot Sears in Norton poimenujemo kar po njihovih avtorjih. Prvi je hondrule razdelil TSCHERMAK (1883 v SEARS, 2004) na osnovi mineralne sestave v razrede: olivinove, olivino-piroksenove, avgitove, plagioklazove, steklaste, potemnele hondrule ter hondrule s skorjicami, bogatimi z železom. MERRILL (1920 v SEARS, 2004) je hondrule razdelil na porfirske in neporfirske hondrule. Termin (ne)porfirska hondrula je sposojen iz petrologije magmatskih kamnin in označuje obliko ter velikost kristalov v hondruli. MERRILL (1920 v SEARS, 2004) je bil tudi prvi, ki je opisal skorjice hondrul ter kompleksne združene hondrule, ki ležijo ena znotraj druge. KIEFFER in KING (1975 v SEARS, 2004 in KING, 1983 v SEARS, 2004) sta predlagala klasifikacijo, na podlagi katere hondrule delimo na kapljičaste in litične hondrule. Kapljičaste hondrule naj bi bile kristaljena talina, medtem ko naj bi bile litične hondrule fragmenti magmatskih kamnin. Ta klasifikacija je podobna Merrillovi delitvi na porfirske in neporfirske hondrule (MERRILL, 1920 v SEARS, 2004). GOODING in KEIL (1981 v SEARS, 2004) sta hondrule razdelila na podlagi mineralne sestave v naslednje skupine: porfirske hondrule, neporfirske hondrule ter na zrnate hondrule. Prav tako sta opisala mineralno sestavo ter strukturo posameznih skupin in tipov hondrul.

V skupino porfirskih hondrul sodijo naslednji tipi hondrul: porfirske olivino-piroksenove hondrule (POP), porfirske olivinove hondrule (PO) in porfirske piroksenove hondrule (PP). V skupino neporfirskih hondrul pa sodijo pahljačaste

piroksenove hondrule (RP), lamelarne olivinove hondrule (BO) in pa kriptokristalne hondrule (C). Skupino zrnatih hondrul sestavljajo zrnate olivinove hondrule (GO), zrnate piroksenove hondrule (GP) in zrnate olivinovo-piroksenove hondrule (GOP). Porfirske hondrule nastanejo z lepljenjem zrn okrog kondenzacijskih jeder (NORTON, 2002). Med procesom nastanka so bile le delno natanljene. Porfirske olivinovo-piroksenove hondrule so najpogostejše hondrule. Sestavljajo jih velika zrna olivina in klinoenstatita. Zrna klinoenstatita so v obliki polisintetskih dvojčkov. Porfirske piroksenove hondrule so sestavljene izključno iz zrn piroksena. So najmanj pogost tip porfirskih hondrul. Porfirske olivinove hondrule običajno sestavljajo evhedralna do subhedralna zrna olivina, ki plavajo med mikrokristalno osnovo.

Neporfirske hondrule nastanejo iz kapljic taline (SEARS, 2004). Obnašanje nekaterih litofilnih elementov (Ca, Al, Ti, REE) v teh hondrulah kaže na to, da so bile hondrule kemično zaprt sistem. Kristalizacija iz taline okrog nukleacijskega jedra naj bi bila hipna. Med temi hondrulami so najpogostejše pahljačaste piroksenove hondrule. Hondrule sestavljajo drobna (premer 1-20 μm) in zelo podolgovata zrna rombičnega piroksena, med njimi pa so ksenomorfna zrna plagioklazov in zrna kovinskih mineralov. Zrna običajno kristalijo iz ene same nukleacijske točke, kar daje značilno pahljačasto teksturo. Lahko pa je nukleacijskih točk tudi več ali pa te ležijo izven centra hondrule. Takim hondrulam pravimo tudi ekscentrične pahljačaste hondrule. Pahljačaste piroksenove hondrule v meteoritih petroloških tipov 4, 5 in 6 običajno niso okrogle, ampak bolj spominjajo na morske školjke pokrovače, kar je posledica kemične erozije, ki jih je korodirala po robovih. Lamelarne olivinove hondrule so enostavno prepoznavne, saj so zgrajene iz med seboj vzporednih zrn olivina. Ena izmed kristalografskih osi olivina je močno podaljšana, kar daje lamelarno teksturo, med lamelami pa so zrna plagioklazov in zrna železovo-nikljevih mineralov. Obstajajo tudi hondrule, ki imajo zrna olivina orientirana v več različnih smereh. Take hondrule se imenujejo polisomatske lamelarne hondrule. Kriptokristalne hondrule se pojavljajo redko in jih sestavljajo kriptokristalna zrna rombičnega piroksena ter steklo. V njih ni nobene prepoznavne teksture.

Hondrule iz skupine zrnatih hondrul so precej redke. Zato nekateri to majhno skupino hondrul združujejo s skupino neporfirskih hondrul. Najpogostejši tip teh hondrul pa so GOP hondrule. Običajno jih sestavljajo anhedralna zrna piroksena in olivina, manjša od 10 μm , s slabo definiranimi mejami (LAURETA et al., 2006). Vsa zrna, ki sestavljajo zrnate hondrule, so približno enako velika in so zelo tesno zložena ter potopljena v steklasto mezostazo. Hondrulo navadno obdaja skorjica, sestavljena iz enakih, vendar bolj debelelozrnatih mineralov.

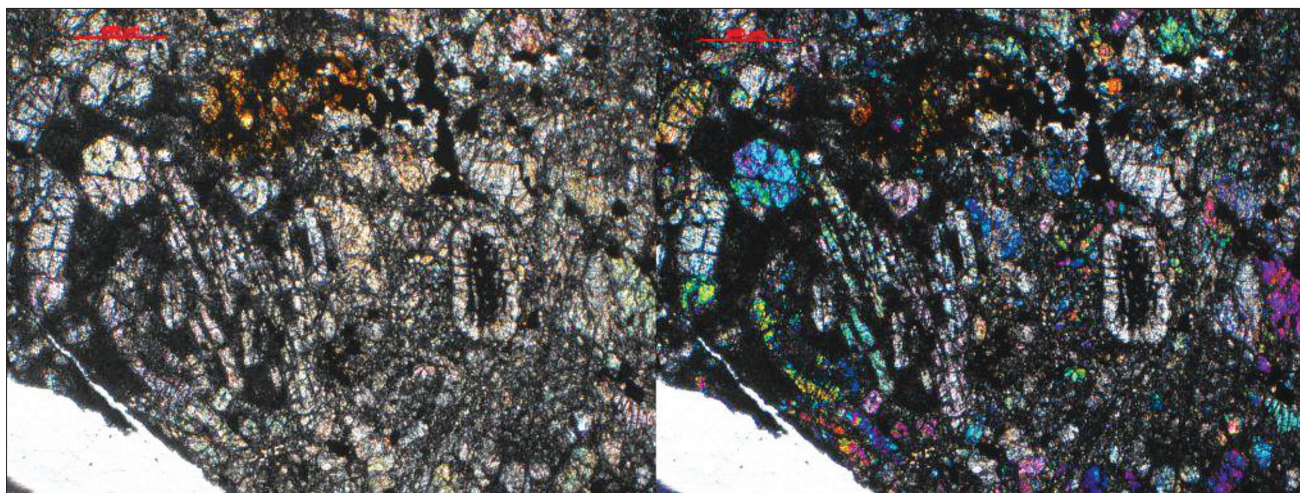
Poleg vseh naštetih hondrul obstajajo še kovinske hondrule (M), ki so med vsemi hondrulami v navadnih hondritih najredkejša (< 1 %).

Sestavljene so iz kovinskih Fe-Ni mineralov, troilita (FeS) in iz akcesornih zrn schreibersita ((Fe, Ni)₃P) in elementarnega Cu.

V meteoritu Jesenice kljub intenzivni rekristalizaciji lahko prepoznamo različne vrste hondrul. Maloštevilne so tiste, ki imajo pravilno okroglasto obliko. Več je takih, kjer lahko prepoznamo samo dele hondrule. Njihovo obliko, mineralno sestavo in obstoj skorjic smo ugotavljali v poliranih zbruskih z optičnim mikroskopom v presevni svetlobi. Pri posameznih tipih hondrul smo lažje prepoznavali njihovo sestavo in strukturo v poliranem zbrusku z vrstičnim elektronskim mikroskopom s povratno sipanimi (BSE) elektroni. Z elektronskim mikroskopom so jasno vidne meje med posameznimi mineralnimi zrni. Zato lažje določimo tudi mejo hondrule. Različne minerale med seboj ločimo posredno glede na sivo/bel odtenek površine. Kovinski minerali so svetlejši od nekovinskih mineralov. Ker je ločljivost elektronskega mikroskopa večja od ločljivosti optičnega mikroskopa, smo lahko prepoznali tudi najbolj drobnozrnate nekovinske minerale.

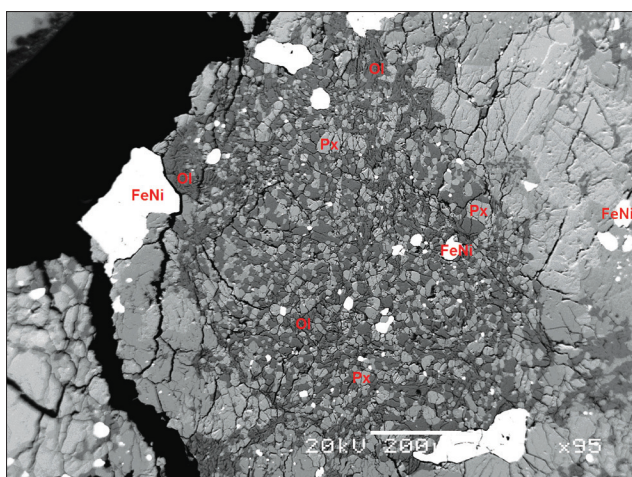
V meteoritu Jesenice se iz skupine porfirskih hondrul pojavljajo: porfirske olivinovo-piroksenove hondrule (POP) (sl. 6), porfirske olivinove hondrule (PO) (sl. 7 in sl. 8) in porfirske piroksenove hondrule (PP) (sl. 9). Iz skupine neporfirskih hondrul smo v meteoritu Jesenice odkrili pahljačaste piroksenove hondrule (RP) (sl. 10 in sl. 11) in lamelarne olivinove hondrule (BO) (sl. 12 in sl. 13). Na sliki 11 so vidna tanka (premer 1-20 μm) in zelo podolgovata zrna rombičnega piroksena. Temneje siva zrna plagioklazov z elektronskim mikroskopom lažje ločimo od piroksenovih letvic. Drobna izometrična zrna kovinskih mineralov so s povratno sipanimi elektroni (BSE) videti najsvetlejša. Skupino zrnatih hondrul predstavljajo olivinovo-piroksenove hondrule (GOP) (sl. 14). V vzorcu meteorita Jesenice smo odkrili tudi kovinsko hondrulo (M) (sl. 15 in sl. 16), ki je v navadnih hondritih sicer najmanj pogosta. Drobna zrna Fe-Ni mineralov plavajo v osnovi s kemično sestavo plagioklazov. S preiskavo v presevni svetlobi nismo mogli prepoznati, ali imamo opravka s kristalno obliko osnove, ali je steklasta faza s sestavo plagioklazov. Na sestavo plagioklazov sklepamo po odtenku sive barve, ki jo vidimo pri detekciji povratno sipanih elektronov (BSE).

Wood in McSweenova klasifikacija hondrul (WOOD, 1962 v SEARS, 2004 in MCSWEEN et al., 1983 v SEARS, 2004) v ogljikovih hondritih pozna delitev na osnovi kemijske in mineralne sestave na tri razrede in sicer: razred I (olivini z majhno vsebnostjo železa), razred II (olivini z veliko vsebnostjo železa) ter razred III (neporfirske hondrule). Scott-Taylor-Jonesova (SCOTT, et. al., 1989 v SEARS, 2004, JONES et al., 1989 v SEARS, 2004, JONES, 1994 v SEARS, 2004) klasifikacija hondrul je posodobila predhodno Wood-McSweenovo klasifikacijo. Hondrule tipa-I vsebujejo z FeO osiromašena olivin ter piroksen (Fo in En > 90). Hondrule tipa-II vsebujejo z FeO obogatena olivin in piroksen (Fo in En < 90). Hondrule tipov I in II so



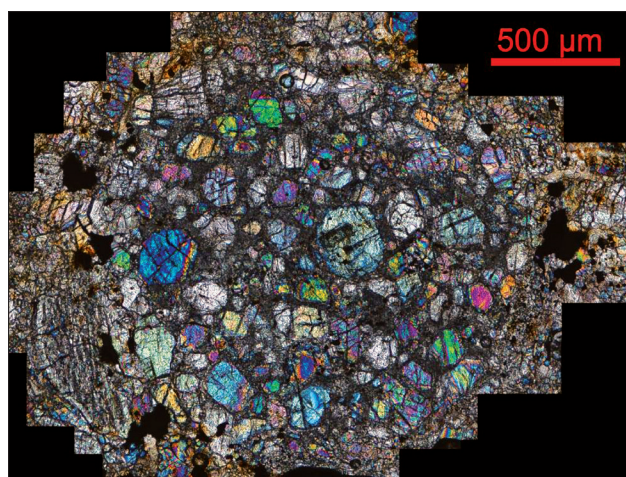
Sl. 5. Meteorit Jesenice. Številne zelo rekristalizirane olivinove hondrule. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 5. Meteorite Jesenice. Recrystallized texture of many olivine chondrules. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



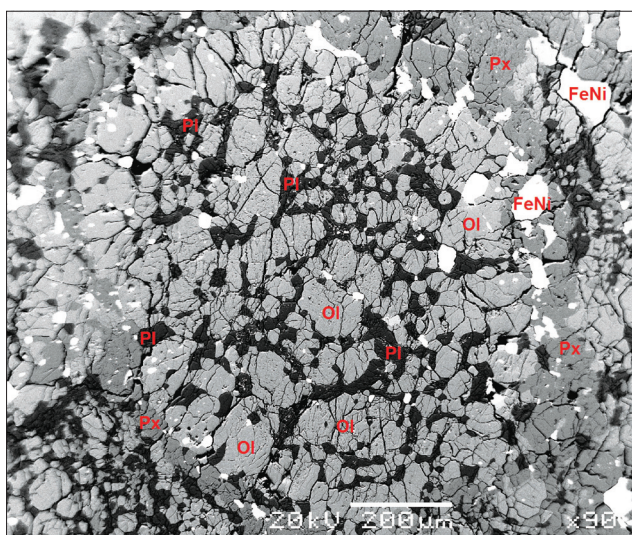
Sl. 6. Meteorit Jesenice. Porfirna olivinova-piroksenova hondrula. Zrna olivina (Ol) in piroksena (Px) v temni osnovi, ki ima sestavo glinenec. Dobro vidna so redka zrna železovo-nikljevih mineralov (FeNi). SEM, BSE.

Fig. 6. Meteorite Jesenice. Porphyritic olivine-pyroxene chondrule. Olivine (Ol) and pyroxene (Px) grains in dark matrix with composition of feldspar. There are also present rare grains of iron-nickel minerals (FeNi). SEM, BSE



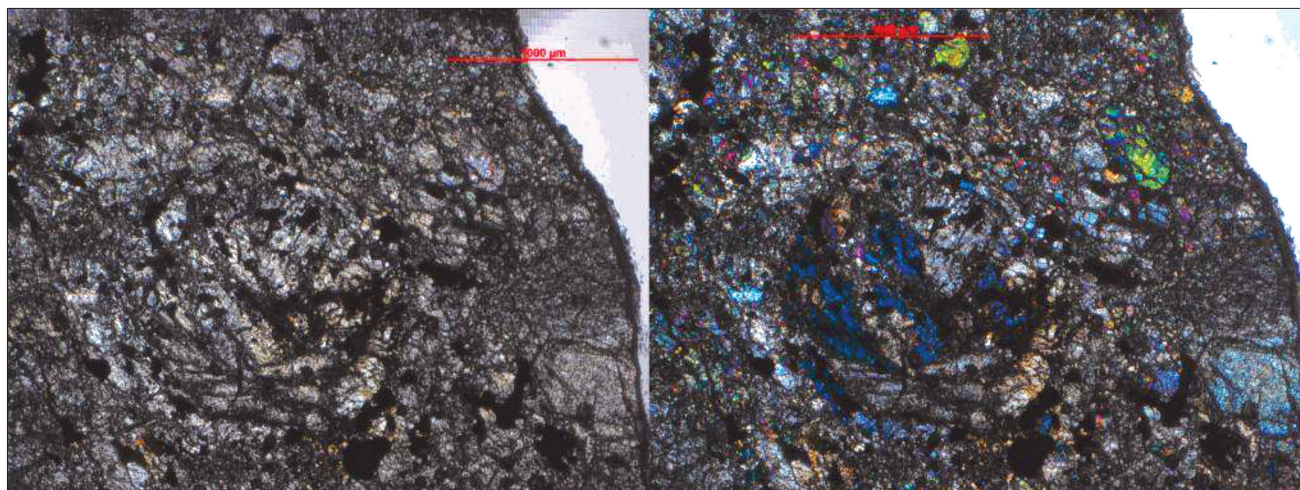
Sl. 7. Meteorit Jesenice. Porfirna olivinova hondrula. Hondrulo sestavljajo evhedralna do subehedralna zrna olivina, potopljena v drobnazrnat osnovi. Presevna polarizirana svetloba, x nikoli.

Fig. 7. Meteorite Jesenice. Porphyritic olivine chondrule. Chondrule is composed of euhedral to subhedral olivine grains embedded in fine grained matrix. Plane-polarized light, x nicols.



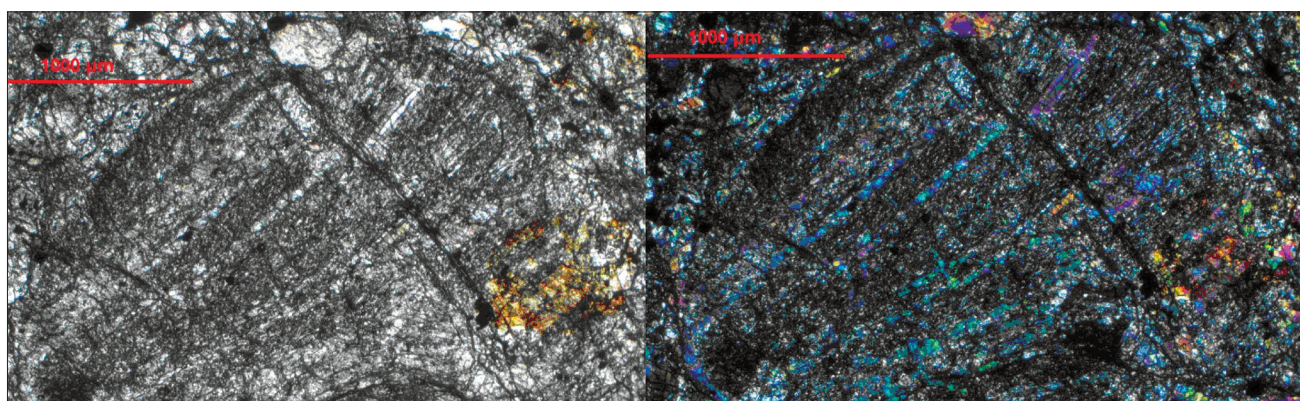
Sl. 8. Meteorit Jesenice. Porfirna olivinova hondrula s skorjico. Hondrulo sestavljajo zrna olivina (Ol) in plagioklaza (Pl). Skorjico tvorijo zrna piroksena (Px) in kovinskih mineralov (FeNi). SEM, BSE.

Fig. 8. Meteorite Jesenice. Porphyritic olivine chondrule with rim. Chondrule is composed of olivine (Ol) and plagioclase (Pl). Chondrule rim is composed of pyroxene (Px) and iron-nickel minerals (FeNi). SEM, BSE.



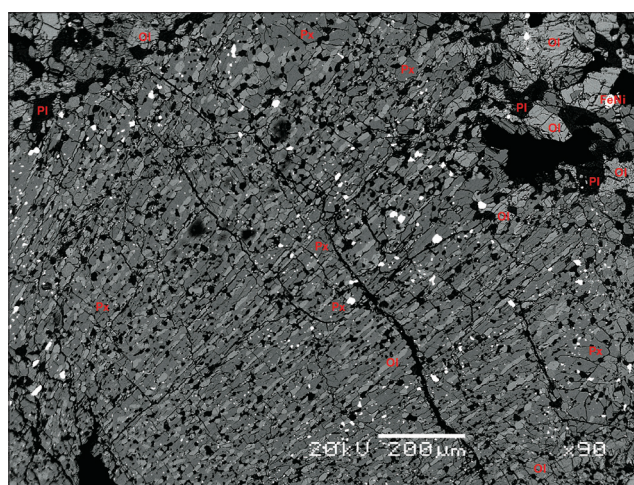
Sl. 9. Meteorit Jesenice. Porfirna piroksenova hondula. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno)

Fig. 9. Meteorite Jesenice. Porphyritic pyroxene chondrule. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



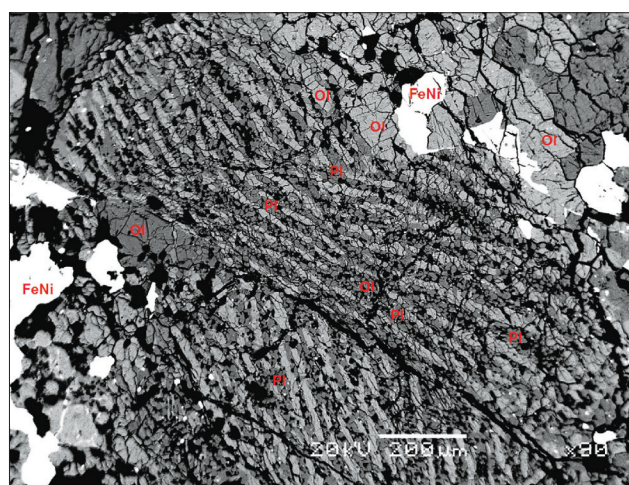
Sl. 10. Meteorit Jesenice. Pahljačasta piroksenova hondula. Drobna piroksenova zrna rastejo usmerjeno iz skupne nuklacijske točke. Siva zelo drobnazrnata osnova ima sestavo glinenecv. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 10. Meteorite Jesenice. Radial pyroxene chondrule. Fine-grained pyroxene crystals grow out of the common nucleation point. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



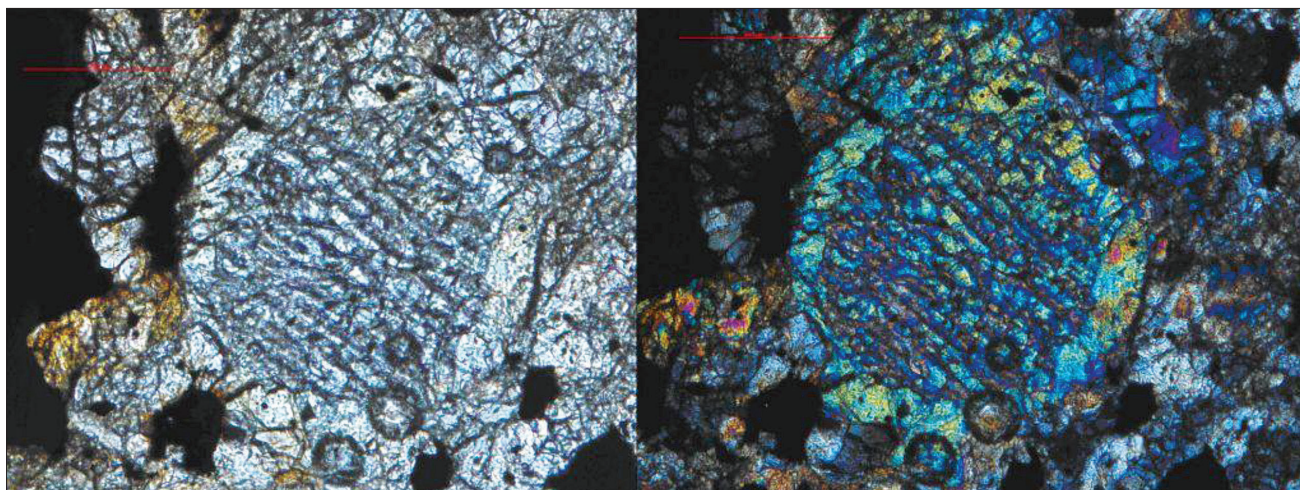
Sl. 11. Meteorit Jesenice. Pahljačasta piroksenova hondula, ki jo sestavljajo podolgovata zrna piroksena (Px) in olivina (Ol), zrna s sestavo glinenecv (Pl) in železovo-nikljevih mineralov (FeNi). SEM, BSE.

Fig. 11. Meteorite Jesenice. Radial pyroxene chondrule, which is composed of elongated pyroxene (Px) and olivine grains (Ol), feldspar (Pl) and iron-nickel (FeNi) minerals. SEM, BSE.



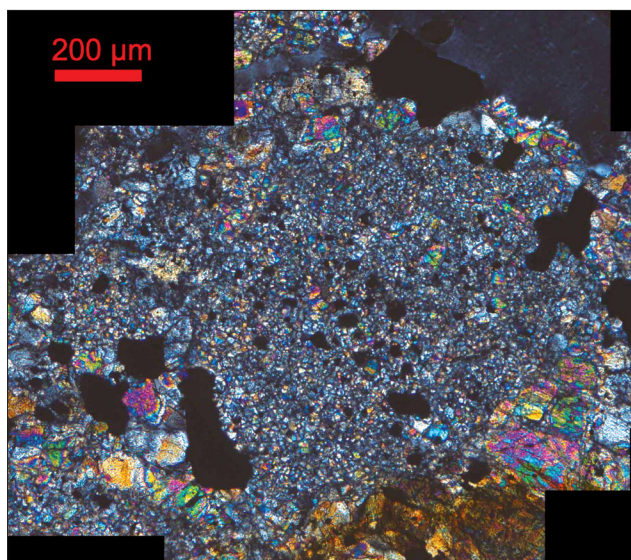
Sl. 13. Meteorit Jesenice. Polisomatska lamelarna olivino-va hondula je zgrajena iz podolgovatih zrn olivina (Ol) in plagioklaza (Pl) ter iz železovo-nikljevih mineralov (FeNi) v različnih orientacijah. SEM, BSE.

Fig. 13. Meteorite Jesenice. Polysomatic barred olivine chondrule is composed of elongated olivine (Ol) and plagioclase (Pl) grains, and iron-nickel minerals (FeNi) in different orientations. SEM, BSE.



Sl. 12. Meteorit Jesenice. Lamelarna olivinova hondrula z debelo zrnato skorjico. Presečna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 12. Meteorite Jesenice. Barred olivine chondrule with coarse-grained rim. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



Sl. 14. Meteorit Jesenice. Zrnata olivinova-piroksenova hondrula. Zrna olivina in piroksena so dovolj velika, da jih z optičnim mikroskopom prepoznamo. Velikost zrn se proti robu hondrule povečuje. Presečna polarizirana svetloba, x nikoli.

Fig. 14. Meteorite Jesenice. Granular olivine-pyroxene chondrule. Olivine and pyroxene grains are large enough that are recognizable with an optical microscope. The size of mineral grains is increasing toward the edge of chondrule. Plane-polarized light, x nicols.

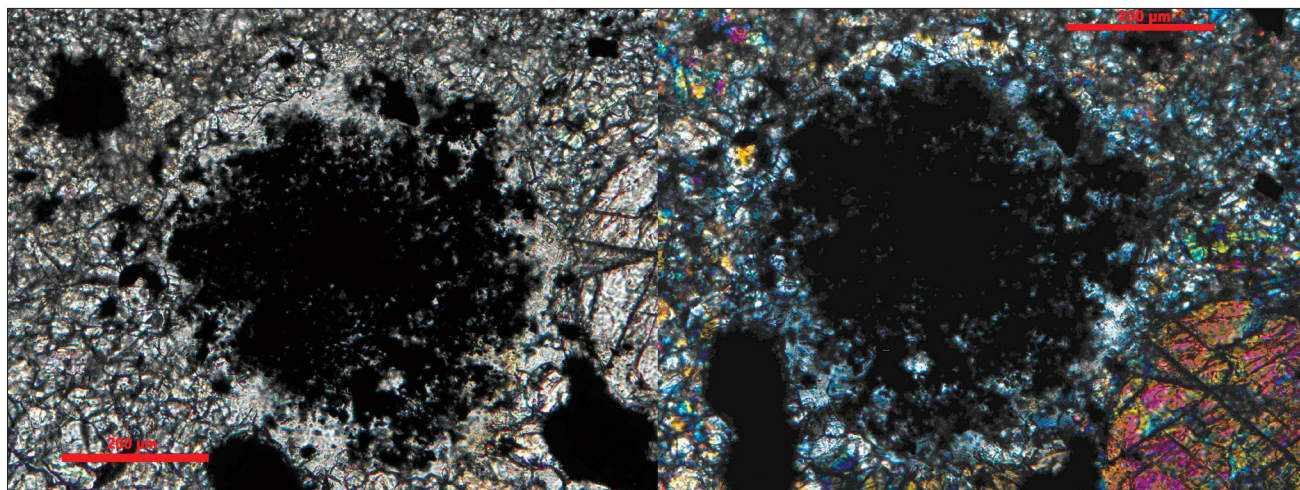
razdelili na več podtipov. Hondrule tipa-IA in tipa-IIA vsebujejo več kot 80 vol.% olivina. Hondrule tipa-IB in tipa-IIB pa vsebujejo več kot 80 vol.% piroksena. Hondrule z mešano sestavo sodijo v tip-IAB in tip-IIAB. Oznaka A pomeni, da hondrula vsebuje več kot 80 vol.% olivina, oznaka B pa, da hondrula vsebuje več kot 80 vol.% piroksena. Oznaka AB pa pomeni, da gre za hondrulo z mešano sestavo olivina in piroksena. Po Searsovi klasifikaciji (SEARS et al., 1992 v SEARS, 2004) so hondrule razdeljene v razrede na podlagi sestave njihove mezostaze in prevladujočega minerala (olivina ali piroksena). Za določitev sestave mezostaze se uporablja fazni diagram kremen

- albit - anortit. Za sestavo olivina oz. piroksena pa se uporablja fazni diagram FeO - CaO. Kalcij je pomembna sledna prvina v opisanem sistemu olivina.

Zaporedje kristalizacije mineralov, ki sestavljajo hondrulo, je odvisno od povprečne sestave hondrule in od stopnje termične metamorfoze. V večini hondrul iz taline najprej začne kristaliti olivin (sl. 17). To se zgodi pri temperaturah 1400-1600 °C. Zato so zrna olivina zelo pogosto evhedralne oblike. Naslednja iz taline kristalijo zrna zlitine železa in niklja, ki vsebujejo manj kot 5.2 atom.% Ni (sl. 18). To poteka pri temperaturah 1513-1536 °C. Pri tem nastanejo minerali s kubično telesno centrirano osnovno celico. Sledi kristalizacija zrn zlitine železa in niklja, ki vsebujejo več kot 5.2 atom.% Ni. Temperatura kristalizacije z naraščajočo vsebnostjo Ni pada in doseže minimum pri 1425 °C ter vsebnosti Ni 60-70 atom.%. Taki minerali imajo kubično ploskovno centrirano osnovno celico (LAURETTA et al., 2006). Sledi kristalizacija piroksenovih zrn. Klinopiroksen kristalizira približno pri temperaturi 919 °C, ortopiroksen pa pri temperaturi okrog 799 °C. Pri hondritih vseh tipov klinopiroksen kristalizira pri višji temperaturi kot ortopiroksen. V L hondritih kristalizira klinopiroksen večinoma pri temperaturi 927 °C, ortopiroksen pa pri temperaturi 813 °C (HARVEY et al., 1993). V primeru nekaterih hondrul v navadnih hondritih se zaporedje kristalizacije olivina in piroksena menjava. Piroksen in olivin se lahko celo med seboj preraščata. Zadnji kristalizirajo glinenci. Njihova kristalizacija poteka pri temperaturah 750-850 °C (VAN SCHMUS et al., 1968). Zato so zrna glincev pogosto anhedralna.

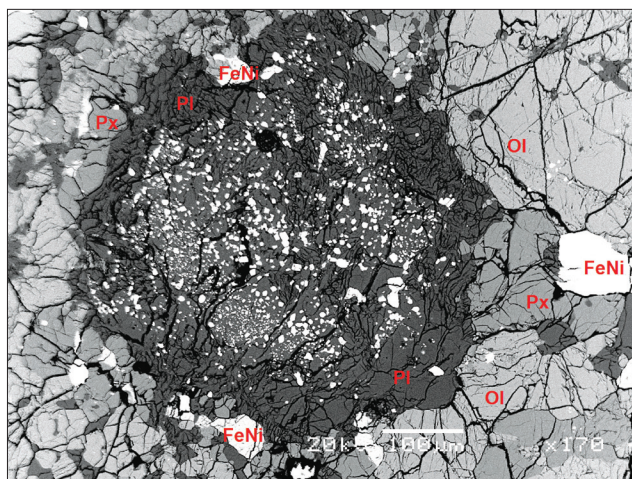
Kemična sestava piroksenov v meteoritu Jesenice se spreminja: MgO 22,1 do 14,0 mas.%, SiO₂ 50,9-54,6 mas.%, CaO 15,6 do 15,2 mas. % in FeO 11,3 do 6,6 mas.% (ŠMIT et al., 2011).

Relikti so zrna olivina in ortopiroksena s kemično sestavo, ki se bistveno razlikuje od kemične sestave zrn enakih mineralov v isti hondruli, v



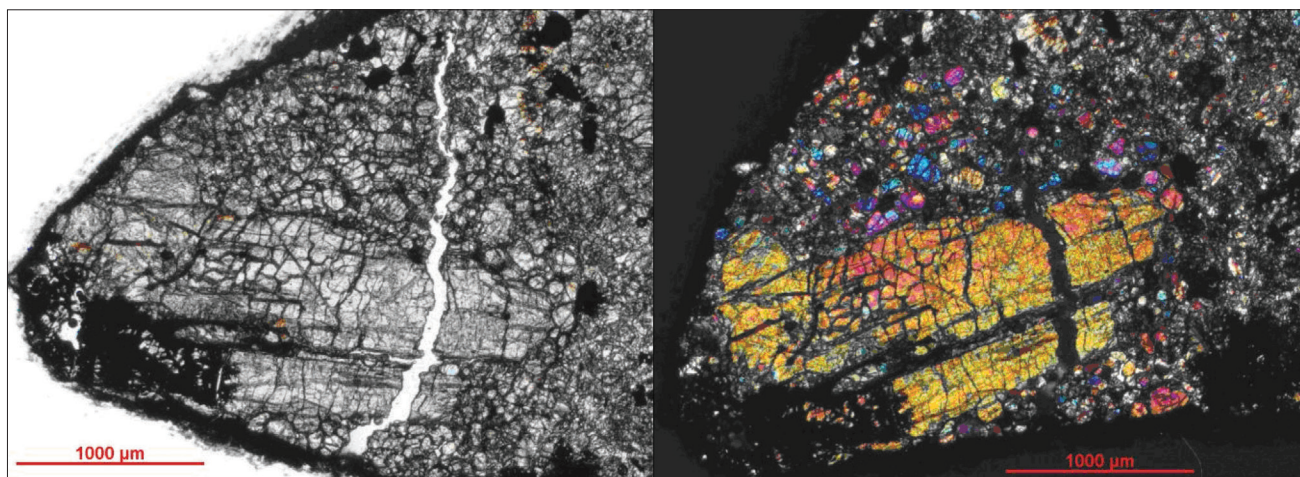
Sl. 15. Meteorit Jesenice. Kovinska hondrula. Središče hondrule je sestavljeno predvsem iz drobnih zrn nepresevnih železovo-nikljevih mineralov. Skorjico oblikujejo zrna glincev. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 15. Meteorite Jesenice. Metal chondrule. The central part of chondrule is composed mostly of opaque iron-nickel minerals. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).



Sl. 16. Meteorit Jesenice. Kovinska hondrula, ki jo sestavljajo zrna železovo-nikljevih mineralov (FeNi) potopljena v osnovo, ki jo sestavljajo zrna plagioklaza (Pl). Plagioklazi sestavljajo tudi skorjico hondrule. V okolici hondrule so vidna še zrna olivina (Ol) in zrna piroksena (Px). SEM, BSE.

Fig. 16. Meteorite Jesenice. Metal chondrule, which is composed of iron-nickel minerals (FeNi) embedded in plagioclase matrix (Pl). Plagioclase also forms chondrule rim. In the chondrule's surroundings are pyroxene (Px) and plagioclase (Pl) grains also present. SEM, BSE.

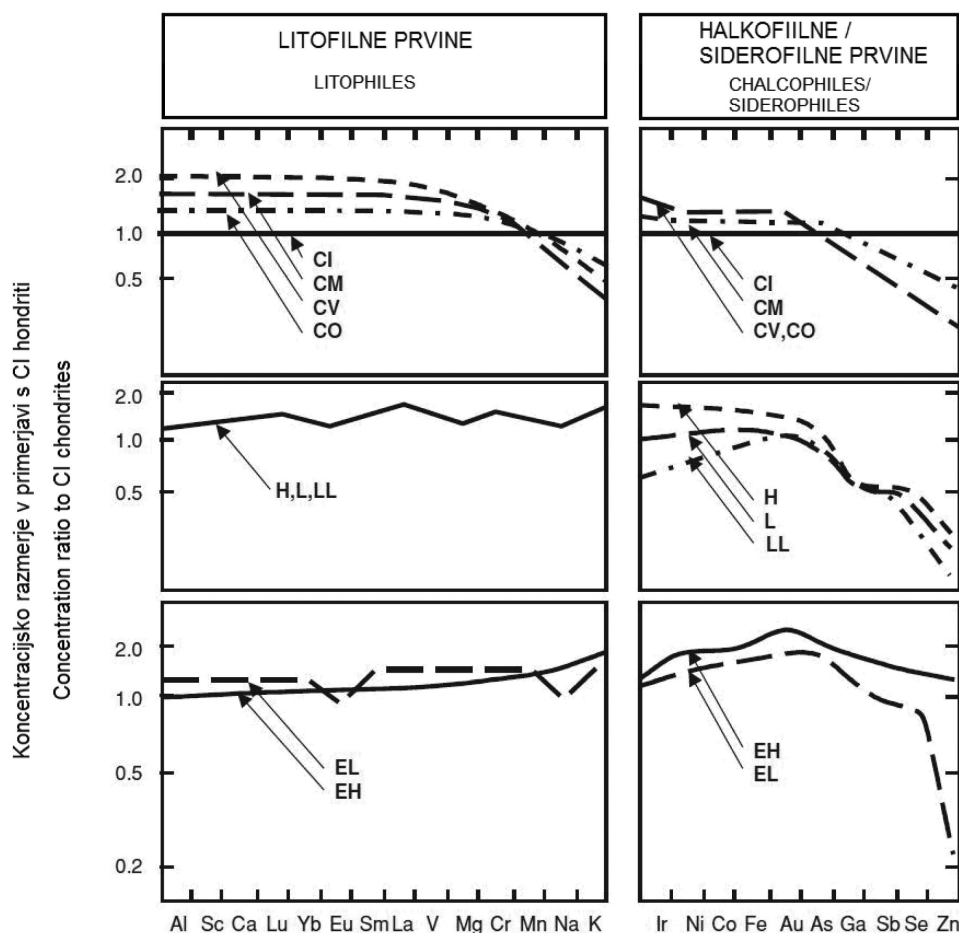


Sl. 17. Porfiriska olivinova hondrula z reliktnim zrnem olivina. Presevna polarizirana svetloba, || nikoli (levo), x nikoli (desno).

Fig. 17. Porphyritic olivine chondrule which contains olivine grain. Plane-polarized light, || nicols (left), x nicols (right).

kateri leži relikt (LAURETA et al., 2006). Predvsem se razlikujejo v vsebnosti FeO. Reliktne zrna imajo pogosto conarno sestavo, kar je v neskladju z in situ kristalizacijo iz taline gostiteljske hondrule. Prevladuje mnenje, da so relikti minerali

predhodniki hondrul, ki so preživeli proces formiranja hondrul ne da bi se stalili ali raztopili. Zato relikti predstavljajo možnost za študij kemične in mineralne sestave predhodnikov hondrul. JONES (1996) je podal oceno, da 15 % vseh hondrul



Sl. 18. Kemična sestava hondritov glede na standard CI hondrit (povzeto po SEARS, 2004)

Fig. 18. Chemical composition of chondrites according to CI chondrite standard (adopted according to SEARS, 2004)

vsebuje relikte, RAMBALDI (1981) pa ocenjuje, da relikte vsebuje polovica vseh porfirskih hondrul v nehomogenih navadnih hondritih.

V eni izmed hondrul v vzorcu meteorita Jesenice smo odkrili veliko poligonalno zrno olivina, ki smo ga zaradi velikosti in oblike označili za reliktno zrno (sl. 17). To zrno je po velikosti močno odstopalo od vseh ostalih olivinovih zrn v isti hondruli. Z raziskavami, ki bodo sledile, bomo določili kemično sestavo tega zrna in tako potrdili ali ovrgli teorijo o reliktnem zrnu.

Sortiranje hondrul glede na velikost je osnovna lastnost in posledica formacijskih mehanizmov. Poznamo več vrst sortiranja hondrul – teorije frakcionacije, ki jih poimenujemo po glavnem mehanizmu sortiranja ali po njihovih avtorjih (SEARS, 2004). Aerodinamsko sortiranje pomeni sortiranje hondrul med prehodom skozi oblak plina in prahu. WHIPPLE (WHIPPLE, 1966 v SEARS, 2004) je predlagal, da planetezimal pri prehodu skozi oblak plina in prahu zajame samo večje hondrule zaradi njihove večje obstojnosti pri potovanju skozi viskozno tekočino. Teorija balističnega sortiranja predpostavlja, da je sortiranje potekalo med premikanjem od kraja nastanka do današnje lokacije hondrule v meteoritu. Tretja vrsta sortiranja pa je abrazijsko sortiranje. Po tej teoriji naj bi bile nekatere vrste hondrul abradirani fragmenti magmatskih kamnin. Obstajata tudi dve glavni skupini teorij frakcionacije kovin in silikatov. Prva skupina teorij predpostavlja, da je ta proces potekal v solarni meglici, po drugi pa naj bi potekal na

starševskem telesu meteoritov. Teorijo frakcionacije v meglici sta predlagala DONN in SEARS (1963 v SEARS, 2004). Menila sta, da je ločitev kovin od silikatov v meglici rezultat počasnejšega procesa akrecije zrn kovin kot akrecije zrn silikatov. DODD (1981 v SEARS, 2004) je predlagal, da je vzrok za frakcionacijo v aerodinamskem sortiranju. LARIMER in WASSON (1988 v SEARS, 2004) sta menila, da so bili na začetku vsi elementi v meglici v plinasti obliki. Frakcionacija naj bi bila posledica različnih temperatur kristalizacije kovin in silikatov. Nastala trdna snov naj bi iz območja formiranja padla v osrednji del osončja v različnih časih, kar naj bi pojasnilo frakcionacijo. LARIMER in ANDERS (1967 v SEARS, 2004) vidita vzrok za frakcionacijo v vsebnosti siderofilnih elementov in s tem povezanim magnetizmom. Teorije frakcionacije na starševskem telesu so vpeljali UREY in CRAIG (1953 v SEARS, 2004) ter ANDERS (1964 v SEARS, 2004). Po njihovem mnenju je edina možnost za ločitev kovin od silikatov na starševskih telesih taljenje in kasnejša gravitacijska separacija. HUANG in sodelavci (1996 v SEARS, 2004) so mnenja, da je prišlo do ločitve med kovinami in silikati zaradi aerodinamskega in gravitacijskega sortiranja na starševskem telesu. Sortiranje naj bi potekalo v regolitu (vrhnjem sloju starševskega telesa), ko so se iz notranjosti sproščale lahko hlapne komponente.

Osnova hondritov naj bi nastala iz solarne meglice ali pa naj bi šlo za mezostazo hondrul. Sestava osnove navadnih hondritov je odvisna

predvsem od petrološkega tipa meteorita. Nižji petrološki tipi vsebujejo drobnostno osnovo z olivinom, revnim z FeO, drugimi silikati, spinelom, kovinami, sulfidi in kalcitom. Z naraščanjem petrološkega tipa osnova v meteoritih postaja vse bolj debeložrnata ter podobna zrnem, ki sestavljajo hondrule. Prav tako imajo višji petrološki tipi vse manj vode in ogljika ter vse več kovin (SEARS, 2004).

Povprečno kemično sestavo hondritov primerjamo vedno kot razmerje glede na povprečno kemično sestavo CI hondritov. To razmerje je prikazano na sliki 20 (SEARS, 2004). Iz grafa je razvidno, da navadni hondriti vsebujejo 1.2 do 1.5 kratno količino litofilnih prvin kot ogljikovi hondriti. So pa navadni hondriti osiromašeni z nekaterimi siderofilnimi in halkofilnimi prvimi, kot so npr. Ga, Sb, Se in Sn. EH hondriti so malenkostno obogateni z nekaterimi redkimi zemljami ter bolj obogateni predvsem z Mn, Na in K. EL hondriti pa so predvsem zelo osiromašeni s Se in Zn. Kemično sestavo hondrul so ugotavljali GROSSMAN in WASSON (1983 v SEARS, 2004), KALLEMEYN (1988 v SEARS, 2004) in HUANG in sodelavci (1996, v SEARS, 2004) večinoma z nevtronsko aktivacijsko analizo. Rezultati so pokazali, da so hondrule z majhno količino FeO (v vseh razredih hondritov) osiromašene z litofilnimi elementi, kot so krom, mangan, natrij in kalij, v primerjavi s CI ogljikovi hondriti. Obratno pa velja, da imajo hondrule z veliko vsebnostjo FeO podobno količino litofilnih elementov kot CI hondriti.

Zaključek

Če v zaključku povzamemo ugotovitve o klasifikaciji meteorita Jesenice in jih združimo z ugotovitvami, ki jih je podal Bischoff s sodelavci (BISCHOFF et al., 2011) v svojem članku, je tekstura meteorita Jesenice zelo močno rekristalizirana z majhnim številom dobro definiranih hondrul. Zato meteorit Jesenice uvrščamo v petrološki tip 6. Najbolj pogosto mineralno fazo v meteoritu Jesenice predstavlja olivin. Zrna olivina zelo variirajo po obliki in velikosti. Večina jih ima močno valovito potemnitev. Poleg tega pa se v olivinu pojavljajo tudi planarne razpoke ali udarne lamele. Zato meteorit Jesenice glede na stopnjo udarne metamorfoze uvrščamo med hondrite, ki so bili izpostavljeni šibki udarni metamorfozi (S3 hondrit). Bischoff et al. (BISCHOFF et al., 2011) med drugim tudi ugotavljajo, da je kemična sestava olivina v meteoritu Jesenice homogena. Ugotovili so, da olivin povprečno vsebuje $25,1 \pm 0,4$ mol.% fayalita. Sestava pa niha med vrednostmi 23,9 in 25,8 mol.% fayalita, kar ustreza sestavi navadnih hondritov z nizko vsebnostjo železa (OC L hondritom). Meteorit Jesenice je zato glede na veljavno klasifikacijo meteoritov hondritov klasificiran kot OC L6 S3 hondrit. Če povzamemo, bi lahko meteorit Jesenice opredelili kot nediferenciran kamnit meteorit, ki spada v razred hondritov, skupino navadnih hondritov, podskupino L hondritov, ki je

bil šibko metamorfoziran ter je šibko preperel (BISCHOFF et al., 2011).

Zahvala

Avtorji bi se radi zahvalili obema recenzentoma, doc. dr. Mateji Gosar in Juretu Atanackovu, za popravke in komentar k vsebini članka. Brez njune pomoči bi bila vsebina članka okrnjena in ne bi dosegla svojega namena.

Literatura

- ATANACKOV, J., JERŠEK, M., KAC, J., Kladnik, G. & MIRTIC, B. 2010: Meteorit z Mežakle. In: KANOBELJ T (eds): Meteorit z Mežakle. Gornjesavski muzej in Prirodoslovni muzej Slovenije: 7-28.
- BISCHOFF, A., HORSTMANN, M., PACK, A., LAUBENSTEIN, M. & HABERER, S. 2010: Asteroid 2008 TC₃ – Almahata Sitta: A spectacular breccia containing many different ureilitic and chondritic lithologies. *Meteoritics & Planetary Science*, 45/10-11: 1638–1656, doi:10.1111/j.1945-5100.2010.01108.x.
- BISCHOFF, A., JERŠEK, M., GRAU, T., MIRTIC, B., OTT, U., KUČERA, J., HORSTMANN, M., LAUBENSTEIN, M., HERMANN, S., ŘANDA, 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.
- CURK, U. 2009: Mineralogija navadnih hondritov. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnoteniška fakulteta, Oddelek za geologijo 149. str.
- GOUNELLE, M., SPURNÝ, P. & BLAND, A. P. 1997: The orbit and atmospheric trajectory of the Orgueil meteorite from historical records. *Meteoritics & Planetary Science*, 44/1: 135-150.
- GRESHAKE, A., BISCHOFF, A. & PUTNIS, A. 1997: Transmission electron microscope study of compact Type A calcium-aluminium-rich inclusions from CV3 chondrites: Clues to their origin. *Meteoritics & Planetary Science*, 33/1: 75-87.
- GRESHAKE, A., WOLFGANG, K., ARNDT, P., MAETZ, M., FLYNN, G. J. & BISCHOFF, A. 1998: Heating experiments simulating atmospheric entry heating of micrometeorites: Clues to parent body sources. *Meteoritics & Planetary Science*, 33/2: 267-290.
- HARVEY, R. P., BENNET, M. L. & MCSWEEN, H. Y. 1993: Pyroxene equilibration temperatures in metamorphosed ordinary chondrites. *Lunar and Planetary Inst., Twenty-Fourth Lunar and Planetary Science Conference*, 615-616.
- HORSTMANN, M., BISCHOFF, A., PACK, A. & LAUBENSTEIN, M. 2010: Almahata Sitta-Fragment MS-CH. *Meteoritics & Planetary Science*, 45/10-11: 1657-1667, doi: 10.1111/j.1945-5100.2010.01107.x.
- JANOTS, E., GNOSE, E., HOFMANN B. A., GREENWOOD, R. C., FRANCH, I. A. & BISCHOFF, A. 2011: Jiddat al Harasis 422: A ureilite with an extremely

- high degree of shock melting. *Meteoritics & Planetary Science*, 46/1: 134–148.
- JONES, R. H. 1996: FeO-rich, porphyritic pyroxene chondrules in unequilibrated ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60/16: 3115–3138.
- KEIL, K. & BISCHOFF, A. 2008: Northwest Africa 2526: A partial melt residue of enstatite chondrite parentage. *Meteoritics & Planetary Science*, 43/7: 1233–1240.
- LAURETTA, D.S., MCSWEEN, H.Y. 2006: Petrology and Origin of Ferromagnesian Silicate Chondrules. In: LAURETTA D.S. et al. (eds.): *Meteorites and the Early Solar System II*. University of Arizona Press, 431–459.
- LENART, A., JERŠEK, M., MIRTČ, B. & ŠTURM, S. 2010: Meteorite Jesenice: mineral and chemical composition of the fusion crust of ordinary chondrite = Meteorit Jesenice: Mineralno-kemijska sestava žgalne skorje navadnega hondrita. *Geologija*, 53/ 2: 139–146, doi: 10.5474/geologija.2010.011.
- LLORCA, J., CASANOVA, I., PACK, A., TRIGO-RODRÍGUEZ, J., MAIDEO, J., BISCHOFF, A., OTT, U., FRANCH, I. A., GREENWOOD, R. C. & LAUBENSTEIN, M. 2009: The Puerto Lápice eucrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 44/2: 159–174.
- 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.
- MILER, M. & GOSAR, M. 2012: Dve leti raziskav meteorita Javorje = Two years of the Javorje meteorite investigations. *Geologija*, 55/1: 5–16, doi:10.5474/geologija.2012.001.
- NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D., MORBIDELLI, A., BOTTKÉ, W. A., GLADMAN, B. & HÄGGSTRÖM, T. 2007: Express delivery of fossil meteorites from the inner asteroid belt to Sweden. *Icarus*, 188/2: 400–413, doi:10.1016/j.icarus.2006.11.021.
- NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D., MORBIDELLI, A. & BOTTKÉ, W. A. 2008: Asteroidal source of L chondrite meteorites. *Icarus*, 200/2: 698–701, doi:10.1016/j.icarus.2009.12.016.
- NORTON, R. 2002: *The Cambridge Encyclopedia of the Meteorites*. Cambridge : Press Syndicate of the University of Cambridge: 354 p.
- PRIOR, G. T. 1916: On the genetic relationship and classification of meteorites. *The Mineralogical Magazine*, 18: 26–44.
- RAMBALDI, E. R. 1981: Relict grains in chondrules. *Nature*, 293: 558–561.
- SEARS, D. 2004: *The Origin of Chondrules and Chondrites*. Cambridge University Press: 209 p.
- SEPP, B., BISCHOFF, A. & BOSBACH, D. 2001: Low-temperature phase decomposition in iron-nickel metal of the Portales Valley meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, 36/5: 587–595.
- SOKOL, A., & BISCHOFF, A. 2005: Meteorites from Botswana. *Meteoritics & Planetary Science*, 40/9: A177–A184.
- SOKOL, A., BISCHOFF, A., MARHAS, K. K., MEZINGER, K & ZINNER, E. 2007: Late accretion and lithification of chondritic parent bodies: Mg isotope studies on fragments from primitive chondrites and chondritic breccias. *Meteoritics & Planetary Science*, 42/7: 1291–1308.
- SPURNÝ, P., BOROVNIČKA, A., J., KAC, J., KALENDA, P., ATANACKOV, J., Kladnik, G., HEINLEIN, D & GRAU, T. 2010: Analysis of instrumental observations of the Jesenice meteorite fall on April 9, 2009. *Meteoritics & Planetary Science*, 45/8: 1392–1407, doi:10.1111/j.1945-5100.2010.01121.
- STÖFFLER, D. KEIL, K. & SCOTT, E. R. D. 1991: Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*: 55/12: 3845–3867, doi:10.1016/0016-7037(91)90078-J.
- ŠMIT, Ž., JEZERŠEK, D., PELICON, P., VAVPETIČ, P., JERŠEK, M. & MIRTČ, B. 2011: Analysis of a chondrite meteorite from Slovenia. X-ray spectrum: 40/3: 205–209, doi:10.1002/xrs.1307.
- VAN SCHMUS, W. R., RIBBE, P. H. 1993: The composition and structural state of feldspar from chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57/12: 1327–1342.
- VOGEL, N., BAUR, H., BISCHOFF, A., LEYA, A. & WIELER, R. 2004: Noble gas studies in CAI from CV3 chondrites: No evidence for primordial noble gases. *Meteoritics & Planetary Science*, 39/5: 767–778, doi:10.1111/j.1945-5100.2010.01161.x.
- VOGEL, N., RAINER, W., BISCHOFF, A & BAUR, H. 2003: Microdistribution of primordial Ne and Ar in fine grained rims, matrices, and dark inclusions of unequilibrated chondrites – clues on nebular processes. *Meteoritics & Planetary Science*, 38/9: 1399–1418.
- WEISBERG, M. K., MCCOY, T. J. & KROT, A. N. 2006: Systematics and Evolution of Meteorite classification. In: LAURETTA, D. S., & MCSWEEN, H. Y. (eds.): *Meteorites and the Early Solar System II*. University of Arizona Press, 19–52.
- WLOTZKA, F. A. 1993: Weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28/3: 460–460.
- Internet 1: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> (31. 8. 2012) Vogel
- Internet 2: <http://www.meteoritelab.com/meteorites/meteorite-classification.php> (18. 5. 2012)

Younger Paleozoic, Mesozoic and Tertiary oolitic and oncolitic beds in Slovenia – An Overview

Mlajše paleozojske, mezozojske in terciarne oolitne in onkolitne plasti v Sloveniji – Pregled

Stevo DOZET & Bojan OGORELEC

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana
e-mail: stevo.dozet@gmail.com; bojan.ogorelec@geo-zs.si

Prejeto / Received 4. 6. 2012; Sprejeto / Accepted 19. 10. 2012

Key words: Oolites, oncolites, Upper Carboniferous, Permian, P/T boundary, Triassic, Jurassic, Cretaceous, Miocene, Dinarides, Slovenia

Ključne besede: Oolitni, onkoliti, zgornji karbon, perm, P/T meja, trias, jura, kreda, miocen, Dinaridi, Slovenija

Abstract

Oolitic and oncoidal rocks, microfacies, depositional environments and their stratigraphic ranges in Slovenia are subjects of this article. Various types of calcareous ooids are present in the Upper Carboniferous, Permian and Tertiary (Paleocene and Miocene) beds and specially at many levels in an up to 6000 meters thick stratigraphic succession of the Mesozoic age. Sedimentological investigations have been carried out specially in the Triassic and Jurassic beds. The ooids occurring in the shallow-water and intertidal carbonate environment have been grouped into seven types and oncoids into four types. Oncoids are rather more abundant in Carnian and Norian/Rhaetian age. Late dolomitization of some oolitic beds is next to cementation the main diagenetic feature.

Izvleček

Predmet preglednega članka so oolitne in onkoidne plasti, mikrofacies, okolje nastanka ter njihova stratigrafska razširjenost v Sloveniji. Različne vrste apnenčevih ooidov najdemo v plasteh zgornjekarbonske, permske in terciarne (paleocen in miocen) starosti, posebej pestro pa so zastopane v več stratigrafskih nivojih mezozojskega obdobja, ki lahko doseže debelino tudi do 6000 metrov. Sedimentološko so bile v ta namen raziskane predvsem triasne in jurske plasti. Ooide, ki so nastajali v različnih okoljih plitvomoškega in medplimskega karbonatnega okolja, lahko razvrstimo v sedem skupin, onkoide pa v štiri skupine. Onkoidi so nekoliko pogostejši v karnijskem in norijsko/retijskem obdobju. Ponekod je tako oolitne kot onkoidne plasti zajela poznodiagenetska dolomitizacija.

Introduction

During regional and detailed geological mapping for the Basic Geological Map of SFR Yugoslavia on the scale of 1 : 100,000 (1964–1988) as well as stratimetric profilings through the Uppermost Permian and Mesozoic carbonate beds in Slovenia numerous oolitic horizons at various stratigraphic levels in different geotectonic units have been ascertained and described. Some oolitic beds were observed also in the Upper Carboniferous and Lower Permian succession in Karavanke Mts., in the Paleocene limestone of the Karst region and in Upper Miocene (Badenian) biocalcarenes in the northeastern Slovenia.

The purpose of this paper is to describe and classify ooids, oncoids, pisoids and their horizons as well as to show their spatial distribution in Slovenia. Oolitic rocks are even predominant facies in the Jurassic stratigraphic sequence and,

consequently, they play an important role in the building of the study area. Therefore, we discuss their depositional, paleogeographic and stratigraphic position. These rocks contain somewhere abundant fauna and flora.

Previous investigations

Important geological data for this work have been obtained during systematic regional geological mapping for the Geological Map of SFR Yugoslavia on the scale of 1 : 100,000 and the Geological Map of Slovenia on the scale of 1 : 50,000 (Map Sheet Grosuplje; DOZET – in print). Besides, stratimetric measuring and profiling as well as precise sedimentological and facial studies of the treated strata have been performed. Very good and valuable data were obtained in the frame of some other projects, such as *Mesozoic in Slovenia, Petrography and Sedimentology of Carbona-*

te Rocks of Slovenia and New Generation of Geological Maps in Slovenia.

More in detail are described Jurassic oolitic beds of the Mala gora section in the Suha krajina area (STROHMENGER et al., 1987a,b; STROHMENGER, 1988; STROHMENGER & DOZET, 1990) in the Javorški vrh-Kališe section on Trnovski gozd (OREHEK & OGORELEC, 1979) and at Verd near Vrhnika (DOZET, 2000c). The general summary of oolitic limestone and dolomite of the Mesozoic age in Slovenia is represented in the preliminary article of both authors (OGORELEC & DOZET, 2000). This publication is also the basis of present study.

Within the Mesozoic period oolitic beds are best represented and expressive in the Lower Triassic (GRAD & OGORELEC, 1980; DOLENEC T. et al., 1981; DOZET, 2000a; KOLAR-JURKOVŠEK et al., 2011b; and other sources), less in Carnian in the Mežica (PUNGARTNIK et al., 1982) and Zaplaza area (DOZET, 2004b), as well as in the Dachstein Limestone and Main Dolomite of the Norian-Rhaetian age (OGORELEC, 1988; DOZET, 1991a; OGORELEC & ROTHE, 1992). The Upper Carboniferous and Lower Permian oolites and oncolites have been studied by NOVAK (2007a, b) at Tržič, and by OGORELEC et al. (1999a) during the Karavanke road tunnel reaserches. The Miocene oolites are established in the Kozje area (ANIČIĆ et al., 2002), and oncolites in the Dolenjska area (MIKUŽ, 2004) and at Moravče (MIKUŽ, 2007). A lot of data on oolites and oncolites can be found also in the monography *The Geology of Slovenia* (PLENIČAR et al. – eds., 2009), particularly in the chapters on the *Middle and Upper Permian* (SKABERNE et al., 2009), *Triassic* (DOZET & BUSER, 2009) and *Jurassic* (BUSER & DOZET, 2009). Photographs and descriptions of oolitic varieties of the Mesozoic carbonate rocks from the Slovenian territory are also in the monography *Microfacies of Mesozoic Carbonate Rocks of Slovenia* (OGORELEC, 2011).

Geological setting

From the geotectonic point of view the studied area belongs to Dinarides and predominantly to the External Dinarides comprising the Julian and Dinaric Carbonate Platforms with intermediate Slovenian Basin (BUSER, 1989), where in a shallow-marine environment up to 6500 meters thick stratigraphic sequence has been deposited. The External Dinarides consist predominantly of Triassic, Jurassic and Cretaceous carbonate rocks – limestone, dolomitic limestone, dolomite and carbonate breccias (Fig. 1), and lesser of Uppermost Permian and Paleogene limestone.

The oolites are characteristic facies particularly in certain Mesozoic formations, especially in up to some hundred meters thick horizons in different parts of shallow-marine Jurassic rocks of the Dinaric Carbonate Platform. In thinner horizons they occurred also in the Upper Carboniferous and Lower Permian successions, in the Permian/Triassic (P/T) boundary interval, in Lower Triassic limestone and dolomite as well as in Carnian

and Rhaetian beds and in some parts of Lower and Upper Cretaceous and Paleogene limestone.

The oncolites appear in some carbonate horizons of Lower Permian, Carnian, Norian and Rhaetian in the form of thinner intercalations. Thicker oncolitic beds appear in some Jurassic intervals and in the Upper Cretaceous horizon of the Dinaric Carbonate Platform.

UPPER CARBONIFEROUS

The oldest up to now known oolitic rocks in the Slovenian territory were detected in the Karavanke Mts. Ooids are found in some beds of the bioosparitic limestone on Suhi vrh above the Karavanke road tunnel (OGORELEC et al., 1999a). They have a micritic and radial structure and are mixed with echinoderm plates and rare schwagerinas (Pl. 1, Fig. 8). The oolitic beds are described more in detail from the uppermost Carboniferous (Gzhelian) Schulterkofel Formation, previously known as the Lower Pseudoschwagerina Limestone, from Vratni vrh above the Tržiška Bistrica valley north of Tržič (NOVAK, 2007a,b).

Oolitic beds within the carbonate-clastic sequence are scarce. Limestone of grainstone type (Pl. 1, Figs. 7 and 8) contains beside ooids some fusulinids of genera *Staffella* and *Schwageriniformis*, as well as algal and molluscan fragments, echinoid plates and some percent of detrital quartz grains (NOVAK, 2007a).

PERMIAN

Lower Permian

The Lower Permian beds in Karavanke Mts. are most completely developed in Dovžanova soteska north of Tržič. They are composed of the Dovžanova soteska Formation, the Born Formation and Rigelj Beds (NOVAK, 2007a,b). In spite of some intermediate discordances the total thickness of the Lower Permian sequence reaches there up to 600 meters. Beds with ooids have been deposited in the continental-littoral belt of the shallow shelf; the oncoid horizon in the middle part of Rigelj Beds, however, in an open-sea lagoon.

Oolites are rarely occurring as thin lens-shaped beds of a bioosparitic limestone of grainstone type close above the basal bed of siltstone with quartz pebbles of the Born Formation, and in an individual bed in the lower part of Rigelj Beds. Ooids are small. They are up to 3 mm thick having often fusulinid foraminifers, crinoids, gastropods or detritic quartz grains in their cores (NOVAK, 2007a). Substantial number of cores were dissolved during diagenesis and filled with sparry calcite (Pl. 1, Fig. 6) during short-lasting subaerial exposure-phases.

In the upper part of Rigelj Beds, just below the Tarvis Breccia appear in Dovžanova soteska at Tržič beds of the black oncobiosparitic limestone of grainstone and packstone types (No-

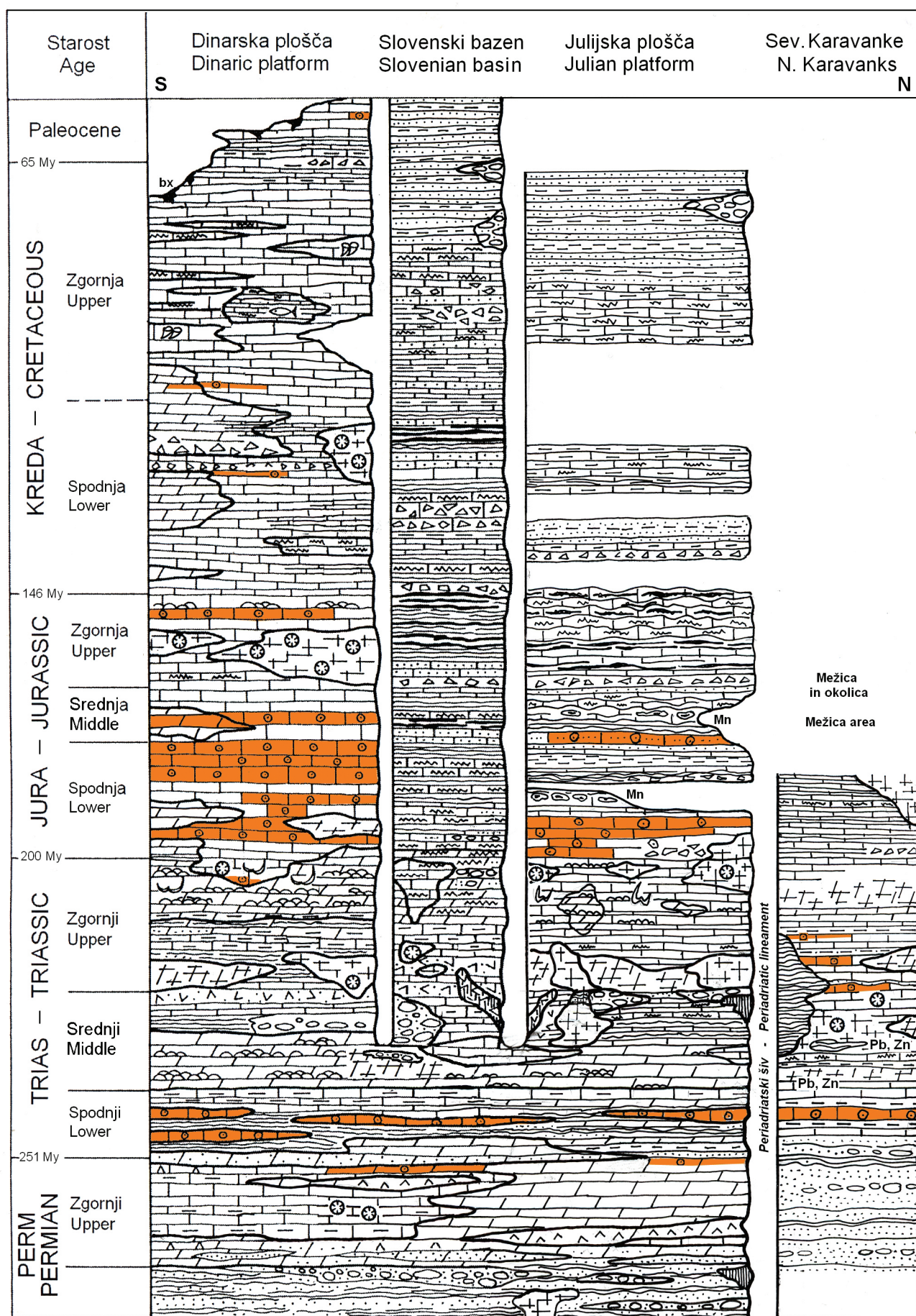


Fig. 1. Schematic depiction of oolitic rocks in Mesozoic beds development in various paleogeographic units of Slovenia (adapted after OGORELEC, 2011)

VAK, 2007a,b). Oncoids of the *Osagia* type differ in shapes having up to 15 mm in size and adapting their forms to the fossil shapes in their cores. They are represented by fusulinid foraminifers, algae and echinoderms (Pl. 1, Fig. 5). The 20 cm thick topmost part of the oncoid horizon is partly recrystallized.

Upper Permian

The Upper Permian beds below the P/T interval are built of carbonate rocks: dolomite, limestone, dolomitic limestone and dolomitic marlstone. They are characterized by dark to black colour and clear stratification. According to texture the limestone can be micritic, biomicritic and biointramicritic having up to 10 % of noncarbonate admixture. The dark colour of the limestone is a consequence of organic admixture and pyrite pigment.

The Upper Permian carbonate succession, that in the western Slovenia reaches up to 400 meters and in the eastern part of Sava Folds several meters to several tens meters of thickness, occurs in two developments. In the western and central Slovenia they are developed as the Žažar Formation (RAMOVŠ, 1858; BUSER et al., 1989) with rare interbeds of dolomite, plates of marlstone and lenses of evaporitic minerals, mainly gypsum. In Karavanke Mts. occurs the Karavanke Formation (BUSER et al., 1989) which is developed as a bedded dolomite with intermediate packets of cellular dolomite of the *rauhwacke* type. Limestone beds occur exceptionally. This development is an equivalent of the Bellerophon Formation in the Southern Alps (BUGGISCH, 1974; NOÉ, 1987). The fossils in the Žažar Limestone succession are quite common, in contrast to their rare occurrences in the dolomite of the Karavanke Formation. Most common and important fossils are algae *Gymnocodium bellerophontis*, *Vermiporella nipponica* and *Permocalculus fragilis*, the coral *Waagenophyllum indicum*, ostracods, gastropods (*Bellerophon* sp.) and echinoderm plates. In some places skeletal algae are so numerous that they are rock-building. Small foraminifers belong to the genera *Ammodiscus*, *Hemigordius* and *Nodosaria* (BUSER et al., 1989).

Upper Permian sediments were deposited in the restricted shallow shelf, lagoons respectively. Energy index of examined rocks is low. Ooids were formed in lagoons with higher energy. The sedimentation on the carbonate platform was frequently interrupted by inflows of terrigenous material. In the eastern Sava Folds (Sevnica, Trebelno, Bohor) oolitic dolomite beds were locally mineralized with Pb-Zn sulphides (DROVENIK et al., 1980).

In the Upper Permian sequence on the Slovenian Carbonate Platform oolites are very rare. The ooids are found only in the bed of dolomitized limestone in the topmost part of the Karavanke Formation in the Košutnik brook north of Tržič (OGORELEC, 2011, Pl. 3), where individual ooids are recognized only by their contours, and

in the coarse-grained dolomite close below the P/T boundary in the abandoned mine Ledina above Sevnica, where rare ooid envelopes grow over algal fragments.

In the southern Slovenia ooids are recognized in dark carbonate rocks lying conformly under the Scythian basal oolitic horizon in the Žlebič area and in the Upper Permian-Scythian section Skopačnik-Dobravica-Podgozd in the southeastern borderland of the Ljubljana Moor (BUSER, 1974; DOLENEC M. et al., 2006; DOZET & KOLAR-JURKOVŠEK, 2007). Ooids occur in dark oolitic dolomite and considerably dolomitized limestone. Mostly only contours of ooids can still be observed.

Permian/Triassic (P/T) boundary

On the Permian/Triassic boundary oolites are found, examined in detail and in several localities in the western, central and southern Slovenia.

In the Idrija area oolites were ascertained for the first time in the section of Idrijca river at Spodnja Idrija (DOLENEC M., 2000; DOLENEC & OGORELEC, 2001), and that in an only 20 cm thick bed close above and under this boundary. Afterwards, oolitic beds are found in the Masore section at Spodnja Idrija (DOLENEC T. et al., 1999a,c, 2004) as well as in the Žiri area (KOLAR-JURKOVŠEK et al., 2011a,b).

The carbonate beds with ooids are well documented with fossils in transitional beds on the P/T boundary in the section Lukač at Žiri (KOLAR-JURKOVŠEK et al., 2011b). In four meters thick detailed-sampled section, that lie above the evaporitic dolomite member of the Bellerophon Formation alternate dolomite beds with ooids and beds of laminated biomicritic limestone. Transitional beds represent the basal part of the Lukač Formation, as the lowermost formation of the Lower Triassic succession in western Slovenia. Ooids occur in the dolomite one meter under the P/T boundary. They are more abundant in the dolomite just above the P/T boundary, defined by the first appearance of the conodont species *Hindeodus parvus*.

All known beds with ooids at P/T boundary, examined in the Idrija-Žiri area, in the Sava Folds and Karavanke Mts. were dolomitized. For that reason, ooids are habitually recognizable only by contours and after coloration with alizarin red. In several cases ooids exhibit also traces of dedolomitization, a calcitization respectively, and the calcitic sparry cement. The calcitization occurred very probably during diagenesis when calcite and epsomite have been formed. The epsomite in determined samples has not been observed from the surface, but it has been formed and preserved in the pits of Idrija Hg mine (ČADEŽ, 1977; OGORELEC, 1977). The oolitic horizon on the P/T boundary is known as Tesero Horizon in the Alps (ASSERETO et al., 1972; BROGLIO-LORIGA et al., 1986) and in Hungary (HAAS et al., 2004, 2006). This horizon is also well-documented in the borehole Gartnerkofel-1 in the Carnic Alps (HOLSER & SCHÖNLAUB – eds.,

1991), where it is 20 meters thick belonging mostly already to the basal part of the Lower Triassic beds. At Višnja gora the Tesero Horizon is equivalently developed in the form of 2 to 3 meters thick horizon of a greyish yellow more or less fine-oolitic sandy dolomite. It has been denominated the Babčnik Horizon representing the basal part of the Višnja gora Formation (DOZET, 2000a).

In the southern Slovenia Upper Permian and Scythian beds as well as their contact are well exposed and defined in two places, namely: Skopačnik at Želimlje and Gorenji Lazi at Žlebič. The P/T boundary is there defined in detail by biostratigraphic and isotopic data (DOLENEC M. et al., 2006; DOZET & KOLAR-JURKOVŠEK, 2007).

TRIASSIC

Lower Triassic

Oolitic beds are one of the most expressive characteristics of the Lower Triassic beds in the whole Slovenian territory. They first occur in the lower and middle part of the Lower Triassic carbonate successions. They were found in the entire Slovenia area, which was in that time still a part of the Slovenian Carbonate Platform (BUSER, 1989).

The Lower Triassic stratigraphic sequence is built of clastic as well as carbonate rocks, among which limestone predominate over dolomite. The whole Lower Triassic stratigraphic sequence can reach the thickness of 500 meters (BUSER, 1979a; DOZET & BUSER, 2009). The Lower Triassic clastic rocks are absent only in the topmost part of the considered sequence, where marlstone and limestone thoroughly predominate.

Oolitic horizons mostly occur in up to 0.5 meters thick beds and in up to several meters thick packets, in minor lenses respectively, that in the distance of some tens or hundreds meters wedge out. The thinning out of oolitic horizons can be easily observed in the Idrija mine (ČAR et al., 1980) or in larger road cuts. In some places ooids are less numerous, appearing only as individual ooids among other allochems, mainly microgastropods *Holopella gracilior* and *Natiria costata*.

The oolitic horizons are researched in several localities in Karavanke Mts. at Tržič (DOLENEC T. et al., 1981), in the Karavanke road tunnel (OGORELEC et al., 1999a) in Savinja Alps (CELARC, 2004), further on, in the Idrija and Cerklje area (MLAKAR, 1969; ČAR et al., 1980; MLAKAR & ČAR, 2009; ČAR, 2010; KOLAR-JURKOVŠEK et al., 2011a,b), in the Škofja Loka area (DEMŠAR & DOZET, 2002), in Polhov Gradec area (GRAD & OGORELEC, 1980; JURKOVŠEK et al., 1998; NOVAK, 2001; DOZET & NOVAK, 2002), at Pleše in eastern Sava Folds (DOZET, 1985, 2000b), at Višnja gora (DOZET, 2000a), at Želimlje (MUŠIČ, 1992; DOZET & KOLAR-JURKOVŠEK, 2007), in the Bloke area (DOZET, 1978), on Bohor Mt. (OGORELEC, 1979), on Orlica Mt. (ANIČIČ et al., 2001), in the Mišnica valley at Laško (RAMOVŠ & ANIČIČ, 1995; RAMOVŠ et al., 2001) in the Kočevje

and Gorski kotar area (DOZET & SILVESTER, 1979) and in some other localities. Most important for the oolites is the Middle Scythian lithological sequence with the gastropod *Holopella gracilior*, which could be up to 100 meters thick (BUSER, 1974; MUŠIČ, 1992; DOZET & KOLAR-JURKOVŠEK, 2007).

Oolitic beds of the Višnja gora Formation are within the Lower Triassic (Scythian) stratigraphic sequence most expressive and important in their lowermost part (Babčnik = Tesero Horizon) and in the middle part (Sv. Tilen = Gastropod Oolite Member) and less in the upper part of this sedimentary succession (Kosca Member and Brinje Horizon – DOZET, 2000a). Oolites in the above-mentioned sections have various sizes and different textures. Individual ooids are up to 1 mm long in diameter and exhibit distinct concentric micritic envelopes, which alternate repeatedly with the sparry calcite. Many ooids have in their cores grains of muscovite or quartz, often also gastropod fragments and small foraminifers. Characteristical for these ooids is an intensive red and locally yellow colour, which is a consequence of hematite pigment. Chemical analyses of several samples show that samples of oolitic limestone or dolomite may have up to 1 % of iron, greater part, however, 0.2 to 0.5 % of iron. The enrichment of ooids with hematite is related to weathering of clastic rocks that accompanied carbonate interbeds in local subaerial exposure phases. On episodic vadose conditions of diagenesis can be concluded also by sparry cement, which can be observed in the cores of ooids in some horizons. In these cases are oolitic samples enriched with light $\delta^{13}\text{C}$ isotope (DOLENEC T. et al., 1981; OGORELEC et al., 1999b). The cement among the grains belongs to two generations: rim cement of the generation A and sparry cement of the generation B.

The origin of oolitic beds and lenses is connected with a very shallow environment inside the clastic-carbonate succession in semi-arid climate, repeatedly in intertidal deltas, where the energy of the environment was high enough for their generation.

In the Pleše area the Lower Triassic beds begin with dolomite and baryte (DOZET, 1985, 2000b). Variably red sandy oolitic dolomite occurs in the middle part of the Scythian sequence. Dolomitic grains are quite common occurring as well in ooids as in cement. The ooid-grains are smaller than 0.1 mm, reaching at Repče exceptionally the size of 15 to 2 mm. Allochems are generally impregnated with hematite.

In the southeastern Ljubljana Moor Borderland the Lower Triassic beds are exposed at Skopačnik in the Želimlje valley (BUSER, 1974; MUŠIČ, 1992; DOLENEC M. et al., 2006; DOZET & KOLAR-JURKOVŠEK, 2007), where the Lower Triassic sequence begins with several meters thick dark oolitic considerably dolomitized oolitic limestone (Tesero Horizon). Main intervals of oolitic (oospiritic) limestone can be found in the middle part of the Scythian lithologic sequence. The Lower Triassic oolitic limestone has been developed in

different sedimentary environments in the littoral. Thick-layered oolitic limestone originated in tidal deltas with relatively high energy.

In the Orlica Anticline area (ANIČIĆ, 1991; ANIČIĆ & DOZET, 2000; ANIČIĆ et al., 2001) and its surroundings (cross-section Mišnica valley-RAMOVŠ & ANIČIĆ, 1995; RAMOVŠ et al., 2001) the Lower Triassic sedimentary succession (Werfen Formation) is composed of siltstone, sandstone, claystone, sandy dolomite, oolitic, sparitic, and micritic limestone as well as calcareous breccias. The Tesero Horizon is not preserved there. Very expressive is the oolitic calcareous development with gastropods consisting of 65 meters thick sedimentary succession.

In the Toško Čelo area near Ljubljana (NOVAK, 2001; DOZET & NOVAK, 2002) the Scythian sedimentary succession lithostratigraphically consists of eight units. The lowermost lithostratigraphic unit is represented by 1 to 3 m thick horizon of biosparitic limestone very rich in mollusc bioclasts. Oolites occur more in the Gastropod Oolite Member containing interbeds of dolomite. Ooids are commonly rather small. The thicker horizon of the oolitic dolomite, containing up to 3 mm large ooids, pisoids respectively originated by latediagenesis. The thickness of the Gastropod Oolite is about 45 meters.

The Lower Triassic stratigraphic sequence on Križna Mt. (DEMŠAR & DOZET, 2002) is composed of limestone, dolomite, marl, sandstone, siltstone and subordinately of claystone and shaly claystone beds. The main characteristics of the Scythian sedimentary succession are rare fossils and poorly developed Gastropod Oolite Member.

Carnian

Rare oolitic beds are known in Slovenia from the Carnian epoch. Still most common and mentioned are those from the Mežica area and from Dolenjska. In fact, in the Carnian stage oncolites are more extended and important than oolites.

Cordevolian and Julian

The lower part of the Carnian succession is composed of several hundred meters thick sequence of massive and thick-bedded coarser-grained limestone and dolomite, which are placed in the lower part of the Carnian age. Due to intensive dolomitization its primary structure, an algal biosparite with numerous *Diplopora* algae and rarely with coral and sponges, is hardly recognizable (RAMOVŠ & TURNŠEK, 1984; TURNŠEK, 1997; ČAR, 2010).

In the Idrija area oolites and oncolites from the Cordevolian carbonate sequence are rare and poorly preserved. The ooid remains are discussed briefly by VLAJ (1969), who mentioned that in the Cordevolian beds the carbonate oolite passes into the limestone pseudoolite. Next to regular ooids with concentric structure and various fragments there are a lot of quartz and plagioclase grains in it. The oolitic limestone contains foraminifers,

crinoids, echinoid spines, gastropods and pelecypod fragments as well.

ČAR and co-workers (1980) studied in the Idrija area sedimentological characteristics of Upper Triassic circular coral bioherms. The carbonate rocks there have been deposited in relatively quiet water. A higher water energy value has been suggested for this limestone that contains oncoids. Some oncoids attain a diameter of four centimeters.

ŠTRUCL (1971, 1984) described the Wetterstein sequence in the N. Karavanke Mts. area of the Mežica Pb-Zn mine belonging to the Ladinian and Carnian stages. It has been developed in the back reef, reef and fore reef facies. The 1000 to 2000 m thick succession of the Wetterstein Beds consists almost entirely of carbonate rocks. The lower part is predominantly dolomitic, while the upper one is calcareous. Lithologically, they are of very heterogeneous composition. Pure oolitic interbeds can be observed in the uppermost 60 meters of the Wetterstein Limestone. The oncolites and oolites are very poor in fossils. Here and there oncolites contain skeletal algae and foraminifers. Sedimentological features (e.g. shrinkage pores, stromatolites and dessication cracks) indicate that this limestone was deposited in a shallow subtidal environment and partly in an intertidal zone.

RAMOVŠ (1990) reported that in Northern Julian Alps, in the Cordevolian bedded limestone and dolomite next to stromatolites occur in some places irregular, globular and ovoid coated grains, oncoids respectively. They are up to 0.5 cm in diameter.

Julian and Tuvallian

The middle and upper parts of the Carnian succession, which are of the Julian and Tuvallian age, are represented by the bedded dark biomicritic limestone and rarely by the dolomite with marlstone interbeds. In some places the deposition of carbonate beds inside a shallow restricted shelf is accompanied by volcanic activity in the form of tuff interbeds and clastic sediments (MLAKAR, 1969; BUSER, 1979a; DOZET, 2009; KRALJ & DOZET, 2009; ČAR, 2010).

As already mentioned, oolitic beds are significant sediments within the Julian and Tuvallian succession in the Mežica area, that lies north of the Periadriatic fault and can be, therefore, hardly compared with Carnian beds in Dinarides. With mining works in the Pb-Zn mine and with field researches these beds were sedimentologically examined (ZORC, 1955; ŠTRUCL, 1971, 1984; OGORELEC & KUŠEJ, 1979; PUNGARTNIK et al., 1982). In total, about 300 meters thick carbonate succession, in which limestone prevail over dolomite, is interrupted by three clastic horizons. Oolitic beds occur only in the footwalls of all three horizons, and especially of the second horizon in the Helena valley. Locally, they are pure oosparites (Pl. 2, Fig. 4). The bio-component is composed of mollusc fragments that often form ooid-cores, as well as plates and spines of echi-

noderns (JURKOVŠEK, 1978; JURKOVŠEK & KOLAR-JURKOVŠEK, 1997; JURKOVŠEK et al., 2002; KOLAR-JURKOVŠEK & JURKOVŠEK, 2010). Oncoids are rather small having in greater part less than one centimeter in diameter. Owing to authigenic grains of pyrite, that impregnated the oolites during the diagenesis, they are more or less dark coloured, in fresh cuts also black; on the surface after limonitization, however, they are brownish or yellowish.

On the Zaplaz near Trebnje sediments of the Julian and Tuvanian age are composed of mudstone and carbonate rocks. An alternation of variegated marlstone and claystone interrupted by several oolite, oncolite and dolomite horizons can be seen there. Due to their special development these beds are denominated the Zaplaz Formation (DOZET, 2004b). The oolitic-oncolitic rock, packstone and grainstone by texture, contains also crinoids, echinoid spines, molluscs and rare quartz grains. Oncoids are up to 3 cm thick.

From the lithological point of view the lowermost Upper Triassic (Carnian) beds in the Kočevje region are very much alike. The treated variegated sedimentary succession at Kočevska Reka (DOZET, 1990a; DOZET & SILVESTER, 1979) is characterized by an alternation of clastic and carbonate rocks. In the Julian-Tuvanian sequence predominates red dolomitic marlstone, intercalated with rare oncolite beds. Oncoids give to the considered rock a knobby appearance.

Otherwise, in southern and central Slovenia the Julian-Tuvanian lithologic column begins commonly with 5 to 40 meters thick bauxite horizon composed prevalently of oolitic bauxite rich in iron. It is well-exposed on the Kopitov Grič at Borovnica (RAMOVŠ, 1953; DOZET, 1979, 2004a; BUSER, 1980). The iron-bauxite of this deposit belongs to the karstic type of bauxite and it is of diagenetic origin, formed "in situ" in colloidal clay-iron rich sediments by dissolution and precipitation (BHATTACHARYYA & KAKIMOTO, 1982). In the Kopitov Grič ore deposit the iron oolitic bauxite, containing some bauxite pisoids as well, is prevalent. The electron-microanalysis examination showed that ooids are of iron, alumina and mixed chemical composition, and the groundmass is richer in iron than ooids, therefore it is generally darker than ooids. Similarly, pisoids are richer in iron and darker than ooids.

In several places in Rute (Zgonče, Kobilji curek, Selo) and Bloke (Perovo, Črni potok) several millimeters to one centimeter thick dark green ooids, pisoids respectively, can be observed in yellowish to greenish Carnian tuffs (DOZET, 1989; KRALJ & DOZET, 2009). They are composed of less chloritized cores and stronger chloritized envelopes. In the very central part of ooids and pisoids there is a microcrystalline substance having plagioclase characteristics.

Norian and Rhaetian

Norian and Rhaetian stages are characterized in Slovenia by the 1500 m thick carbonate

sequence of the Main Dolomite and Dachstein Limestone formations that exhibit all characteristics of the typical Lofer development, as it is known from their classical localities in the Northern Limestone Alps (FISCHER, 1964). In southern Slovenia the Main Dolomite prevails strongly over the Dachstein Limestone (BUSER, 1979a; OGORELEC, 1988; DOZET & OGORELEC, 1990; OGORELEC & ROTHE, 1992; NOVAK, 2003; DOZET & BUSER, 2009), in Julian Alps and Karavanke Mts., however, it is a reverse situation. In several places there occur also minor or larger reef patches and complexes, composed prevalently of corals (BUSER et al., 1982; TURNŠEK, 1997).

In the Main Dolomite and Dachstein Limestone oncooids are rare. They are developed only locally on the Trnovski gozd (OGORELEC & ROTHE, 1992) and in the Gorjanci area (BUKOVAC et al., 1984; BUKOVAC & SOKAČ, 1989). They occur as individual allochems together with mollusc fragments, being flooded in the micritic mud. Their origin is related, as we supposed, to local tidal channels inside littoral planes. These beds with ooids occur in the topmost part of the Dachstein Limestone, close to the boundary with Jurassic beds. Ooids are small, up to 0.5 mm in size, showing the radial structure of envelopes.

In the Main Dolomite and the Dachstein Limestone more frequent than ooids are oncooids. They are mentioned for the first time from the neighbourhood of Sodražica (BUSER, 1966) and that as algal species *Sphaerocodium bornemanni*. The forms of "*Sphaerocodium*" type have been investigated in the Carnian beds at Čatež at the northern foot of Gorjanci by BABIĆ (1970). Actually, he studied all up to then known findings with the algal species *Sphaerocodium borne-manni* from Slovenian and Croatian Dinarides. Since no algal filaments and proper algal structures were recognized in collected rock samples, he interpreted these structures as oncooids. Later, oncooid beds have been found at some other localities: in the central Slovenia (OGORELEC & PREMUR, 1975; DOZET, 1985,) in the Kočevje area (DOZET, 1990a, 1991b), on the Banjška planota (OGORELEC & ROTHE, 1992), on Krn Mt. (OGORELEC & BUSER, 1997), on Kanin Mt. (OGORELEC, 1984), in the Trenta valley (JURKOVŠEK, 1986) and in some other places.

Oncoids are different in size. A greater part of them have a thickness under 1 cm, larger, however, reach the thickness of up to 3 cm and more. According to texture they are mostly concentric with numerous envelopes (group SS-C – spheroidal structures, concentric form) after LOGAN et al. (1964), less commonly they belong to groups SS-R (randomly stacked form) or SS-I (inverted form, Pl. 3, Fig. 8). In these cases they are vadose pisoids or vadoids (FLÜGEL, 2004, 158). They originated in a vadose fresh-water or mixed marine-fresh water environment in intervals of short-lasting subaerial exposure phases of the littoral intertidal environment. As vadose pisolites or caliche they are described from the Main Dolomite in the Dolomites (BOSELLINI & ROSSI, 1974; As-

SERETO & KENDALL, 1977) and Jurassic beds in the central Apennines (BERNOUILLI & WAGNER, 1971). Recent cases of their origin are known from the Persian Gulf (EVAMY, 1973; SCHOLLE & KINSMAN, 1974; CHAFETZ & BUTLER, 1980). Classical examples of older vadose pisoids are from Permian beds in Texas (DUNHAM, 1969; PRAY & ESTEBAN, 1977).

In some cases (FLÜGEL, 2004, 158) pisoids can be of combined origin; at the beginning as vadose pisoids, later, however, these pisoids were impregnated with cyanobacteria envelopes like oncoids. Such a case exhibits for example the sample of the Main Dolomite from Koprivnik near Kočevje (OGORELEC, 2011, pl. 21/1).

JURASSIC

Dinaric Carbonate Platform

The Jurassic is the geologic period, which was for oolitic rocks far most important, as in the world as in Slovenia. In the Slovenian territory there are more than 4/5 of all oolitic beds as by extent as by the thickness of their horizons of the Jurassic age. On the Dinaric Carbonate Platform this span of time, when ruled several millions years long periods with warm climate and constant sedimentological conditions of a very shallow open shelf with high energy, was favourable for growth of ooids. Equal paleogeographic and sedimentological conditions existed on the Julian Carbonate Platform in the Liassic epoch as well. At the end of Liassic and in Dogger it came to its faulting and slow sinking, and from that time on it was fused together with the Slovenian Basin (Fig. 1), in which ruled deeper-water sedimentary conditions (BUSER, 1889; JURKOVŠEK et al., 1990; ŠMUC, 2005).

A general and complete review of developments of Jurassic rocks in the Slovenian territory is captured in works of BUSER (1968, 1979b) as well as BUSER and DOZET (2009); in the area of the Dinaric Carbonate Platform, relating data can be found in works of BUSER (1978), DOZET (1980, 1990b, 1992b, 1996), DOZET & ŠRIBAR (1981, 1998b), BUSER & DEBELJAK (1996), OREHEK & OGORELEC (1981), in reef developments, however, in works of TURNŠEK (1966, 1969, 1997) and TURNŠEK et al. (1981). The microfacies of limestone and dolomite has been researched by R. Radoičić already in the seventies of the last century on the entire Dinaric Carbonate Platform, which comprised then the area from Trnovski gozd, across the entire Dalmatia and Primorje to as far as Monte-Negro (RADOIČIĆ, 1966). In her study several localities and rocks from the Slovenian territory are also described. Later, the microfacies of Jurassic beds in the southern Slovenia have been researched by OREHEK & OGORELEC (1979, 1981), STROHMENGER (1988), DOZET (1989), DOZET & STROHMENGER (1996, 2000), STROHMENGER & DOZET (1990), STROHMENGER et al., 1987a,b), OGORELEC (2009, 2011) and others.

Liassic

The oolites of the Liassic age have been researched in detail in the Podbukovje-Korinj section in Suha krajina, south of the village Krka, where they build the 570 meters thick Podbukovje Formation (DOZET & STROHMENGER, 2000; DOZET, 2009), on Mala gora Mt. at Kopolje (STROHMENGER, 1988; STROHMENGER & DOZET, 1990) and in the central part of Trnovski gozd (OREHEK & OGORELEC, 1979).

Transitional beds between Upper Triassic and Liassic are in some places in the Notranjska region partially or totally dolomitized. Such case is stated in Preserje at Borovnica (OGORELEC, 2009) as well as in Bistra at Vrhnika (OGORELEC, 1988; OGORELEC & ROTHE, 1992). The dolomitization has there an early- and latediagenetic character.

The Podbukovje Formation is composed of five members. In the Krka Limestone, which represents the lower part of the formation, are very common intraclastic limestone, composed of small and bigger intraclasts and lithoclasts originated from erosion, further on, pellets, fenestral oncoids and/or vadose pisoids, the material originated at stormy weather by accumulation of eroded material in the intertidal and supratidal zones. These sediments are characterized by vadose features such as algal crusts, geopetal fillings, solution cavities, microstalactites and stromatolitic crusts. This lithofacies is characterized by typical Lofer rhythmic sedimentation. Developed are all three members of FISCHER's (1964) cyclothems (DOZET, 1993). In these limestone biostratigraphically most important fossil is the alga *Palaeodasycladus mediterraneus*; while small megalodontids and gastropods occur as well.

The Krka Limestone Member (DOZET & STROHMENGER, 2000) is followed upwards by beds with orbitopsellas and an up to 40 meters thick horizon of dark lithotid limestone. The latter are above all interesting as beautiful ornamental stone, extracted in the Podpeč quarry in the vicinity of Ljubljana. The topmost part of the Podbukovje Formation is composed of grey oolitic limestone of the grainstone type with well-washed ooids and parallel cross-stratification, followed by the dark grey Spotted Limestone, the youngest unit of the Liassic carbonate sequence. It is composed of variously grey and greyish black, platy and bedded prevalently micritic (mudstone) and pelmicritic strongly bioturbated limestone, wackestone to packstone by texture, that due to activity of numerous bioturbating organisms, and late diagenesis became spotty. According to the dark colour, abundant bituminous content, structures and textures, and regarding micro- and macrofossils the Spotted Limestone was deposited in restricted parts of the shelf, where conditions were not favourable for greater diversity of organisms. In the micritic carbonate mud of the restricted lagoon were episodically brought by waves and currents rather numerous ooids, pseudoooids, microoncoids and intraclasts. Among structures only fine-lamination can be observed. In a calm

environment and shallow lagoons with marsh and paralic-limnic conditions in Kočevski Rog some coal lenses and thin beds were deposited during the Middle Liassic (DOZET, 1998).

A particularity exists, that the Podbukovje Formation is ended by an up to 3 meters thick packet of thin-bedded dark micritic limestone with orange red and red Fe-ooids (iron-ooid wackestone) with fossil association of benthic foraminifers, ostracods, and crinoid fragments with micritic envelopes (DOZET & STROHMENGER, 2000). These iron ooids can be found, above all, in the Suha krajina, Krka (DOZET & STROHMENGER, 2000), Mala gora (STROHMENGER & DOZET, 1990) and Predole (DOZET, 2009) area. Ferruginous ooid grains have regular concentric laminations and are up to 2 mm thick in diameter. Some ooids have nuclei of bioclastic fragments. The iron laminae are formed of magnetite, limonite and goethite. As for genesis of ferruginous ooids in Spotted Limestones, the ooids in question were priorly formed under the dynamic conditions of agitated water in an oxidized stage, whereas the iron minerals, present in them, were produced under calm environmental conditions replacing the carbonate of ooids during the diagenesis. SIEHL and THON (1978) believed that ferruginous ooids are derived from continental latasol, when the cap-rock is eroded and the ooids are transported from the dry-land into a marine environment. WILSON (1966) attributed the Fe-enrichment in ooids to continental weathering processes.

At Predole near Zagradec alternate variously grey and more rarely white bedded limestone of mudstone, wackestone and ooid-grainstone types (DOZET, 2009). The ooids have a tangential and radial structure. The cores of ooids consist of more or less rounded bioclasts (foraminifers, algae, mollusc fragments) and intraclasts. Occasionally, rare up to several meters thick beds of oncolitic limestone occur as well.

On the Trnovski gozd the lithiotid horizon is not developed everywhere and, in some places, it is replaced by the horizon of small brachiopods (BUSER, 1978; OREHEK & OGORELEC, 1979). Oolite interbeds with large oncoids, individual corals-parastromatopora and the foraminifer *Orbitopsella praecursor* have been recognized in the coral patch reef above the lithiotid limestone (TURNŠEK et al., 2003). Concordantly on the white reef limestone rest alternating white micritic and bedded oolitic limestone of the grainstone and packstone type. Oolites have different texture; predominant are those with radial texture (Pl. 3, Figs. 3, 4; OGORELEC, 2011 – Pls. 24 and 25). Rarities in the Trnovski gozd are “half-moon ooids” (Pl. 4, Fig. 8), whose cores are in a part dissolved and dropped to the bottom of the outer layer, forming geopetal fabric. The origin of such ooids is related to early diagenetic processes in a vadose environment.

Numerous up to four centimeters large oncoids together with foraminifers of the species *Orbitopsella praecursor* occur within the oncolitic beds forming up to 20 meters thick oncoid horizon. The oncoids are of two different types: 1 – the thicker

have irregular shapes and they are mixed between fossils, 2 – somewhat minor (1–2 cm in size) oncoids, i.e. spheroidal spongiostromate-parastromate oncoids with well-expressed micritic texture of envelopes. These oncoid beds are an important marking horizon that is especially significant for areas of Notranjska and Trnovski gozd (OREHEK & OGORELEC, 1981), being followed also on the Vahta passage on Gorjanci Mts. Oncoidal beds are often dolomitized (Pl. 3, Fig. 5), and in some places partly dedolomitized as well. Dedolomitized is for the most part the sparry cement. These oncoid beds are mentioned as particularity also by FLÜGEL (2004, 129) in his text-book on microfacies of the carbonate rocks.

In the upper part of the oolitic limestone small corals, bryozoans and stromatopora can be observed on the Trnovski gozd plateau. Upwards follows an up to 10 m thick horizon of the white bedded micritic limestone with rock-forming lithiotid bivalves of the species *Lithioperla scutata* (BUSER & DEBELJAK, 1996; DEBELJAK & BUSER, 1998).

Lower Dogger

The Late Liassic and Dogger epochs were on the Dinaric Carbonate Platform most productive time intervals with oolitic beds.

In the Mala gora sections Lower Dogger beds are exclusively developed as ooid grainstone, which can be laterally also somewhat dolomitized (STROHMENGER, 1988; STROHMENGER & DOZET, 1990). The uppermost beds of the ooid grainstone are rich in the foraminifer *Dictyoconus cayeuxi* together with *Mesoendothyra croatica* that are well-known index-fossils of Lower Dogger in the entire Dinarides (VELIĆ, 2007).

The studied Jurassic carbonate sequence clearly indicates a short-lasting stratigraphic gap during Dogger in the Suha Krajina area (DOZET & STROHMENGER, 2000). The index-fossils, which could be identified, point at an age older than Callovian. The break in sedimentation coincides with the supposed fall of the sea level during the Callovian or at the end of Bathonian (HALLAM, 1978, 1988; BOSELLINI et al., 1981).

In the Dogger carbonate sequence of Dolenjska (southern Slovenia) nine oolitic interbeds are developed. The ooids range in diameter from 0.5 to 0.7 mm. STROHMENGER, DOZET and KOCH (1987b) distinguished radial concentric (T1), micritic (T2) and composed (T3) ooids there. Pitted-ooids are also very common.

The oolitic limestone from the large quarry of Verd above Vrhnika is composed of several oolitic horizons with different thicknesses; the thickness of the larger one attains up to 60 meters. Also several types of ooids can be distinguished there; the most numerous are limestones of grainstone type in which ooids show a radial structure of calcitic envelopes (DOZET, 2000c).

In the Suha krajina area (DOZET, 2000d) oolitic limestone (Hočevje Oolitic Group) is the most extended rock exposed at the surface. Lithologi-

cally and according to fauna we can distinguish two units: 1 – Laze Formation (Dogger) and 2 – Šentrumar Formation (Malm). The Laze Formation is exclusively developed as ooid-grainstone, which laterally can be more or less dolomitized and can involve several meters thick interbeds of micritic limestone. The carbonate sequence in question contains index fossils *Mesoendothyra croatica* and *Dictyoconus cayeuxi*. The appearance of oomicritic limestone of packstone type indicates that these ooids were formed in a more or less restricted environment with minor water energy.

In the Trnovski gozd area among thick-stratified oolitic beds of the grainstone type limestone also occur with characteristics of littoral and intertidal sedimentation: loferites, laminites and intraformational breccias. These limestone exhibit also signs of paleokarstification – larger and minor corrosion vugs. Episodic short-lasting emersion-phases are evident also by gravitational cement among ooids and bioclasts and with reference to diagenetic characteristics for the meteoric environment (OREHEK & OGORELEC, 1979). Individual beds were subjected to late-diagenetic dolomitization.

Between Predole and Mlačevo at Zagradec in Suha krajina the 85 meters thick Middle Jurassic (Dogger) lithologic sequence (Predole Beds) is composed of the dark oolitic limestone of grainstone type (DOZET, 2009). In the investigated carbonate rocks predominate from 0.3 mm to 0.8 mm thick ooids together with intraclasts, bioclasts and pellets. Microfossils *Holosporella sianensis*, *Spiraloconulus giganteus* and *Gutnicella (Dictyoconus) cayeuxi* are biostratigraphically important for these rocks. Interbeds of micritic and sparitic limestone in the considered oolitic complex speak for a subtidal to intertidal sedimentary environment in close vicinity of tidal channels.

Upper Dogger

Upper Dogger oolites consist chiefly of radial and tangential form of envelopes. In many places, in Suha krajina (STROHMENGER & DOZET, 1990), in the Kočevje area (DOZET, 1980, 1990b, 1992a) and Trnovski gozd (OREHEK & OGORELEC, 1979) their primary structure is demolished because of secondary dolomitization.

Lower Malm

In the Early Malm epoch several ten kilometers long and up to 500 meters thick coral-stromatoporid reef of barrier type existed on Trnovski gozd (TURNŠEK, 1966, 1969; TURNŠEK et al., 1981) passing with an interruption towards Suha krajina (DOZET & ŠRIBAR, 1998a), crossing the Gorjanci Mts. (OREHEK & OGORELEC, 1981) and stretching forwards to Lika in Croatia (TIŠLJAR et al., 2002; VELIĆ et al., 2002). For the intra- and back reef environments biomicritic limestone of wackestone and packstone type with hydrozoan *Cladocoropsis mirabilis* is significant. Oolitic and

oncolitic beds are in the Lower Malm rather rare what is the case particularly in the Suha krajina and Kočevje area (DOZET, 1989; STROHMENGER & DOZET, 1990).

At Predole in the Grosuplje area the Malm stratigraphic sequence begins with 50 m thick lithological interval, represented by the medium-dark grey platy and bedded Pisolitic Limestone, composed of 1 cm to 2.5 cm thick pisoids, cemented with sparitic calcite which is partly dolomitized. Usually, the late-diagenesis do not embrace pisoids. A similar pisolitic horizon is also found along the railway in Čušperk at Grosuplje and near Col on Trnovski gozd (BUSER, 1978). The Pisolitic Limestone at Predole contains the following fauna and flora: *Trocholina alpina*, *Cladocoropsis mirabilis*, *Aeolisaccus dunningtoni* and *Cayeuxia* sp. On the basis of determined fauna and flora the pisolitic limestone at Predole represents the basal Malm interval.

In the Krka area (DOZET, 2009) rests discordantly upon the Laze Formation (Dogger) the carbonate sequence of Šentrumar Formation (Malm) composed of massive oolitic limestone and coarse-grained brownish dolomite. Limestone beds often show cross-bedded stratification. The considered oolitic formation contains radial, micritic and tangential ooids, fossil remains and detritus. Lithologically, this limestone belongs to biolithite, biointrasparite, and prevalently to various oosparite types. The oolitic prevalently massive carbonates are typical tidal-bar winowed carbonate sands (WILSON, 1975) belonging to the standard facies belt 6. The Šentrumar Formation also includes the Nace Oncoid Member (DOZET, 1995) lying in the lower part of the Šentrumar Formation. The Nace Oncoid Member is about 3 m thick carbonate sequence, composed of grey thick-bedded micritic limestone with oncoids. The primary component of the algally coated-grains (oncoids) is the cyanobacteria of the genus *Girvanella*.

Of the Lower Malm age are also dark grey bedded oosparitic and intraoosparitic (grainstone) limestone with radial growth of crystals on Stružnica SW from Banja Loka in the Kočevje area (DOZET, 1989), dark grey and greyish black bedded biointraoosparitic limestone with partly or totally micritized ooids at Prežula near Kočevska Reka as well as the dark grey biopelmicritic limestone with the foraminifer *Trocholina elongata*. The first two oolites from the Kočevje area originated in a shallow open shelf, whereas the last one was deposited in a restricted shelf sea.

Upper Malm

Oolitic beds are again more numerous in the Upper Malm series occurring in thinner horizons between biomicritic limestone, laminites and dolomitized limestone with characteristics of intertidal environment as well as paleokarstification. Their Kimmeridgian and Portlandian age is defined particularly with algae *Clypeina jurassica* and *Salpinogoporella annulata* (BUSER, 1979b). In

the Trnovski gozd area these beds are exposed at Krnica (OREHEK & OGORELEC, 1979), in Suha krajina (DOZET & ŠRIBAR, 1998b) and at Krka in the Dolenjska area (STROHMENGER & DOZET, 1990), at Vrhnika (OREHEK & OGORELEC, 1981) and in some other places. The oolites chiefly consist of radial, tangential and mixed radial-micritic types. In ooid cores fragments of algae *Clypeina jurassica* have been recognized.

The ooids and *Gyrvanella* type oncoids occur also in the Upper Malm stratigraphic sequence (DOZET & ŠRIBAR, 1998b), but they are not so extended there as in the Lower Malm. Oncoids originated at a very low rate of sedimentation in lagoons, restricted shoals and on bars. The oncoids are mostly irregularly shaped and poorly sorted. The SS-C oncoid type is subordinate. At Zavrh above the river Kolpa in the Kočevje area the strongly dolomitized oosparitic limestone with algae *Clypeina jurassica* has been found (DOZET, 1989).

Julian Carbonate Platform and Slovenian Basin

Shallow water Jurassic limestone can be found on the Julian Carbonate Platform in the area of Upper Posočje, mainly on the southern slope of Kanin Mt., on the Kobariški Stol Mt. and on Polovnik Mt. In several places in the Trenta valley and on Mangart Mt. (KUŠČER et al., 1974; JURKOVŠEK, 1986; JURKOVŠEK et al., 1990; ŠMUC, 2005). They were deposited during the Early Jurassic period on the shallow shelf, on which lagoonal environments alternated with intertidal flats; repeatedly, the shelf was open having favourable conditions for origin of ooids. The oolitic limestone is a grainstone and partly packstone by origin. Ooids are relatively large and mostly of mixed type – with micritic and radial laminae. Ooids are often mixed blended with echinoderm plates and foraminifers, rarely occur oncoids as well.

In Dogger the Julian Carbonate Platform was submerged so that shallow-water limestone were replaced by deeper-water ones with chert nodules and pelagic microfauna. From this epoch the beds with Mn-nodules, which some scientists consider ocean-oncoids, are especially important since they are much alike to them by shape as well as by size.

The size of Mn-nodules ranges from one mm up to 12 cm in diameter showing clear zonal lamination of crusts. Rocks, in which they occur, are reddish biomicritic limestone of wackestone and packstone types, with numerous echinoderm plates, pelagic foraminifers and small ammonites (OGORELEC et al., 2006). Beds with nodules are equally such as oolitic limestone most developed at Bovec under Rombon Mt., in Slatnek gorge under Polovnik Mt., on Čisti vrh in Trenta valley and under Mangart Mt. (JURKOVŠEK et al., 1990; ŠMUC, 2005).

Worth mentioning is also the deeper water alodapic limestone of the Early Jurassic age on the

northern margin of the Slovenian Trough, especially on Kobla and Slatnik Mts. (ROŽIČ & POPIT, 2006; ROŽIČ & KOLAR-JURKOVŠEK, 2007; BUSER & OGORELEC, 2008; ROŽIČ, 2008; ROŽIČ et al., 2009). Within considered beds numerous ooids can be found among carbonate allochems as well, so that these sediments have at first sight an appearance of oolitic rocks. Ooids have been washed into these calcarenites and calcirudites with a micritic groundmass, respectively, they slid down into the basin along the shelf slope; their source place was, however, the edge of the Julian Carbonate Platform.

CRETACEOUS

The Cretaceous beds of the Dinaric Carbonate Platform are developed in whole carbonatic, in greater part as shallow-water limestone attaining thickness of up to 2000 meters. In spite of monotonous composition they exhibit a variegated facies, in which biomicritic variety prevails (PLENIČAR & PREMUR, 1975; PLENIČAR, 1979, 2009; DOZET, 1989; OGORELEC, 2011).

Lower Cretaceous

In the Lower Cretaceous limestone sequence oncolites and locally oolites of the Berriasian age are recognized. In the Trnovo area two different textural oncolitic types have been found (KOCH et al., 1989) – a poorly dolomitized oncosparite and poorly dolomitized oncobiopelmicrite (packstone). Among foraminifers trocholinids can be observed.

Rare oolites and individual pisolites are registered in the profile between Vrhnika and Logatec (OREHEK & OGORELEC, 1981), along the motorway Vrhnika – Logatec (DOZET & MIŠIČ, 1993) and in the Podpoljane section (DOZET & ŠRIBAR, 1998a). They occur in combination with foraminifers and pellets in limestone of wackestone type indicating only episodic higher energy conditions within a shallow restricted shelf.

Oncolites appear also in the Valanginian-Hauterivian stratigraphic sequence, but they are less common there. The oncolitic limestone contains algae *Clypeina solkani*, *Salpingoporella annulata*, *S. melitae*, foraminifers (Miliolidae), ostracods and molluscs. Oncoids of SS-C type are small and don't reach 0.5 cm in diameter (KOCH, 1988; KOCH & OGORELEC, 1990). Of such kind are oncoids in the section Dvor in the Suha krajina area (pl. 5, fig. 8). Oncoids and ooids occur very rarely also within the Aptian sedimentary succession. Thus, thin oncoids are to be found within the Aptian lithologic column. Thin oncoids together with foraminifers and corals have been found south of Slovenski vrh at Kočevje (DOZET, 1989), in the basal unit of the patch-reef on the Sabotin Mt. (KOCH et al., 2002; JEŽ, 2011) and in the limestone of Albian age in the section Nadrt on the Hrušica Mt. (JEŽ, 2011).

Upper Cretaceous

In the Upper Cretaceous limestone, above all, in the Turonian and Santonian stages, oncooids are more frequent, in spite of the fact, they occur only locally and in thinner horizons.

In the Kras area an oncolite horizon is known, composed of several beds with up to 3 cm thick oncooids, within the basal part of the Sežana Formation (JURKOVŠEK et al., 1996; JURKOVŠEK, 2008, 2010). This is a significant marking horizon in wider area of the External Dinarides. On the island Brač in Croatia it is known as the Gračišće Horizon (GUŠIĆ & JELASKA, 1990). With reference to accompanying beds of the limestone with desiccation pores can be concluded that oncooids originated in a very shallow near-shore and intertidal parts of the shelf.

In Matarsko Podolje near Materija (section Hrušica) a packet of oncolite limestone occurs in the biostratigraphic Unit E, and that between peloid- foraminiferal limestone of the mudstone-wackestone type and fenestral mudstone (JEŽ, 2011; JEŽ et al., 2011). Rare beds with oncooids occur also within bedded micritic, biomicritic and rudistic limestone in the Kočevje area (DOZET, 1989).

TERTIARY

In Tertiary beds on the Slovenian territory oolitic beds are rather rare; somewhat more common are oncooids.

Paleogene

Early Paleogene rock succession in the southwestern Slovenia is developed in its lower part (Paleocene and a part of Eocene) calcareously with shallow-water limestone, in the upper part, however, as flysch (DROBNE, 1979; DROBNE et al., 2009). In the above mentioned rocks, ooids can be recognized only as individual allochems, for example in the limestone of Danian age in Čebulovica on Kras (OGORELEC et al., 2001). Ooids, washed into the micritic matrix (Pl. 5, Fig. 3), are thin and only up to 0.5 mm big. The cores composed of micrite are overgrown by individual envelopes of radial sparry calcite. With reference to the fact, that the limestone of the Danian part of the Liburnian Formation (JURKOVŠEK et al., 1996) has been deposited in a very shallow and low-energy environment within the intertidal part of the shelf and in lagoons, we interpret the origin of ooids with higher energy mostly within tidal channels in coastal lagoons.

Neogene

The Neogene rocks crop out in central and eastern part of Slovenia. They have been deposited in the area of then-existing Central Paratethys, precisely on the edge of the Pannonian Basin. They are composed of prevalently clastic rocks, such as

various sandstone, conglomerate and marl; carbonate rocks are greatly subordinated. They are mostly extended in the Upper Miocene, Badenian respectively, as the *Lithothamnion* Limestone. In these different beds the oolitic interbeds occur as well.

Pure oolitic limestone is very rare. Such oolitic grainstone appears in the abandoned quarry Osek within the Badenian sedimentary succession at Lenart in Slovenske gorice area (Pl. 5, Fig. 2). The ooids are relatively thick, with radially arranged calcite crystals; the rock, however, is very porous, since it reaches the share of intergranular porosity up to 8 %.

Ooids are present in biocalcarene beds. They are mixed together with bioclasts and detritic quartz grains. Their content in the rock attains up to 40 %. Such biocalcarenes could be observed in Kozjansko, in the Šmarje pri Jelšah area and above all at Laško (ANIČIĆ et al., 2002).

However, very interesting in the Miocene beds are oncolite horizons. They are described in detail by MIKUŽ (2004, 2007). In the sand pit Drtija at Moravče two horizons, 3.5 m and 2.5 m thick, overly the quartz sand. They are of the Early Miocene age (Eggerian-Eggenburgian) attaining diameter of up to 12 cm; in greater part however, they have several centimeters in diameter. Roundish and discoidal shapes of oncooids with clear laminae predominate. Their cores are very often represented by gastropod or mollusc fragments (MIKUŽ, 2007).

Likewise interesting are also oncooids within the Upper Badenian and Lower Sarmatian rock sequence at the rim of the Krško Basin. Numerous, several centimeters thick oncooids can be found in the basal beds of 25 m thick carbonate-clastic sedimentary succession at Bela Cerkev and Šmarjeta. In detail they are described from Orešje at Kostanjevica by MIKUŽ (2004). There too, the type of roundish oncooids prevails with clearly visible concentric envelopes overgrowing molluscs and especially gastropods. Oncooids from the Bela Cerkev locality have several centimeters big gastropods in their cores and very thin cyanobacterial laminae (Pl. 5, Fig. 1).

Conclusions

Detailed study of sedimentary sequences on both carbonate platforms, the Dinaric and Julian Carbonate Platform exhibit great facies variability indicating shallow-marine, rimmed shelf, lagoonal and tidal and intertidal flat paleoenvironments. The most extended among carbonate rocks of our interest are oolitic rocks occurring in the Upper Paleozoic, Triassic, Jurassic, Cretaceous and Tertiary stratigraphic sequences. Ooids and oncooids were most common and rock-forming within the Jurassic system. The oncolitic rocks are commonly accompanied by the oolitic ones, but their thickness are much smaller. The pisolites, being the rarest of all, were found only in the Jurassic stratigraphic sequence.

However, Jurassic, Cretaceous and partly Triassic carbonate rocks are predominant in the geologic composition of the karst area, i.e. in the western and southern Slovenia. In formations, where oolites and oncoides occur, limestone strongly prevails over dolomite. The latter are more frequent only in the Upper Triassic series. With reference to deposition of the oolitic rocks, however, most extended are shallow-water environments with increased energy.

Our study of sedimentology and stratigraphy of the Uppermost Permian - Tertiary lithologic sequence enabled us to distinguish types of microfacies belonging to the paleoenvironments with sabkas, tidal flats, restricted lagoons, sand bars and open marine environments.

Oolitic rocks, respectively ooids, present in some beds of Late Carboniferous and Miocene age are connected to biocalcarenic type of rocks. They were formed in very shallow parts of littoral shelf, where erosion of the land was quite intensive. As a consequence, detrital grains of quartz and other noncarbonate minerals are mixed with ooids.

Evaporitic intertidal conditions, evident in the beds of the Upper Permian/Triassic boundary succession (Tesero horizon) were favourable for the formation of some oolitic beds, while ooids of the Early Triassic age were deposited in the intertidal channels and deltas. Ooids are mixed also with some detrital grains. Reddish color, connected to Fe-oxide and hydroxide mineral pigment is a characteristic feature of them.

In the Late Triassic (Norian and Rhaetian) age, oolitic beds are scarce, regarding quite a huge thickness of the Main Dolomite and Dachstein Limestone Formations (up to 1500 meters). Somewhat more abundant are oncoids in the Carnian succession of the Karavanke Mts. (Mežica area). Vadose pisoids, connected to local emersion phases and carstification of carbonate rocks are present in some beds of the Norian/Rhaetian age.

In the Jurassic period existed repeatedly open very shallow shelf, on which several tens or even up to 300 meters thick packets of oolitic beds were deposited in very short span of time. Such environments are known today on the Bahama shelf and in the Persian Gulf. Ooidal and oncoidal packstone and wackestone originated in restricted shoals and lagoons, mostly in tidal channels, whereas thick-bedded ooidal grainstone were deposited on open bars and in the back-reef environment.

Episodically, individual parts of the Dinaric Carbonate Platform became for shorter or longer time span a dry-land and exposed to karstification processes falling under the influence of vadose diagenesis. The results of such phases are emergence-breccias as well as bauxite horizons and pockets. Periods with bauxites are recognizable in the Carnian epoch in the central and southern Slovenia, and in Primorje in the time interval between the Late Cretaceous and Paleocene. The iron bauxites often exhibit an oolitic

texture, as a result of diagenetic processes "in situ" in deposits rich in iron and clay colloids.

Seven types of calcareous ooids and four types of calcareous oncoids, found in the Uppermost Permian-Tertiary stratigraphic sequence in the Slovenian territory, characterize specific depositional environments. Among ooids the following types can be recognized:

- Micritic (random) ooids with poorly developed concentric envelopes (Pl. 2, Fig. 7; Pl. 3, Figs. 3 and 4 partly)
- Radial fibrous concentric ooids with radially arranged crystals (Pl. 3, Fig. 2; Pl. 4, Figs. 1 and 4; Pl. 2, Fig. 5; Pl. 5., Fig. 2; SANDBERG, 1975)
- Mixed type of ooids (Pl. 3, Figs. 2 and 3; TUCKER, 1984)
- Ooids with rim cement (cemented in a phreatic environment); Pl. 3, Fig. 4; Pl. 2., Fig. 7)
- Ooids having cores substituted with blockcalcite cement (evidence for vadose diagenesis; Pl. 1, Fig. 6; Pl. 2, Fig. 6; Pl. 4, Fig. 2; CAROZZI, 1963)
- Partly dissolved ooids, corroding each other (Pl. 3, Fig. 1)
- Half moon ooids (their interior cores have dropped to the bottom, forming a geopetal fabric; Pl. 4, Fig. 8; CAROZZI, 1963; MAZZULO, 1977)

A greater part of above-mentioned ooids occur as well in calcitic as in dolomitic variety. Commonly, the considered ooids are only partly dolomitized (Pl. 1, Figs. 1-4; Pl. 2, Fig. 8; Pl. 4, Figs. 5-7). Which type of ooids occurs within the carbonate succession depends primarily on mineralogical, hydrodynamic and microbiological parameters, type and energy of depositional environment as well as diagenetic particularities, especially by processes of early diagenesis and late dolomitization (RICHTER, 1983). Depositional environment and the formation of some ooid types is presented in the explanatory text to figures on Plates 1 to 5.

Among oncoids less variation of types than with ooids can be found. Following types were recognized:

- Spheroidal spongiostromate oncoids, with indistinct micritic and meshy laminae (Pl. 2, Fig. 1; Pl. 4, Fig. 5)
- Spheroidal and discoidal oncoids with concentrically shaped layers (type SS-C, Pl. 2, Fig. 3)
- *Osagia* type oncoids, irregularly shaped with concentric layers (Pl. 1, Fig. 5; Pl. 5, Fig. 1)
- Irregular and lobate growth forms (type L; Pl. 3, Fig. 7).

Spongiostromate oncoids with micritic laminae and spheroidal oncoids are significant for agitated shallow-water environments with constant energy; they were in permanent motion, so that laminae could be formed concentrically; accordingly, they are commonly somewhat smaller (below 1 or at most 2 cm). In areas, where the energy episodically declined and ooids stopped to

move, they went under an interruption of their growth, partial destruction and renewed growth after transport. Such oncoids are commonly larger and can attain several centimeters in diameter (FLÜGEL, 2004).

Today, oolitic limestone and especially dolomite have practical economic importance in the world, above all in oil-geology as collector rocks owing to their potential porosity. Although some Jurassic oolitic limestone in the world attain porosity of up to 20 % (Saudi Arabian; WILSON, 1975), oolitic beds in the Slovenian territory are very compact, entirely cemented with sparry calcite and attaining porosity of much below 0.5 %. The only exception are some dolomitized oolitic horizons within the Scythian sedimentary succession, and locally rare beds of the Jurassic oolitic dolomite where their porosity attains up to 5 %.

Acknowledgements

This research has been performed in the framework of the Programme Geological Maps (T2-6493-0215) and the Programme Petrology and Sedimentology (J1-0270-0215), both in the Geological Survey of Slovenia, financially supported by the Slovenian Research Agency (ARRS), enabling geological investigations in field and laboratories. The authors are indebted to Dr. Matevž Novak, Dr. Jernej Jež and Dr. Vasja Mikuš for their helpfull and critical review, many useful suggestions and permission to include some photos of their rock samples into this paper. Finally, the authors express their warmest thanks to Bernarda Bole and Stanko Zakrajšek for their technical favour by pictures and finalization of this paper.

References

- ANIČIĆ, B. 1991: Geološke razmere na Orlici = Geological setting of the Orlica mountain. *Geologija*, 33: 233-287.
- ANIČIĆ, B. & DOZET, S. 2000: Mlajše paleozojske in mezozojske kamenine na severnem obrobju Krške kotline = Younger Paleozoic and Mesozoic rocks in the northern Krško depression borderland, Slovenia. *Geologija*, 43/1: 13-36, doi:10.5474/geologija.2000.001.
- ANIČIĆ, B., DOZET, S. & RAMOVŠ, A. 2001: Development of the Scythian series in the Orlica Anticline area (Sava Folds). *Acta Cars.*, 30/1: 85-96.
- ANIČIĆ, B., OGORELEC, B., KRALJ, P. & MIŠIČ, M. 2002: Litološke značilnosti terciarnih plasti na Kozjanskem = Lithology of Tertiary beds in Kozjansko, Eastetrn Slovenia. *Geologija*, 45/1: 213-246, doi:10.5474/geologija.2002.017.
- ASSERETO, R. L. & KENDALL, C. G. ST. C. 1977: Nature, origin and classification of peritidal tepee structures and related breccias. *Sedimentology*, 24: 153-210.
- ASSERETO, R. L., BOSELLINI, A., FANTINI-SESTINI, N. & SWEET, W. C. 1972: The Permian-Triassic boundary in the Southern Alps (Italy). *Bull. Canad. Petrol. Geol.*, 20: 176-199.
- BABIĆ, LJ. 1968: O trijasu Gorskog Kotara i susjednih područja = Sur le Trias dans le Gorski Kotar et les regions voisines. *Geološki vjesn.*, 21: 10-18.
- BABIĆ, LJ. 1970: Sphaerocodium or onkoids from the Upper Triassic dolomite of western Yugoslavia? *Geol. Vjesn.*, 23: 11-21.
- BERNOUILLI, D. & WAGNER, C. W. 1971: Subaerial diagenesis and fossil caliche deposits in the Calcare Massicio Formation (Lower Jurassic, Central Apennines, Italy). *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 138/2: 135-149.
- BHATTACHARYYA, D. & KAKIMOTO, P. 1982: Origin of feriferous ooids; an SEM study of ironstone ooids and bauxite pisoids. *Jour. Sed. Research*, 52/3: 849-857.
- BOSELLINI, A. & ROSSI, D. 1974: Triassic carbonate buildups of the Dolomites, Northern Italy. In: LAPORTE, I.F. (ed.): *Reefs in time and space*. *SEPM Spec. Publ.*, 18: 209-233.
- BOSELLINI, A., MASETTI, D. & SARI, M. 1981: A Jurassic "Tongue of the Ocean" infilled with oolitic sands. The Belluno Trough, Venetian Alps, Italy. *Marine geol.*, 44: 59-95.
- BROGLIO-LORIGA, C., CONTI, M. A., FONTANA, D., MARIOTTI, N., MASSARI, F., NERI, C., NICOSA, U., PASINI, M., PERRI, M. V., PITTAU, P., POSENATO, R., VENTURINI, C. & VIEL, G. 1986: Upper Permian Sequence and P/T Boundary in the Area Between Carnia and Adige Valley. *Soc. Geol. Ital. Field Conference 1986, Brescia*: 180 p.
- BUGGISCH, W. 1974: Die Bellerophonschichten der Reppwand (Gartenkofel), Oberperm, Karische Alpen; Untersuchungen zur Fazies und Geochemie. *Carinthia II* (1975), 17-26.
- BUKOVAC, J. & SOKAČ, B. 1989: O gornjetrijaskim i donjoliaskim vapnencima sjeverne padine Gorjanaca južno od Kostanjevice (JI Slovenija) i njihovom značenju za tumačenje geotektonskih odnosa u širom prostoru. *Geol. vjesn.*, 42: 7-13.
- BUKOVAC, J., POLJAK, M., ŠUŠNJAR, M. & ČAKALO, M. 1984: Tolmač za list Črnomelj L 33-91. Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000. *Zvez. geol. zav., Beograd*: 63 p.
- BUSER, S. 1966: Starost plasti z algo Sphaerocodium bornemanni Rothpletz v slovenskih Zunanjih Dinaridih = The age of the strata with the alga Sphaerocodium bornemanni Rothpletz in the Slovene External Dinarides. *Geologija*, 9: 385-389.
- BUSER, S. 1968: Razvoj jurskih skladov v slovenskih Zunanjih Dinaridih = Development of Jurassic strata in Outer Dinarides of Slovenia. *Prvi kolokvij o geologiji Dinaridov*, 1: 59-67.
- BUSER, S. 1974: Tolmač lista Ribnica. Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000. *Zvez. geol. zav., Beograd*, 60 p.
- BUSER, S. 1978: Razvoj jurskih plasti Trnovskega gozda, Hrušice in Logaške planate = The Jurassic strata of Trnovski gozd, Hrušica and Logaška planota. *Rud. met. zb.*, 4: 385-406.
- BUSER, S. 1979a: Triassic beds in Slovenia. In: DROBNE, K. (ed.): *Geological Development in Slovenia and Croatia. Guidebook 16th Europ. Micropal. Colloq.*, 17-26, Ljubljana.
- BUSER, S. 1979b: Jurassic beds in Slovenia. In: DROBNE, K. (ed.): *Geological Development in*

- Slovenia and Croatia. Guidebook 16th Europ. Micropal. Colloq., 27–36, Ljubljana.
- BUSER, S. 1980: Stratigrafske vrzeli v paleozojskih in mezozojskih plasteh v Sloveniji. Simp. reg. geol. paleontol. Zavod reg. Geol. Paleontol. RGF, Univ. Beograd, 335–345.
- BUSER, S. 1986: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Tolmin in Videm. Zvez. geol. zav., Beograd.
- BUSER, S. 1989: Development of the Dinaric and the Julian Carbonate Platforms and of the intermediate Slovenian Basin (NW Yugoslavia). Mem. Soc. Geol. It., 40 (1987): 313–320.
- BUSER, S. & DEBELJAK, I. 1996: Lower Jurassic beds with bivalves in south Slovenia. Geologija, 37/38 (1994/95): 23–62.
- BUSER, S. & DOZET, S. 2009: Jura = Jurassi. In: PLENIČAR, M. et al. (eds.): Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia, Geološki zavod Slovenije, 215–254.
- BUSER, S. & OGORELEC, B. 2008: Globjevodne triasne in jurske plasti na Kobli = Deep water Triassic and Jurassic beds from Mt. Kobla, W. Slovenia. Geologija, 51/2: 181–189, doi:10.5474/geologija.2008.019.
- BUSER, S., RAMOVŠ, A. & TURNŠEK, D. 1982: Triassic reefs in Slovenia. Facies, 6: 15–24.
- BUSER, S., GRAD, K., OGORELEC, B., RAMOVŠ, A. & ŠRIBAR, L.J. 1989: Stratigraphical, paleontological and sedimentological characteristics of Upper Permian beds in Slovenia, NW Yugoslavia. Mem. Soc. Geol. It., 34 (1986): 195–210.
- CAROZZI, A.V. 1963: Half-moon oolites. J. Sed. Petrol., 33/3: 633–645.
- CELARC, B. 2004: Geološka zgradba severovzhodnega dela Kamniško-Savinjskih Alp = Geologic structure of Northeastern part of Kamnik-Savinja Alps. Disertacija. Univ. Ljubljana, NTF-Katedra za geol., 137 p.
- CHAFETZ, H.S. & BUTLER, J.C. 1980: Petrology of recent caliche pisolites, spherulites and speleothem deposits from Central Texas. Sedimentology, 27: 497–518.
- ČADEŽ, F. 1977: Sadra in anhidrit na Idrijskem = Gypsum and Anhydrite Occurrences in Idria Region. Geologija, 20: 289–301.
- 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.
- ČAR, J., GREGORIČ, V., OGORELEC, B. & OREHEK, S. 1980: Sedimentološki razvoj skitskih plasti v idrijskem rudišču = Sedimentological development of Scythian beds in the Idrija mercury deposit. Rud. met. zb., 27/1: 3–20.
- ČAR, J., SKABERNE, D., OGORELEC, B., TURNŠEK, D. & PLACER, L. 1981: Sedimentological characteristics of Upper Triassic (Cordevolian) circular quiet water coral bioherms in western Slovenia, northwestern Yugoslavia. SEPM Spec. Publ. 30: 233–240.
- DEBELJAK, I. & BUSER, S. 1998: Lithotid bivalves in Slovenia and their mode of life. Geologija, 40 (1997): 11–64, doi:10.5474/geologija.1997.001.
- DEMŠAR, M. & DOZET, S. 2002: Litostratigrafski razvoj skitske serije na Križni gori = Lithostratigraphic development of Schytian series on the Križna gora Mt. RMZ – Mater. Geoenviron., 49/2: 145–161.
- DOLENEC, M. 2000: Impact of global changes on carbon and oxygen isotopic variability across the Permian-Triassic boundary in the Idrija valley. Graduation thesis, Univ. Ljubljana, NTF, 60 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. Geologija, 44/2: 331–340, doi:10.5474/geologija.2001.025.
- DOLENEC, M., DOZET, S. & LOJEN, S. 2006: Permian-triasna meja ter zgornjepermski in spodnjeperski skladi na jugovzhodnem obrobju Ljubljanskega barja, osrednja Slovenija = Permian-Triassic boundary and Upper Permian as well as Lower Scythian beds in the southeastern borderland of the Ljubljana marsh, Central Slovenia. RMZ – Materiali in geokolje, 53/2: 229–246.
- DOLENEC, T., OGORELEC, B. & PEZDIČ, J. 1981: Zgornjepermske in skitske plasti pri Tržiču = Upper Permian and Scythian beds in the Tržič area. Geologija, 24/2: 217–238.
- DOLENEC, T., OGORELEC, B., LOJEN, S. & BUSER, S. 1999a: Meja perm-trias v Masorah pri Idriji = Permian-Triassic boundary in the Idrija Valley: Masore section. RMZ – Materiali in geokolje, 46/3: 449–452.
- DOLENEC, T., LOJEN, S., BUSER, S. & DOLENEC, M. 1999b: Stable isotope event markers near the Permian-Triassic boundary in the Karavanke Mountains (Slovenia). Geol. Croat., 52/1: 77–81.
- DOLENEC, T., OGORELEC, B., LOJEN, S. & BUSER, S. 1999c: Meja perm-trias v Masorah pri Idriji = Permian-Triassic boundary in the Idrija Valley: Masore section. RMZ – Materiali in geokolje, 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: 287–299.
- DOZET, S. 1978: Biostratigrafski razvoj triasnih plasti na ozemlju lista Postojna. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, NTF-Katedra za geologijo, Ljubljana: 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. 1980: Jurske plasti na kočevskem in južnovzhodnem Notranjskem = Jurassic beds in Kočevska and Southern Notranjska area. Rud. met. zb., 27/4: 443–457.
- DOZET, S. 1985: Geološke razmere na območju rudišča Pleše in v širši okolici = On the geologic conditions in the Pleše ore deposit area. Rud. met. zb., 32/1–2: 27–49.

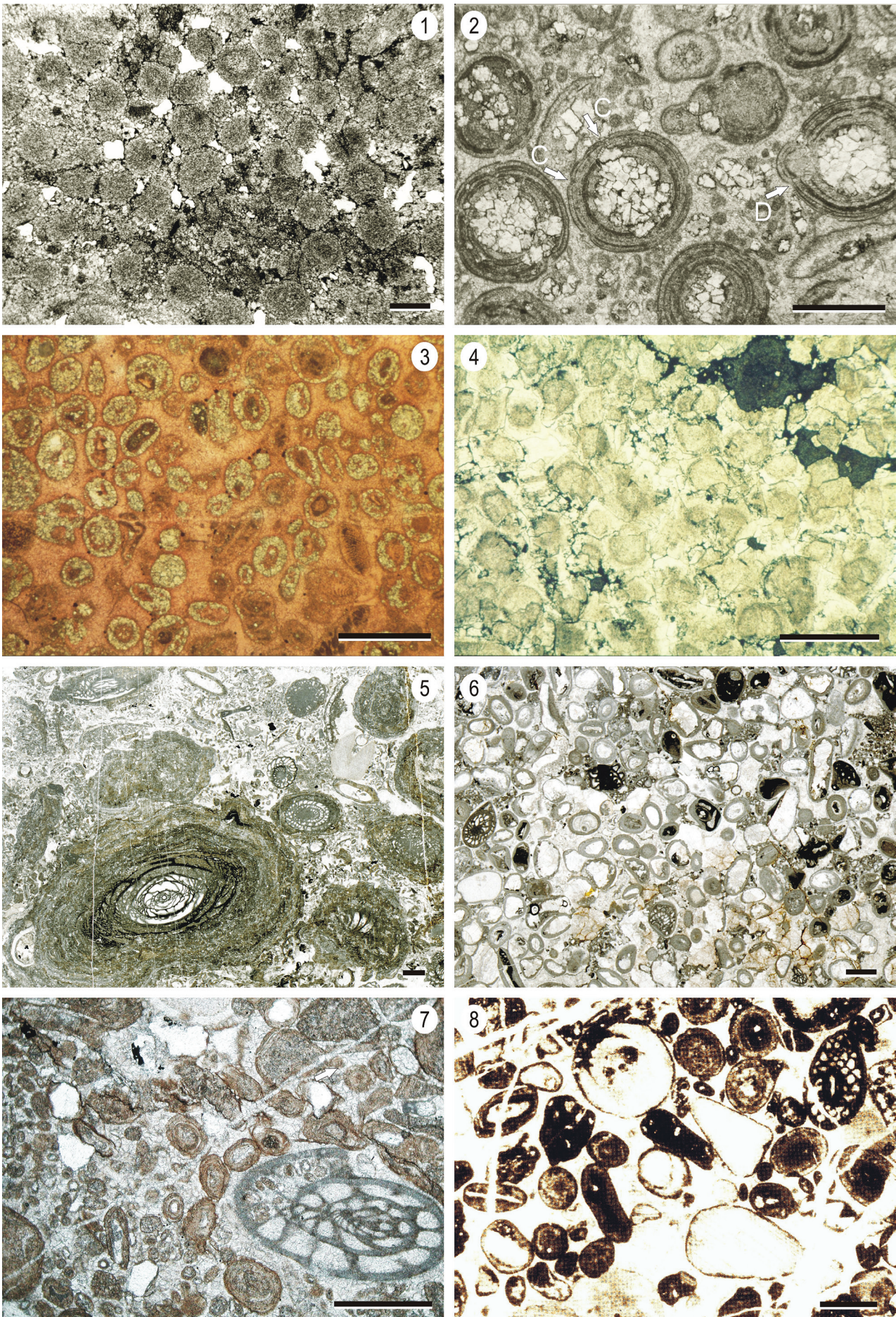
- DOZET, S. 1989: Razvoj mezozojskih plasti na kočevskem in v okolici. Disertacija, Univ. Ljubljana, NTF, Oddelek za geologijo, Ljubljana: 187 p.
- DOZET, S. 1990a: Triasni skladi Kočevske in Gorskega Kotarja = Triassic Beds of Kočevje and Gorski Kotar Area. *Rud. met. zb.*, 37/2: 141-160.
- DOZET, S. 1990b: Biostratigrafska razčlenitev jurskih in spodnjekrednih plasti Kočevske in Gorskega Kotarja = Biostratigraphic subdivision of the Jurassic and Lower Cretaceous beds in Kočevje and Gorski Kotar area. *Rud. met. zb.*, 37/1: 3-18.
- DOZET, S. 1990c: Loferske cikloteme v glavnem dolomite Kočevske = Lofers cyclothems in the Main Dolomite of the Kočevje area. *Rud. met. zb.*, 4: 507-528.
- DOZET, S. 1991a: Triasno klastično-karbonatno zaporedje sedimentov Kočevske in Gorskega kotarja = The Triassic clastic-carbonate sequence of sediments in Kočevje and Gorski kotar area. *Rud. met. zb.*, 37/3: 391-408.
- DOZET, S. 1991b: Norijski onkoidi v glavnem dolomitu Kočevske = Norian oncoids in the Main Dolomite of the Kočevje area. *Rud. met. zb.*, 38/1: 79-95.
- DOZET, S. 1992a: Litostratigrafske enote in značilne mikrofacije kočevske jure = Lithostratigraphic units and significant microfacies of the Kočevje Jurassic. *Rud. met. zb.*, 39/3-4: 287-305.
- DOZET, S. 1992b: Litostratigrafija, diageneza, sedimentacijsko okolje in geokemija jurskih plasti na listu Delnice = Lithostratigraphy, diagenesis, environment and geochemistry of the Jurassic beds on the Delnice sheet. *Rud. met. zb.*, 39/1-2: 193-209.
- DOZET, S. 1993: Lofers cyclothems from the Lower Liassic Krka Limestones. *Riv. It. Paleont. Strat.*, 99/ 1: 81-100.
- DOZET, S. 1994: Stratigraphy of the Suha Krajina area (Slovenia) and stratigraphic gap Middle Liassic-Lower Malm. *Rud. met. zb.*, 41: 231-238.
- DOZET, S. 1995: The Malm algal nodules (oncolites) from the Suha Krajina (Slovenia). *Rud. met. zb.*, 42/3-4: 165-169.
- DOZET, S. 1996: Foraminiferal and algal biostratigraphy of the Jurassic beds in Southeastern Slovenia. *Rud. met. zb.*, 43/1-2: 3-10.
- DOZET, S. 1997: Ambrus Beds – Important key for interpretation of Neocomian paleogeography, sea-level changes, depositional setting and tectonics in Suha Krajina area (Slovenia). – *Geologija*, 39 (1996): 119-131, doi:10.5474/geologija.1996.005.
- DOZET, S. 1998: Lower Jurassic dolomite - limestone succession with coal in the Kočevski Rog and correlation with neighbouring areas (southeastern Slovenia). *Geologija*, 41 (1999): 71-101, doi:10.5474/geologija.1998.004.
- DOZET, S. 2000 a: Višnja gora Formation, central Slovenia. *Rud. met. zb.* 47/2: 137-154.
- DOZET, S. 2000 b: Pleška baritonosna formacija, osrednja Slovenija = Barite-bearing Pleše Formation, Central Slovenia. *Geologija*, 42:41-68, doi:10.5474/geologija.1999.004.

PLATE 1

Scale on all figures is 1 mm

- 1 Oosparitic dolomite – grainstone. Primary oolitic structure is recognized by ooid contours. Intergranular porosity is affected by dolomitization. Upper Permian, Zajasovnik at Trojane
- 2 Oosparitic dolomite – packstone. Ooid nuclei show selective late-diagenetic dolomitization. Some ooids show slight cerebroid texture (arrow C) of outer laminae and their deformation (arrow D). Lower Triassic, Zakamnik above the Karavanke road tunnel
- 3 Oolitic grainstone, affected by late-diagenetic dolomitization. Tesero horizon at Permian/Triassic boundary. Idrija river bed at Spodnja Idrija. Alizarin red staining
- 4 Sparry dolomite with preserved primary oolitic structure and with sphalerite crystals. Permian/Triassic boundary, abandoned Pb-Zn mine Trebelno at Mokronog
- 5 Oncobiosparitic grainstone. Fusulinid foraminifers as nuclei in some oncoids of Osagia type. Rigelj beds, Lower Permian, Dovžanova soteska at Tržič (M. Novak collection)
- 6 Oolitic grainstone with some foraminifers. Nuclei of ooids were leached during diagenesis and later cemented in the vadose environment by sparry calcite. Base of Born Formation, Lower Permian, Dovžanova soteska at Tržič (M. Novak collection)
- 7 Bioosparitic grainstone with small ooids, bigger fusulinids and some detrital quartz grains. Upper Carboniferous (Gzhelian), Schulterkofel Formation, Dovžanova soteska at Tržič (M. Novak collection)
- 8 Bioosparitic grainstone with some ooids, fusulinids and echinoid plates. Upper Carboniferous, Suhi vrh above the Karavanke road tunnel

PLATE 1



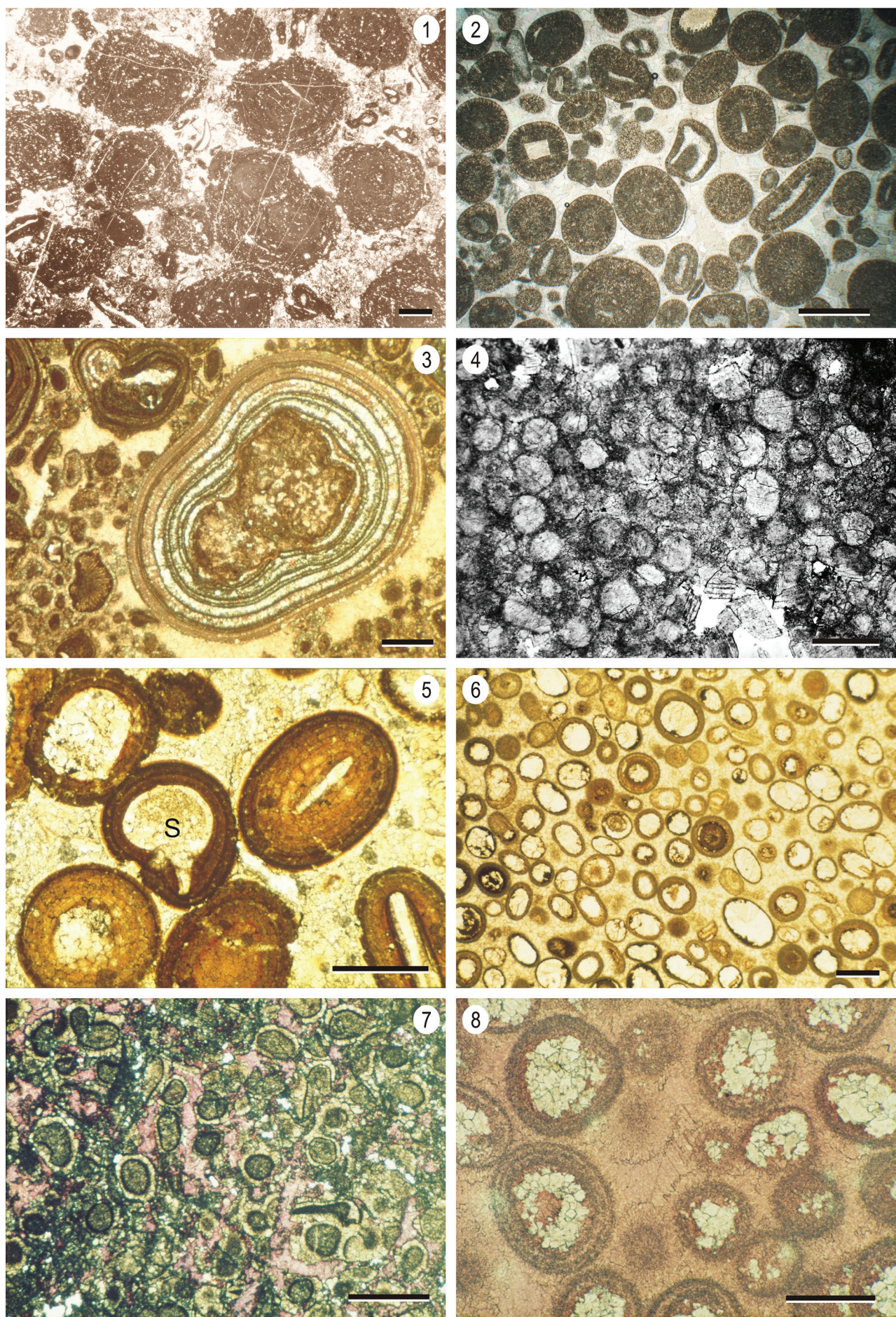
- DOZET, S. 2000c: Stratigraphy of the Verd oolitic limestone complex. *Rud.met. zb.*, 47/3-4: 245-254.
- DOZET, S. 2000d: Hočevje oolitic group, Central Slovenia. *Acta Cars.*, 29/1: 197-212.
- DOZET, S. 2004a: O karnijskem železnatem boksitu Kopitovega griča ter o plasteh v njegovi talnini in krovni = On Carnian oolitic iron bauxite of Kopitov grič and on beds in its foot- and hanging wall. *RMZ - Mater. Geoenviron.*, 51/4: 2191-2208.
- DOZET, S. 2004b: Zaplaza Formation, Central Slovenia. *RMZ - Mater. Geoenviron.*, 51/4: 2175-2189.
- DOZET, S. 2009: Lower Jurassic carbonate succession between Predole and Mlačevo, Central Slovenia. *RMZ - Mater. Geoenviron.*, 56/2: 164-192.
- DOZET, S. & BUSER, S. 2009: Trias = Triassic. In: PLENIČAR, M. et al. (eds.): *The Geology of Slovenia*, Geološki zavod Slovenije, 161-214.
- DOZET, S. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 2007: Spodnje-triasne plasti na južnovzhodnem obrobju Ljubljanske kotline, osrednja Slovenija = Lower Triassic beds in the southeastern borderland of the Ljubljana depression, central Slovenia. *RMZ - Mater. Geoenviron.*, 54/3: 361-386.
- DOZET, S. & NOVAK, M. 2002: Detailed lithostratigraphic dismembering of the Lower Triassic stratigraphic sequence in the Toško Čelo area. *RMZ - Mater. Geoenviron.*, 49/2: 163-175.
- DOZET, S. & OGORELEC, B. 1990: Mikrofacije noričkih i retskih naslaga u južnoj Sloveniji. XII. Kongr. Geol. Jugosl., 1: 239-257.
- DOZET, S. & SILVESTER, M. 1979: Skitske in zgornjekarnijske kamenine na Kočevskem = Scythian and Upper Carnian rocks from the Kočevje region. *Geologija*, 22/2: 327-336.
- DOZET, S. & STROHMENGER, C. 1996: Late Malm carbonate breccias at Korinj and their significance for eustasy and tectonics (Central Slovenia). *Geologija*, 37/38 (1994/95): 215-223.
- DOZET, S. & STROHMENGER, C. 2000: Podbukovska formacija, osrednja Slovenija = Podbukovje Formation, Central Slovenia. *Geologija*, 43/2: 197-212, doi:10.5474/geologija.2000.014.
- DOZET, S. & ŠRIBAR, L. 1981: Biostratigrafija jurskih plasti južno od Prezida v Gorskem Kotaru = Biostratigraphy of Jurassic beds south of Prezid in Gorski Kotar. *Geologija*, 24/1: 109-126.
- DOZET, S. & ŠRIBAR, L. 1998a: Lower Cretaceous shallow-marine Sedimentation and Biota on Dinaric Carbonate Platform between Logatec, Krka and Kolpa (Southern Slovenia). *Geologija*, 40 (1997): 153-185, doi:10.5474/geologija.1997.007.
- DOZET, S. & ŠRIBAR, L. 1998b: Biostratigraphy of Shallow Marine Jurassic Beds in Southeastern Slovenia. *Geologija*, 40 (1997): 187-221, doi:10.5474/geologija.1997.008.
- DROBNE, K. 1979: Paleocene and Eocene beds in Slovenia and Istria. In: DROBNE, K. (ed.): *Geological development in Slovenia and Croatia*. 16th Europ. Micropal. Colloc., guidebook, 49-63.
- DROBNE, K., OGORELEC, B., PAVŠIČ, J. & PAVLOVEC, R. 2009: Paleocen in eocen v jugozahodni Sloveniji = Paleocene and Eocene in South-Western Slovenia. In: *The Geology of Slovenia*, Geološki zavod Slovenije, 311-372.
- DROVENIK, M., PLENIČAR, M. & DROVENIK, F. 1980: Nastanek rudišč v SR Sloveniji = The origin

PLATE 2

Scale on all figures is 1 mm

- 1 Spheroidal oncoidal packstone. Carnian, Gačnik on Vojsko plateau at Idrija
- 2 Oolitic grainstone. Nuclei of some ooids are echinoderm plates. Carnian, Pikov vrh above Helena creek at Mežica
- 3 A pisoid in oobiosparitic grainstone. The biomicritic nucleus is surrounded by selectively dolomitized laminae. Lower Carnian, Krma valley in Julian Alps
- 4 Oosparitic dolomite – grainstone. Primary oolitic structure is still evident by their contours. Intergranular pores were formed during the late dolomitization. Ladinian, Jazbina gorge at Mežica
- 5 Oosparitic grainstone. Ooids are reddish stained due to ferroan hydroxides. Central ooid (S) was deformed during compaction in vadose environment. Lower Triassic, Kisovec quarry at Zagorje
- 6 Oolitic grainstone with dissolved superficial ooids. Intergranular “moldic” pores are filled with granular and drusy meteoric sparite cement. Lower Triassic, Laško
- 7 Sparry dolomite with preserved structure of micritic oolites. Intergranular pores are cemented by late diagenetic sparry calcite. Some detritic quartz grains. Permian/Triassic boundary, footwall of Velenje coal mine. Alizarin red staining
- 8 Oosparitic grainstone. Ooid nuclei show selective dolomitization. Lower Triassic, Masore at Spodnja Idrija. Alizarin red staining

PLATE 2



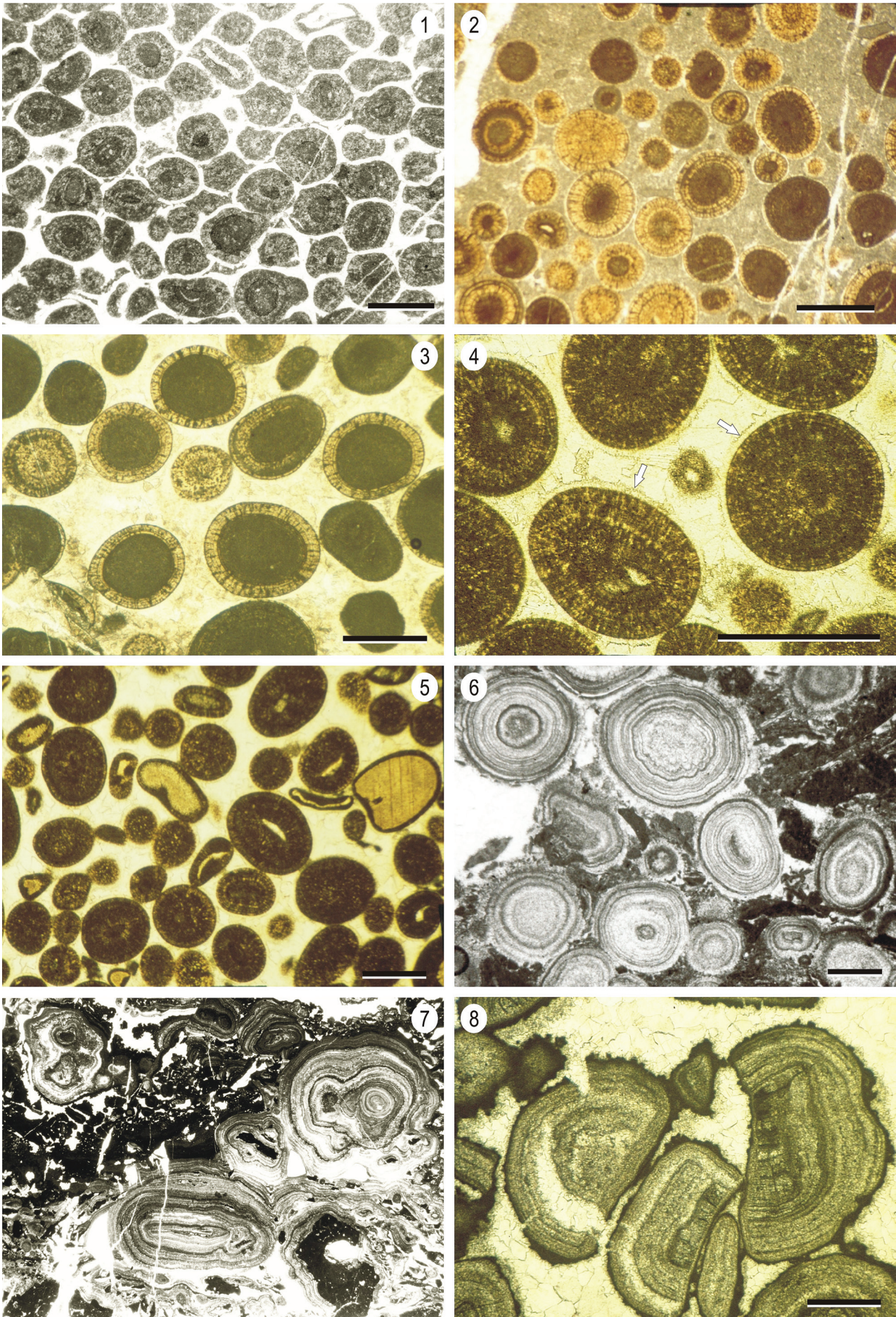
- of Slovenian ore deposits. *Geologija*, 23/1: 1-157.
- DUNHAM, R.J. 1969: Vadose pisolites in the Capitan Reef (Permian), New Mexico and Texas. In: FRIEDMAN, G.M. (ed.): *Depositional Environments in Carbonate Rocks*. SEPM Spec. Publ., 14: 182-191.
- EVAMY, B.D. 1973: The precipitation of aragonite and its alteration to calcite on the Trucial Coast of the Persian Gulf. In: PURSER, B. H. (ed.): *The Persian Gulf*. Springer Verl., 329-341.
- FISCHER, A. G. 1964: The Lofer cyclothems of the Alpine Triassic. In: MEERIAM, D.F. (ed): *Symposium on cyclic sedimentation*. Kansas Geol. Soc. Bull., 169/1, 107-150.
- FLÜGEL, E. 2004: *Microfacies of carbonate rocks – analysis, interpretation and application*. Springer Verlag, Berlin: 976 p.
- FLÜGEL, E. & RAMOVŠ, A. 1961: Fossilinhalt und Mikrofazies des Dachsteinkalkes (Ober-Trias) in Begunjščica-Gebirge, S. Karawanken (NW Slowenien, Jugoslawien). *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, 287-294.
- GRAD, K. & OGORELEC, B. 1980: Zgornjepermske, skitske in anizične kamnine na Žirovskem ozemlju = Upper Permian, Scythian and Anisian rocks in the Žiri area. *Geologija*, 23/2: 189-220.
- GUŠIĆ, I. & JELASKA, V. 1990: Stratigrafija gornjokrednih naslaga otoka Brača u okviru geodinamske evolucije Jadranske karbonatne platforme. *Djela JAZU, Razr. Priro. Znan.*, 69: 160 p.
- HAAS, J., HIPS, K., PELIKAN, P., ZAJZON, N., GÖTZ, A.E. & TARDI-FILACZ, E. 2004: Facies analysis of marine Permian/Triassic boundary sections in Hungary. *Acta. Geol. Hung.*, 47/4: 297-340.
- HAAS, J., DEMENY, A., HIPS, K. & VENNEMANN, T. W. 2006: Carbon isotope excursions and microfacies changes in marine Permian-Triassic boundary sections in Hungary. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 237: 160-181.
- HALLAM, A. 1978: Eustatic cycles in the Jurassic. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, 23, 1-32.
- HALLAM, A. 1988: A reevaluation of Jurassic eustasy in the light of new data and the revised Exxon curve. In: WILGUS, C.K. et al. (eds.): *Sea-level changes: an integrated approach*. SEPM Spec. Publ., 42: 261-273.
- HOLSER, W. T. & SCHÖNLAUB, H. P. (eds.) 1991: *The Permian-Triassic Boundary in the Carnic Alps of Austria (Gartnerkofel Region)*. Abh. Geol. Bundesanst., 45: 1-232.
- JEŽ, J. 2011: *Zgornjekredna sedimentacijska dinamika severnega obrobja Jadranske karbonatne platforme (zahodna Slovenija)*. Disertacija. Univerza v Ljubljani, NTF, 185 p. + table.
- JEŽ, J., OTONIČAR, B., FUČEK, L. & OGORELEC, B. 2011: Late Cretaceous sedimentary evolution of a northern sector of the Adriatic Carbonate Platform (Matarsko Podolje, SW Slovenia). *Facies*, 57/3: 447-468, doi:10.1007/s10347-010-0249-6.
- JURKOVŠEK, B. 1978: *Biostratigrafija karnijske stopnje v okolici Mežice = Biostratigraphy of the Carnian beds in the Mežica area*. *Geologija*, 21/2: 173-208.
- JURKOVŠEK, B. 1986: *Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Beljak in Ponteba*. Zvez. geol. zav., Beograd.
- JURKOVŠEK, B. 2008: *Geološka karta severnega dela Tržaško-komenske planote 1 : 25.000 = Geological Map of the Northern Part of the Trieste-Komen Plateau, Slovenia, 1 : 25.000*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- JURKOVŠEK, B. 2010: *Geološka karta severnega dela Tržaško-komenske planote 1 : 25.000 – Tolmač*

PLATE 3

Scale on all figures is 1 mm

- 1 Oolitic grainstone. Ooids are slightly deformed and flattened, due to tectonics and dissolution. Rim cement is most evident. Lower Jurassic, Krka
- 2 Ooids in micritic matrix – packstone. Micritic texture of nuclei and radial-fibrous structure of outer laminae. Lower Jurassic, Grčarevec–Kalce
- 3 Oosparitic grainstone with typical mixed composition of ooids - micritic nuclei are overgrown with radial fibrous calcite laminae. Lower Jurassic, Verd at Vrhnika
- 4 Detail of oosparitic limestone. Two generations of cement – rim cement A (arrow) and sparry calcite in intergranular pores are evident. Radial-fibrous type of ooids. Lower Jurassic, Trnovski gozd
- 5 Oosparitic grainstone. Echinoid plates occur as nuclei in some ooids. Lower Jurassic, Trnovski gozd
- 6 Vadose pisoids in the intramicritic dolomite with shrinkage pores. Rhaetian, Trenta
- 7 Irregular lobate growth form oncoids in micritic dolomite with shrinkage pores. Norian/Rhaetian, Kanin Mts., Julian Alps
- 8 Vadose pisoids, encrusted by cyanobacteria. Sparry dolomite between the pisoids. Main dolomite, Norian, Koprivnik at Kočevje

PLATE 3



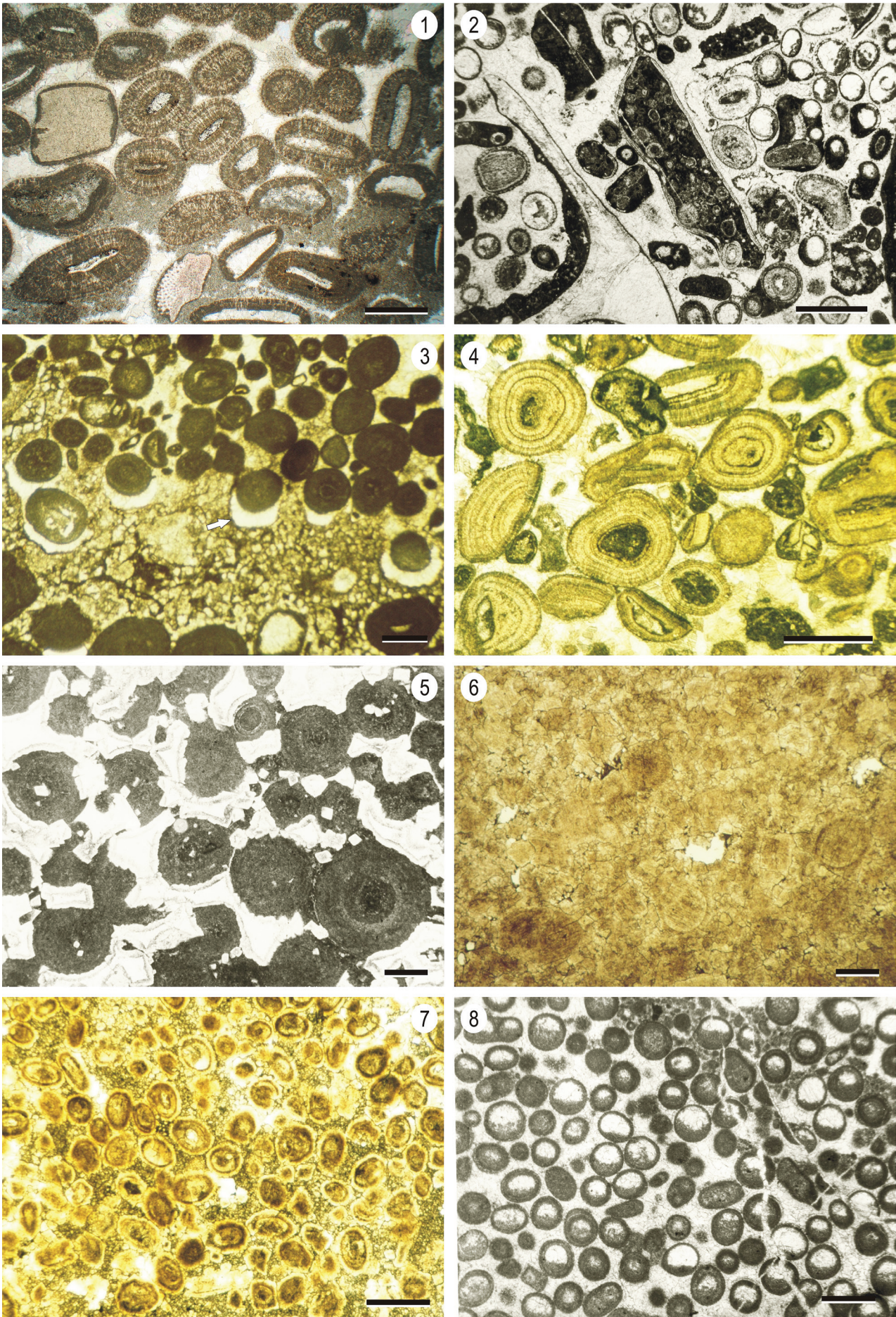
- = Geological Map of the Northern Part of the Trieste-Komen Plateau 1:25.000, Explanatory Book. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 72 p.
- JURKOVŠEK, B. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 1997: Karnijski krinoidi iz okolice Mežice = Carnian crinoids from Mežica surroundings. Razprave IV. Razr. SAZU, 38/2: 33-71.
- JURKOVŠEK, B., ŠRIBAR, L., OGORELEC, B. & KOLAR - JURKOVŠEK, T. 1990: Pelagične jurske in kredne plasti v zahodnem delu Julijskih Alp = Pelagic Jurassic and Cretaceous beds in the western part of the Julian Alps. Geologija, 31/32: 285-328.
- 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. IGGG, Ljubljana: 143 p.
- JURKOVŠEK, B., OGORELEC, B. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 1998: Spodnjetrijske plasti pri Tehovcu (Polhograjsko hribovje) = Lower Triassic beds from Tehovec, Polhov Gradec Hills, Slovenia. Geologija, 41 (1999): 29-40, doi:10.5474/geologija.1998.002.
- JURKOVŠEK, B., KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JAECKS, G.S. 2002: Makrofavna karnijskih plasti mežiškega prostora = Macrofauna of the Carnian beds in the Mežica area. Geologija, 45/2: 413-418, doi:10.5474/geologija.2002.041.
- KOCH, R. 1988: Mikrofazielle und diagenetische Entwicklung kretazischer Karbonatgesteine in Jugoslawischen Raum. Habilitationsschrift Univ. Heidelberg: 210 p.
- KOCH, R. & OGORELEC, B. 1990: Biogenic constituents, cement types and sedimentary facies – Their interrelations of Lower Cretaceous (Valanginian to Hauterivian) peritidal carbonate sediments (Trnovo, NW Slovenia). In: HELING, D. et al. (eds.): Sediments and environmental geochemistry, Springer Verlag: 95-123.
- KOCH, R., OGORELEC, B. & OREHEK, S. 1989: Microfacies and Diagenesis of Lower and Middle Cretaceous Carbonate Rocks of NW-Yugoslavia (Slovenia, Trnovo Area). Facies, 21: 135-170.
- KOCH, R., MOUSSAVIAN, E., OGORELEC, B., SKABERNE, D. & BUCUR, I.I. 2002: Development of a Lithocodium-Reef-Mound: An indication of "stress environment" (Middle Aptian, W-Slovenia). Geologija, 45/1: 71-90, doi:10.5474/geologija.2002.006.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JURKOVŠEK, B. 2007: First record of *Hindeodus-Isarcicella* population in Lower Triassic of Slovenia. Paleogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol., 252: 72-81.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JURKOVŠEK, B. 2010: New paleontological evidence of the Carnian strata in the Mežica area (Karavanke Mts., Slovenia): conodont data for the Carnian Pluvial Event. Palaeogeograph., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 290/1-4: 81-88.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T., JURKOVŠEK, B. & ALJINOVIC D. 2011a: Conodont biostratigraphy and lithostratigraphy across the Permian-Triassic boundary at the Lukač section in western Slovenia. Riv. ital. paleontol. stratigr., 117/1: 115-133.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T., JURKOVŠEK, B., ALJINOVIC, D. & NESTELL, G.P. 2011: Stratigraphy of Upper Permian and Lower Triassic Strata of the Žiri Area (Slovenia). Geologija, 54/2: 193-204, doi:10.5474/geologija.2011.015.

PLATE 4

Scale on all figures is 1 mm

- 1 Oolitic grainstone with radial-fibrous ooids. Micritic matrix is still preserved somewhere. Echinoid plates occur as nuclei in some ooids. Middle Jurassic, Trnovski gozd
- 2 Intraoosparitic grainstone. Some intraclasts are coated with oolitic laminae. Upper Jurassic, Vrhnik - Logatec
- 3 Oosparitic grainstone. Stalactitic cement under ooids (arrow) indicates diagenesis in meteoric environment. Lower Jurassic, Grčarevec - Kalce
- 4 Oosparitic grainstone. Ooids have radial-fibrous envelopes. Some of them are broken and show "re-generation". Lower Jurassic, Gozd at Col
- 5 Oosparitic grainstone, affected by selective late-diagenetic dolomitization, prograding from pores into ooid grains. Lower Jurassic, Vrhnik - Logatec
- 6 Sparry dolomite with open intergranular pores, formed during the late dolomitization. Primary oolitic structure is still evident. Lower Jurassic, Bistra at Vrhnik
- 7 Sparry dolomite with preserved primary oolitic structure. Lower Jurassic, Onek at Kočevje
- 8 "Half moon" ooids in oosparitic grainstone. Nuclei in most ooids have dropped to the bottom of the concentric outer layers, forming geopetal fabric. Such ooids are products of evaporate or aragonite solution process during meteoric diagenesis. Lower Jurassic, Javorški vrh on Trnovski gozd

PLATE 4



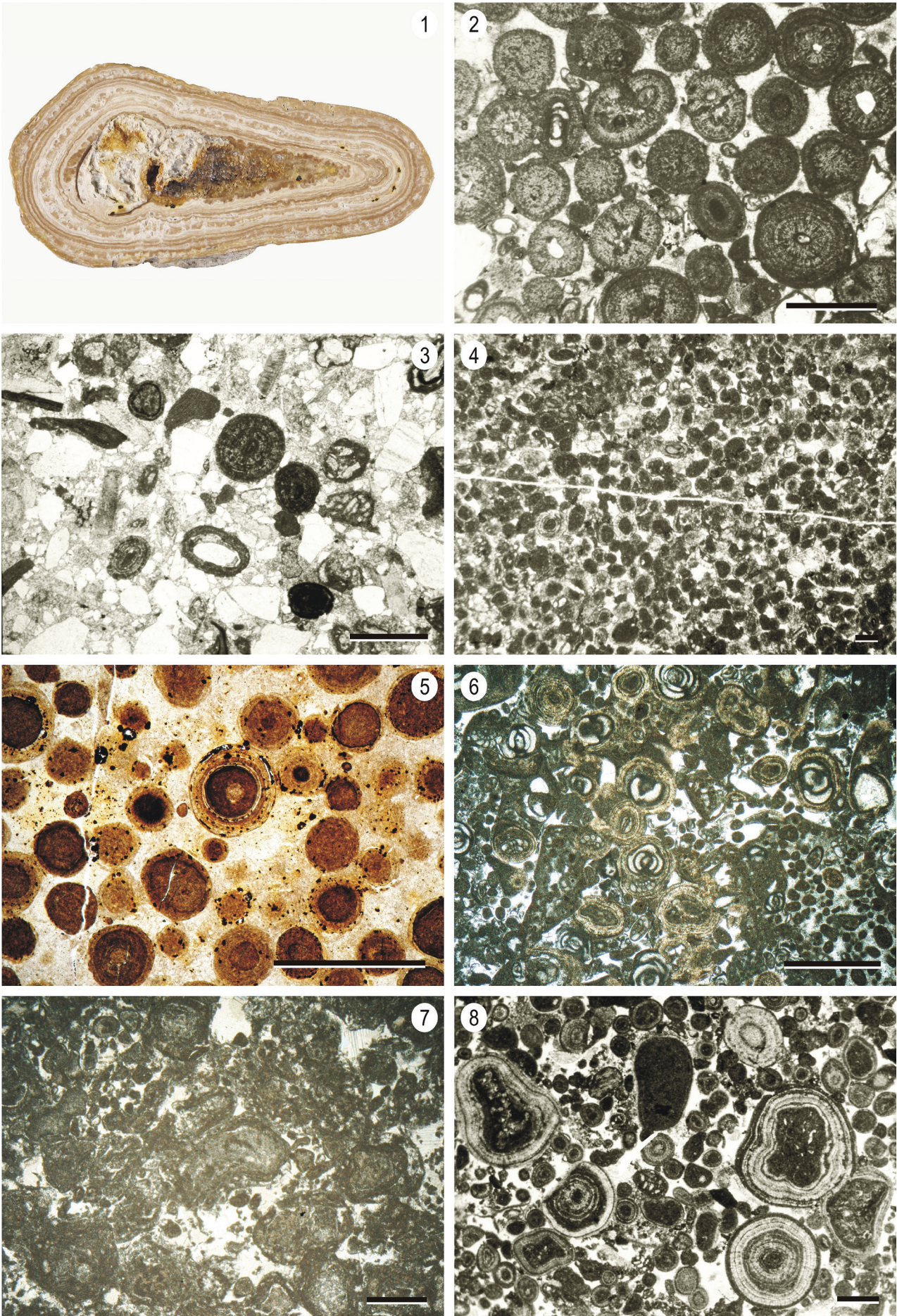
- KRALJ, P. & DOZET, S. 2009: Volcanic succession of the Borovnik Member (Mohorje Formation), Bloke Plateau area, Central Slovenia. *Geologija*, 52/1: 21-28, doi:10.5474/geologija.2009.003.
- KUŠČER, D., GRAD, K., NOSAN, A. & OGORELEC, B. 1974: Geološke raziskave soške doline med Bovecem in Kobaridom = Geology of the Soča Valley between Bovec and Kobarid. *Geologija*, 17: 425-476.
- LOGAN, B.W., REZAK, R. & GINSBURG, R.N. 1964: Classification and environmental significance of algal stromatolites. *Jour. Geology*, 72: 68-83.
- MAZZULO, S.J. 1977: Shrunken (geopetal) ooids: evidence of origin unrelated to carbonate-evaporite diagenesis. *J. Sed. Petrol.*, 47/1: 392-397.
- MLAKAR, I. 1969: Krovna zgradba idrijsko-žirovskega ozemlja = Nappe Structure of the Idrija-Žiri Region. *Geologija*, 12: 5-72.
- MIKUŽ, V. 2004: Miocenski onkoidi iz območja med Orešjem in Vinjim vrhom nad Šmarjeto na Dolenjskem = Miocene oncooids from the area between Orešje and Vinji vrh above Šmarjeta, Lower Carniola, Slovenia. *Razprave IV. razr. SAZU*, 45/3: 51-89.
- MIKUŽ, V. 2007: Onkoidi iz opuščene peskokopa Drtija pri Moravčah = The oncooids from the abandoned Drtija sand-pit near Moravče in Central Slovenia. *Razprave IV. razr. SAZU*, 48/: 179-221.
- MLAKAR, I. & ČAR, J. 2009: Geološka karta idrijsko-cerkljanskega ozemlja med Stopnikom in Rovtami 1 : 25.000, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- MUŠIČ, B. 1992: Zgornjepermjske in spodnjetriasne kamnine pri Skopačniku v Želimeljski dolini = Upper Permian and Lower Triassic beds at Skopačnik in the Želimlje valley, Ig, Slovenia. *Rud. met. zb.*, 39/1-2: 241-259.
- NOÉ, S. U. 1987: Facies and paleogeography of the marine Upper Permian and of the Permian-Triassic Boundary in the Southern Alps (Bellerophon Formation, Tesero Horizon). *Facies*, 16: 89-142.
- NOVAK, M. 2001: Skitijske plasti Toškega Čela = Scythian beds in the Toško Čelo area. *Geologija*, 44/2: 295-303, doi:10.5474/geologija.2001.021.
- NOVAK, M. 2003: Zgornjetriasne in spodnjejurjske plasti na območju Podutika pri Ljubljani = Upper Triassic and Lower Jurassic beds in the Podutik area near Ljubljana, Slovenia. *Geologija*, 46/1: 65-74, doi:10.5474/geologija.2003.004.
- NOVAK, M. 2007a: Biostratigrafija mlajšega paleozoika Dolžanove soteske. Disertacija, NTF Univ. Ljubljana: 159 p.
- NOVAK, M. 2007b: Depositional environment of Upper Carboniferous-Lower Permian beds in the Karavanke Mountains (Southern Alps, Slovenia). *Geologija*, 50/2: 247-268, doi:10.5474/geologija.2007.018.
- NOVAK, M. & DOZET, S. 2002: Primerjava julskih in tuvalskih plasti v dveh profilih na območju osrednjih Posavskih gub = Comparison of the Julian and Tuvlian beds in two cross-sections in the Central Sava Folds area. *Geologija*, 45/1: 47-57, doi:10.5474/geologija.2002.004.
- OGORELEC, B. 1977: Geokemične značilnosti triadnih dolomitov Slovenije, I. faza. Mezozoik v Sloveniji. Arhiv Geol. zavod Slovenije.
- OGORELEC, B. 1979: Dolomit skitske stopnje v vzhodnih Posavskih gubah. V: Mezozoik v Sloveniji – Geokemične značilnosti triasnih dolomitov v Sloveniji, III. faza. Arhiv Geol. zav. Slovenije, Ljubljana 38-50.

PLATE 5

Scale on figures is 1 mm

- 1 Oncoidal overgrowth of gastropod shell. Lower Sarmatian, Orešje at Kostanjevica. Length of oncooid is 5.5 cm. (V. Mikuz collection)
- 2 Oolitic grainstone with radial-fibrous concentric ooids. Upper Miocene (Badenian), Osek quarry at Lenart in Slovenske gorice
- 3 Calcareous sandstone – biocalcarenite with rare ooids. Upper Miocene (Badenian), Sedovec at Šmarje pri Jelšah
- 4 Pelmicritic limestone with some ooids. Lower Paleocene (Danian), Čebulovica at Divača
- 5 Oolitic bauxite. Santonian – turonian, Mt. Nanos – Podraška bajta (J. Jež collection)
- 6 Intraoosparitic packstone. Foraminifers as nuclei in some ooids. Lower Cretaceous (Albian), Nadrt at Hrušica, (J. Jež collection)
- 7 Small oncooids in pelmicritic, partly washed packstone. Lower Cretaceous (Hauterivian), (J. Jež collection)
- 8 Dark grey poorly sorted bedded oosparitic limestone with rare foraminifers. Urgonian facies – Lower Aptian

PLATE 5



- OGORELEC, B. 1984: Kaninsko pogorje in Bovška kotlina. V: OREHEK, A. (ur.): 6. Sedimentol. plenum Jugoslavije, Bovec, 39-45 (Arhiv Geol. zavod Slovenije).
- OGORELEC, B. 1988: Mikrofazies, Geochemie und Diagenese des Dachsteinkalkes und Hauptdolomits in Süd-West-Slowenien, Jugoslawien. Diss. Univ. Heidelberg: 173 p.
- OGORELEC, B. 2009: Spodnjejurske plasti v Preserju pri Borovnici = Lower Jurassic beds at Preserje near Borovnica, Central Slovenia. *Geologija*, 52/2: 193-204, doi:10.5474/geologija.2009.019.
- OGORELEC, B. 2011: Mikrofacies mezozojskih karbonatnih kamnin Slovenije = Microfacies of Mesozoic Carbonate Rocks in Slovenia. *Geologija*, 54/2 dodatek – *supplement*, 1-136, doi:10.5474/geologija.2011.011.
- OGORELEC, B. & BUSER, S. 1997: Dachstein Limestone from Krn in Julian Alps (Slovenia). *Geologija*, 39 (1996): 133-157, doi:10.5474/geologija.1996.006.
- OGORELEC, B. & DOZET, S. 2000: Oolitic Limestone and Dolomite in Mesozoic Beds of Slovenia. *Zbornik radova*, 2. Hrvatski geol. kongres, Cavtat - Dubrovnik, 500-501 (preliminary report), Zagreb.
- OGORELEC, B. & KUŠEJ, J. 1979: Raziskave dolomitnih formacij v okolici Mežice. V: *Mezozoik v Sloveniji – Geokemične značilnosti triasnih dolomitov v Sloveniji*, III. faza. Arhiv Geol. zav. Slovenije, Ljubljana: 5-37.
- OGORELEC, B. & PREMUR, U. 1975: Sedimentne oblike triasnih karbonatnih kamnin v osrednjih Posavskih gubah = Sedimentary Structures of Triassic Carbonate Rocks in the Central Part of Sava-Folds. *Geologija*, 18: 185-196.
- OGORELEC, B. & ROTHE, P. 1992: Mikrofazies, Diagenese und Geochemie des Dachsteinkalkes und Hauptdolomits in Süd-West-Slowenien. *Geologija*, 35: 81-181.
- OGORELEC, B., OREHEK, S. & BUDKOVIČ, T. 1999a: Litostratigraphy of the Slovenian part of the Karavanke road Tunnel. *Abh. Geol. Bundesanst.*, 56/2: 99-112.
- OGORELEC, B., DOLENEC, T. & PEZDIČ, J. 1999b: Izotopska sestava O in C v mezozojskih karbonatnih kameninah Slovenije – vpliv faciesa in diagenese = Isotope composition of O and C in Mesozoic carbonate rocks of Slovenia – effect of facies and diagenesis. *Geologija*, 42 (2000): 171-205, doi:10.5474/geologija.1999.012.
- OGORELEC, B., DROBNE, K., JURKOVŠEK, B., DOLENEC, T. & TOMAN, M. 2001: Paleocene beds of the Liburnia Formation in Čebulovica (Slovenia, NW Adriatic – Dinaric platform). *Geologija*, 44/1: 15-65, doi:10.5474/geologija.2001.002.
- OGORELEC, B., BUSER, S. & MIŠIČ, M. 2006: Manganoi gomolji v jurskem apnencu Južnih Alp Slovenije = Manganese nodules in the Jurassic limestone of Southern Alps in Slovenia. *Geologija*, 49/1: 69-84, doi:10.5474/geologija.2006.005.
- OREHEK, S. & OGORELEC, B. 1979: Sedimentološke značilnosti jurskih in krednih karbonatnih kamnin na Trnovskem gozdu = Sedimentologic features of the Jurassic and Cretaceous carbonate rocks of Trnovski gozd. *Geol. vjesnik*, 32: 185-192.
- OREHEK, S. & OGORELEC, B. 1981: Korelacija mikrofacialnih in geokemičnih značilnosti jurskih in krednih kamnin južne karbonatne platforme Slovenije = Correlation of microfacial and geochemical characteristics of Jurassic and Cretaceous rocks of the southern carbonate platform in Slovenia. *Zav. geol. i geof. istraž. Vestnik*, A, 38/39: 171-185.
- PLACER, L. 2009: Tektonska razčlenitev Slovenije = Tectonic subdivision of Slovenia. In: PLENIČAR, M. et al. (eds.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, 43-60.
- PLENIČAR, M. 1979: Cretaceous beds in Slovenia. In: DROBNE, K. (ed.): *Geological development in Slovenia and Croatia*. Guidebook 16th European Micropaleontological Colloquium Ljubljana, 37-48.
- PLENIČAR, M. 2009: Kreda = Cretaceous. In: PLENIČAR, M. et al. (eds.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, 255-302.
- PLENIČAR, M. & PREMUR, U. 1975: Facialne karakteristike sjeverozapadnih Dinarida. 2. godišnji znanst. skup savjeta za naftu JAZU, 47-54, Zagreb.
- PLENIČAR, M. & PREMUR, U. 1977: Tolmač lista Novo mesto. Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000. Zvez. geol. zav., Beograd: 68 p.
- PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.) 2009: *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 612 p.
- PRAY, L.C. & ESTEBAN, C.M. (eds.) 1977: Upper Guadalupian facies, Permian Reef Complex, Guadalupe mountains, New Mexico and West Texas. 1977 Field Conference. Permian Basic Sec., SEPM, 194 p.
- PUNGARTNIK, M., BRUMEN, S. & OGORELEC, B. 1982: Litolško zaporedje karnijskih plasti v Mežici = Lithologic succession of Carnian beds in Mežica. *Geologija*, 25/2: 237-250.
- RADOIČIĆ, R. 1966: Microfacies du Jurassiques des Dinarides externes de la Yougoslavie. *Geologija*, 9: 5-377.
- RAMOVŠ, A. 1953: O stratigrafskih in tektonskih razmerah v borovniški dolini in njeni okolici. *Geologija*, 1: 90-110.
- RAMOVŠ, A. 1958: Razvoj zgornjega perma v loških in polhograjskih hribih = Die Entwicklung des Oberperms in Bergland von Škofja Loka und Polhov Gradec. *Razprave IV. razr. SAZU*, 4, 451-622.
- RAMOVŠ, A. 1988: Razvoj karnijske stopnje v vzhodnem delu severnih Julijskih Alp. *Geologija*, 30: 67-82.
- RAMOVŠ, A. 1989: Razvoj skitskih plasti (spodnji trias) v severnih Julijskih Alpah = Development of the Scythian (Lower Triassic) in the

- Northern Julian Alps (Slovenia). *Rud. met. zb.*, 36/4: 623-636.
- RAMOVŠ, A. 1990: Razvoj ladinjske stopnje v Severnih Julijskih Alpah. *Geologija*, 31/32 (1988/89): 241-266.
- RAMOVŠ, A. & ANIČIĆ, B. 1995: Untertrias und Unteranis – Ausbildung im Mišnica Tal, östlich von Rimske Toplice, Ostslowenien. *Rud. met. zb.*, 42/3-4: 143-155.
- RAMOVŠ, A. & TURNŠEK, D. 1984: Lower Carnian Reef Buildings in the Northern Julian Alps (Slovenia, NW Yugoslavia). *Razprave IV. razr. SAZU*, 25/4: 161-200.
- RAMOVŠ, A., ANIČIĆ, B. & DOZET, S. 2001: Comparison of Lower Triassic Developments in Eastern Sava Folds and Northern Julian Alps (Slovenia). *RMZ – Mater. Geoenviron.*, 48/3: 415-432.
- RICHTER, D. K. 1983: Calcareous Ooids: A Synopsis. In: PERYT, T.M. (ed.): *Coated Grains*. Springer Verl., 71-99.
- RIDING, R. 1983: Cyanoliths (cyanoids). In: PERYT, T.M. (ed.): *Coated grains*. Springer Verl., 275 - 283 p.
- ROŽIČ, B. 2008: Upper Triassic and Lower Jurassic limestone from Mt Kobla in the northern Tolmin Basin: tectonically repeated or continuous succession? *RMZ Mater. Geoenviron.*, 55/3: 345-362.
- ROŽIČ, B. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 2007: Zgornje-triasni apnenčevi razvoji Slovenskega bazena na Kobli in Slatniku. *Geol. zbornik*, 19: 96-99.
- ROŽIČ, B. & POPIT, T. 2006: Residemented limestones in Middle and Upper Jurassic succession of the Slovenian Basin. *Geologija*, 49/2: 219-234, doi:10.5474/geologija.2006.016.
- 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.
- SANDBERG, P.A. 1975: New interpretation of Great Salt Lake ooids and of ancient nonskeletal carbonate mineralogy. *Sedimentology*, 22: 497-537.
- SAVIĆ, D. & DOZET, S. 1985: Tumač za list Delnice L 33-90. Osnovna geološka karta SFRY 1 : 100 000. *Zvez. geol. zv.*, Beograd: 66 p.
- SCHOLLE, P.A. & KINSMAN, D.J.J. 1974: Aragonite and high-Mg calcite from the Persian Gulf – a modern analog for the Permian of Texas and New Mexico. *J. Sed. Petrol.*, 44: 904-916.
- SIEHL, A. & THEIN, J. 1978: Geochemische Trends in der Minette (Jura, Luxemburg/Lothringen). *Geol. Rundschau*, 67: 1052-1077.
- SKABERNE, D., RAMOVŠ, A. & OGORELEC, B. 2009: Srednji in zgornji perm = Middle and Upper Permian. In: PLENIČAR, M. et al. (eds.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, 137-154.
- STROHMENGER, CH. 1988: Mikrofazielle und diagenetische Entwicklung jurassischer Karbonate (Unter – Lias bis Ober-Malm) von Slowenien (NW Jugoslawien). *Heidelberger Geowiss. Abh.*, 24: 249 p.
- STROHMENGER, CH. & DOZET, S. 1990: Stratigraphy and geochemistry of Jurassic carbonate rocks from Suha Krajina and Mala gora mountain (Southern Slovenia). *Geologija*, 33: 315-351.
- STROHMENGER, CH., DOZET, S. & KOCH, R. 1987a: Diagenesemuster – Stratigraphie: Oolith-Horizonte im Jura von SW Slowenien. *Facies*, 17: 253-266.
- STROHMENGER, CH., DOZET, S. & KOCH, R. 1987b: Oolith-Sequenzen im Jura Südwest-Sloweniens (Mala Gora Gebirge, Ober-Lias bis Ober-Malm). In: KOCH, R. et al. (eds.): *Heidelberger Geowiss.*, 8: 245-248.
- ŠMUC, A. 2005: Jurassic and Cretaceous stratigraphy and sedimentary evolution of the Julian Alps, NW Slovenia. *Založba ZRC, Ljubljana*: 98 p.
- ŠTRUCL, I. 1971: On the Geology of the Eastern part of the Northern Karavankes with Special Regard to the Triassic Lead-Zinc Deposits. In: MÜLLER, G. (ed.): *Sedimentology of parts of Central Europe, Guidebook. VII Sedimentol. Congress, Heidelberg*, 285-301.
- ŠTRUCL, I. 1984: Geološke, geokemične in mineraloške značilnosti rude in prikamenine svinčeve cinkovih orudenj mežiškega rudišča = Geological and geochemical characteristics of ore and host rock of lead-zinc ores of Mežica ore deposit. *Geologija*, 27: 215-327.
- TIŠLJAR, J. & VELIĆ, I. 1993: Upper Jurassic (Malm) shallow-water carbonates in the western Gorski Kotar area; facies and depositional environments (western Croatia). *Geol. vjesn.*, 46/2: 263-272.
- TIŠLJAR, J., VLAHOVIĆ, I., VELIĆ, I. & SOKAČ, B. 2002: Carbonate Platform megafacies of the Jurassic and Cretaceous Deposits of the Karst Dinariides. *Geol. Croat.*, 55/2: 139-170.
- TUCKER, M.E. 1984: Calcitic, aragonitic and mixed calcitic-aragonitic ooids from the mid-Proterozoic Belt Supergroup, Montana. *Sedimentology*, 31: 627-644.
- TURNŠEK, D. 1966: Zgornjejurska hidrozojska fauna iz južne Slovenije = Upper Jurassic Hydrozoa from Southern Slovenia. *Razprave IV. razr. SAZU*, 9: 337-428, Ljubljana.
- TURNŠEK, D. 1969: Prispevek k paleoekologiji jurskih hidrozojev v Sloveniji = A contribution to the palaeoecology of Jurassic Hydrozoa from Slovenia. *Razprave SAZU*, 4. razr., 12/15: 211-235.
- TURNŠEK, D. 1997: Mesozoic corals of Slovenia. *Založba ZRC, zbirka 16, Ljubljana*: 513 p.
- TURNŠEK, D., BUSER, S. & OGORELEC, B. 1981: An Upper Jurassic reef complex from Slovenia, Yugoslavia, *SEPM, Trst, Spec. Publ.*, 3: 361-369.
- TURNŠEK, D., BUSER, S. & DEBELJAK, I. 2003: Liassic coral "patch" reef above the "Lithiotid Limestone" on Trnovski gozd Plateau, West Slovenia. *Razprave IV. razr. SAZU* 44/1: 285-331.

- VELIĆ, I. 2007: Stratigraphy and Palaeobiography of Mesozoic Benthic Foraminifera of the Karst Dinarides (SE Europe). *Geol. Croat.*, 60/1: 1-113.
- VELIĆ, I., VLAHOVIĆ, I. & MATIČEC, D. 2002: Depositional sequences and paleogeography of the Adriatic carbonate platform. *Mem. Soc. Geol. It.*, 57: 141-151.
- VLAJ, B. 1969: Razvoj cordevolskih in spodnekarnijskih plasti v okolici Idrije. Diplomsko delo. NTF, Univ. Ljubljana: 82 p.
- WILSON, R.C. 1966: Silica diagenesis in Upper Jurassic limestones of southern England. *J. Sed. Petrol.*, 36/4: 1036-1049.
- WILSON, J. L. 1975: Carbonate Facies in Geologic History. Springer Verlag., Berlin: 471 p.
- ZORC, A. 1955: Rudarsko geološke karakteristike rudnika Mežica. *Geologija*, 3: 24-80.

Transboundary geothermal resources of the Mura-Zala basin: a need for joint thermal aquifer management of Slovenia and Hungary

Čezmejni geotermalni viri Mursko-Zalskega bazena: potreba po skupnem upravljanju geotermalnih vodonosnikov Slovenije in Madžarske

Annamária NÁDOR¹, Andrej LAPANJE², György TÓTH¹, Nina RMAN², Teodóra SZŐCS¹, Joerg PRESTOR²,
András UHRIN¹, Dušan RAJVER², László FODOR¹, Judit MURÁTI¹ & Edgár SZÉKELY³

¹Geological and Geophysical Institute of Hungary, 1143 Budapest, Stefánia 14; e-mail: nador.annamaria@mfgi.hu

²Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana; e-mail: andrej.lapanje@geo-zs.si

³Nyugat-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság, 9700 Szombathely, Vörösmarty u. 2;
e-mail: szekely.edgar@nyuduvizig.hu

Prejeto / Received 26. 9. 2012; Sprejeto / Accepted 1. 10. 2012

Key words: geothermal energy, thermal water, transboundary aquifer, flow model, Pannonian basin

Ključne besede: geotermalna energija, termalna voda, čezmejni vodonosnik, tokovni model, Panonski bazen

Abstract

Large transboundary Upper Miocene geothermal sandy aquifers which are widely utilized by both countries for balneological and direct heat purposes exist in the Slovenian-Hungarian border region. In NE Slovenia the total direct heat use was 382 TJ in 2010, while in SW Hungary it was 648 TJ, including utilization from basement reservoirs. The total installed capacity of the 13 Slovenian users was 38.8 MW_e, while that of the 29 Hungarian users was 70.6 MW_e. Utilisation takes place without harmonized management strategies which might endanger the long-term sustainability of these systems. We aimed to overcome this by delineating a transboundary thermal groundwater body (TTGWB) Mura-Zala with an aerial extent of 4,974 km² and with vertical extent between depths 500–2,200 m, which was done based on detailed geological, hydrological, geochemical and geothermal models as well as numerical modelling. The regional groundwater flow in the Mura-Zala TTGWB is from west to east in general, the modeled cross-border flow is approximately 50 l/s. At present, thermal water abstraction rates from the Mura/Újfalu Fm. (61.8 l/s in the Slovenian and 67.3 l/s in the Hungarian part of the TTGWB) does not endanger the good regional quantity status of the water body, and this should be maintained by allowing a maximum increase of thermal water abstraction 3.5 times higher than today. However, to achieve target numbers for an increased proportion of geothermal energy in the total energy mix in both countries, we suggest that increase of thermal efficiency and re-injection should be prioritized apart from the higher thermal water abstraction with setting up limit of the maximum allowable drawdown.

Izvleček

Na mejnem območju med Slovenijo in Madžarsko so razprostranjeni obsežni, prekomejni zgornjemiocenski geotermalni peščeni vodonosniki, ki se v obeh državah uporabljajo predvsem v balneološke namene in za direktno rabo toplote. V severovzhodni Sloveniji je skupna direktna raba toplote v letu 2010 dosegla 382 TJ, v jugovzhodnem delu Madžarske pa 648 TJ, vključno z rabo vodonosnikov v podlagi neogenskih kamnin. Celotna inštalirana kapaciteta 13 slovenskih uporabnikov je znašala 38,8 MW_e, medtem ko je inštalirana kapaciteta pri 29 madžarskih uporabnikih dosegla 70,6 MW_e. Uporaba poteka brez usklajene strategije upravljanja, kar lahko ogrozi dolgoročno vzdržnost teh sistemov. To smo želeli preseči z opredelitvijo prekomejnega Mursko-Zalskega telesa termalne podzemne vode (VTPodV Mura-Zala) s površino 4.974 km² in vertikalnim razponom globine 500–2200 m, določenega na podlagi podrobnih geoloških, hidrogeoloških, geokemičnih in geotermalnih modelov, kot tudi numeričnega modela podzemne vode. Tok podzemne vode v VTPodV Mura-Zala je usmerjen pretežno v smeri zahod-vzhod, pri čemer je prekomejni tok ocenjen na približno 50 l/s. Pri trenutni količini odvzema termalne vode (~ 61,8 l/s iz slovenskega ter ~ 67,3 l/s iz madžarskega dela VTPodV Mura-Zala) količinsko stanje telesa ni ogroženo, a njegovo dobro stanje je potrebno ohranjati z omejitvijo maksimalnega povečanja odvzema termalne vode na 3,5-kratnik današnjega odvzema. Da bi dosegli ciljne vrednosti povečanja deleža geotermalne energije v skupni energetski bilanci v obeh državah, namesto povečanega odvzema termalne vode priporočamo povečanje toplotne učinkovitosti, določitev največjega dovoljenega znižanja tlaka v vodonosniku in vzpostavitev vračanja toplotno izrabljene termalne vode nazaj v vodonosnik.

Introduction

Growing energy demand, restricted reserves of fossil fuels and efforts to reduce greenhouse gases emissions, thus contributing to the mitigation of climate change effects made clear that within 20–30 years a significantly growing proportion of energy has to come from renewables. The integrated climate and energy policy of the EU [COM (2006)848] aims to reduce energy consumption and greenhouse gases emissions by 20 % and increase the proportion of renewables by 20 % by 2020. This ambitious goal is manifested in the 2009/28/EC Directive on the promotion of the use of energy from renewable sources, on the basis of which each country prepared its national renewable energy action plan where they defined the target numbers. In these strategies both Slovenia (URBANČIČ et al., 2011) and Hungary (NEMZETI FEJLESZTÉSI MINISZTERIUM, 2010) aim at 3–3.5 times increase of geothermal heat production from 2010 to 2020 (in Slovenia from 1.11 to 3.42 PJ, in Hungary from 4.23 to 14.95 PJ), which is mostly based on the promising geothermal potential of the Pannonian basin.

Geothermal energy has been widely utilized for more than hundred years in the Pannonian basin by the abstraction of deep circulating thermal groundwater that extracts and transports heat from hot permeable rock volumes in the depth. This classical hydrogeothermal system is governed by convection in zones with higher permeability or faults, and by conduction in less permeable deposits (TÓTH & ALMÁSI, 2001; TÓTH, 2009). Although this large flow system forms one interconnected entity in geological-hydrogeological terms, it is cross-cut by state-borders, and its various parts are shared by neighboring countries in Central Europe. When adjacent countries exploit the same geothermal resource (thermal groundwater aquifer), fluid extraction at a national level without cross-border harmonized management strategies may cause negative impacts (depletion or overexploitation), leading to economic and political tensions between countries. The ICPDR (www.icpdr.org) manages mostly transboundary surface water resources in the Danube River Basin, however a successful management example of thermal karst between Lower Bavaria and Upper Austria (VOLLHOFFER & SAMEK, 2010) is now also among their assignments.

Interpretation of the geological structure of the Mura-Zala sedimentary basin, situated at the Slovenian-Hungarian border region and positioned in the southwestern part of the Pannonian basin (Fig. 1) (SACHSENHOFER et al., 2001; TOMLJENOVIC & CSONTOS, 2001; FODOR et al., 2002; SAFTIĆ et al., 2003; FODOR et al., 2005) implied the existence of transboundary geothermal aquifers but only little bilateral scientific cooperation was established before 2009. Due to rather poor monitoring network and scarcity of comparable datasets in NE Slovenia (RMAN et al., 2011b) not much overexploitation effects have been observed, therefore no transboundary conflicts of

these widely utilized geothermal aquifers have yet emerged. However, to avoid potential conflicts among users in the two countries as well as between different utilization aspects (e.g. balneology and/or direct heat purposes) in future, a harmonized management strategy of identified transboundary geothermal resources is required to ensure their sustainable utilization. Integrated study of potential regional and transboundary geothermal aquifers were the focus of the T-JAM project (Thermal Joint Aquifer Management: Screening of geothermal utilization, evaluation of thermal groundwater bodies and preparation of joint aquifer management plan in the Mura-Zala basin) running between years 2009 and 2011 in the frame of the Slovenia-Hungary Operative Program 2007–2013. A complex geological, hydrogeological, hydrogeochemical and geothermal assessment of the potential geothermal resources in regions of Pomurje and Podravje in NE Slovenia and in Vas and Zala counties in SW Hungary enabled identification and delineation of a transboundary thermal groundwater body Mura-Zala, for which a harmonized management strategy was elaborated. In addition, utilization aspects of the existing geothermal resources were inspected forecasting a rapid increase in thermal water demand (RMAN et al., 2011b; RMAN et al., 2012), taking also into consideration environmental objectives. As the transboundary groundwater bodies between Slovenia and Hungary are not officially delineated yet (RMAN et al., 2011b) there is no common resource management in practice. However the results of this study already provided a firm scientific basis for a discussion on transboundary groundwater resources at the Slovenian-Hungarian Water Management Commission in 2011.

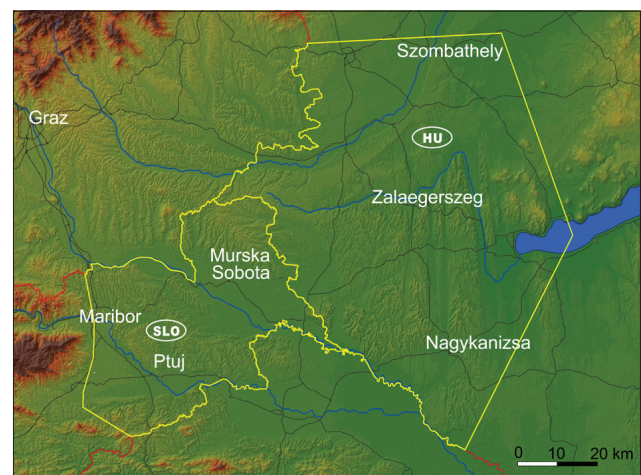


Fig. 1. T-JAM project area

Settings of the investigated Mura-Zala sedimentary basin

The geothermal potential of the Pannonian basin is outstanding in Europe, as it lies on a characteristic positive geothermal anomaly, with heat flow density ranging from 50 to 130 mW/m²

with a mean value of 100 mW/m^2 and geothermal gradient of about $45 \text{ }^\circ\text{C/km}$ (DÖVÉNYI & HORVÁTH, 1988; HURTIG, 1992; LENKEY et al., 2002; RAJVER & RAVNIK, 2002). This increased heat flux is related to the Early-Middle Miocene back-arc style extension of the Pannonian Basin following the ongoing subduction along the Carpathians, when the lithosphere thinned and the hot asthenosphere got closer to the surface (HORVÁTH & ROYDEN, 1981). After the closure of marine connections in the area via deep troughs with elevated ridges in the basement (about 12 Ma ago), the continuing post-rift subsidence provided the possibility for the formation of a huge lake (Lake Pannon), which extended and deepened until ca. 9.8 Ma before present (MAGYAR et al., 1999).

During the Lower Miocene the lake basin started to be infilled rapidly from north-west and north-east by huge deltaic systems of rivers, originating in the surrounding Alpine and Carpathian mountain belts (BÉRCZI & PHILLIPS, 1985; JUHÁSZ, 1994; JELEN et al. 2006), being composed mainly of clays, clayey marls, calcareous sandstones and limestones which crop out on the surface in Slovenia. The prograding delta systems of Lake Pannon reached the area of the Mura-Zala basin about 8–9 Ma ago from the north, with a gradually extending sedimentary shelf behind them (JELEN et al. 2006; UHRIN et al., 2009). The deposited Late Miocene-Pliocene sedimentary succession is up to 2500–3000 m in thickness. A large portion of the coarse sediment reached the basin floor due to turbidity currents forming on the slopes. The slope sediments, built up by silt and argillaceous marl were overlain by the deposits of the shelf, commonly beginning with thick sand-bodies of delta fronts. As the shelf margin prograded basinwards, a delta plain, then an alluvial plain evolved. In the latter two environments, meandering channels built up sandy point bars, while fine-grained sedimentation took place in the inter-channel areas (Fig. 2).

Within this several thousand meters thick sedimentary succession, fluid reservoirs are linked

mainly to turbiditic sand bodies; however, their potential is limited by their low connectivity as each of them deposited by a single turbidity current. Much better connectivity can be expected among those large sand bodies which once deposited in the front of the prograding delta-systems (Fig. 2). These 50–300 m thick sand-prone units, composed of individual delta lobes of 10–20 m in thickness, divided by pelitic layers, have an areal extent of 200–2,000 km^2 and are found in a depth interval of about 700–1,400 m in the interior parts of the Pannonian basin, where the temperature ranges from 50 to $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (ŽLEBNÍK, 1978; DÖVÉNYI & HORVÁTH, 1988; KRALJ & KRALJ, 2000a) and are considered as the main thermal-water bearing aquifers.

In addition to these porous reservoirs, the karstified zones of the Palaeozoic-Mesozoic carbonates in the basement, as well as fractured zones along main regional tectonic faults in the crystalline rocks are also good thermal water reservoirs. At this depth (on average 2,000 m or more) temperature can exceed $100 \text{ }^\circ\text{C}$, reaching $120\text{--}140 \text{ }^\circ\text{C}$ in some areas (DÖVÉNYI & HORVÁTH, 1988). The Pre-Tertiary basement of the Mura-Zala basin at the southwestern part of the Pannonian basin is built up of Palaeozoic low-grade metamorphic crystalline rocks and non-metamorphic Permo-Mesozoic carbonates belonging to various Alpine nappe systems and the Transdanubian structural unit, and is bounded by the Rába Line in the north and the Periadriatic Line in the south (TARI, 1994; FODOR et al., 2003; HAAS et al., 2010).

Hydrogeologically speaking, shallow (local), intermediate and regional flow systems are expected to be developed in this sedimentary basin (KRALJ, 2001; TÓTH and ALMÁSI, 2001; JOCHÁNE EDELENYI et al., 2005; LAPANJE, 2007; CSERNY et al., 2009; TÓTH, 2009). The first occurs in Quaternary and Plio-Quaternary intergranular aquifers, with groundwater flow following the surface water net. Deeper, intermediate systems encompass the Pliocene multi-level sandy and gravely intergranular aquifers and provide the majority of drinking

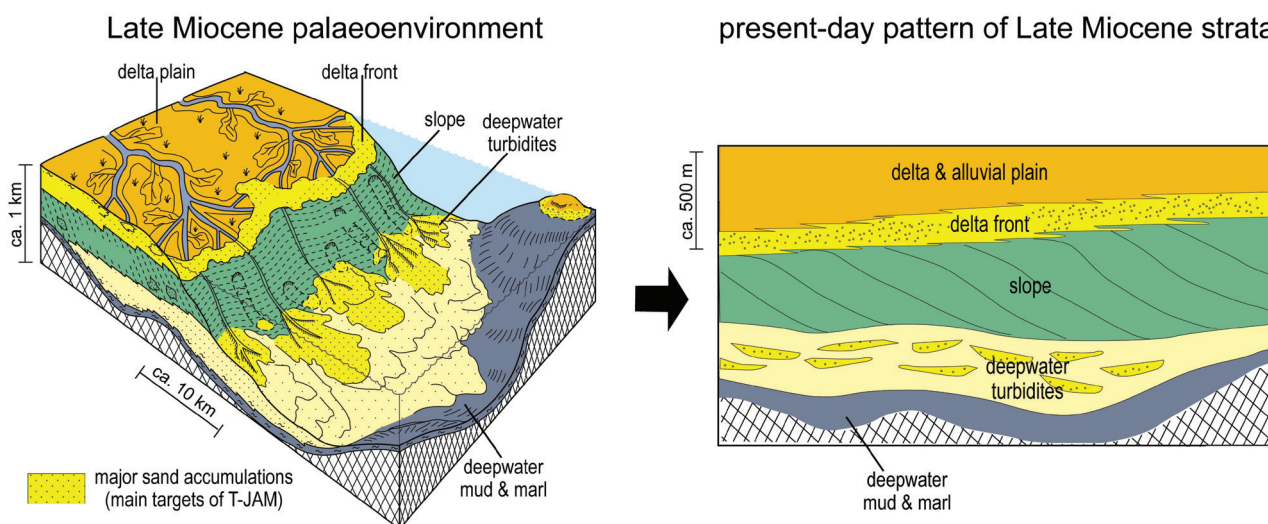


Fig. 2. Depositional model of the Upper Miocene delta systems filling up Lake Pannon (after JUHÁSZ, 1994). Most productive thermal water reservoirs are extensive sand bodies of the Mura/Újfalú Fm. which were once deposited on the prograding delta-fronts and were in focus of the T-JAM project.

water in the area as well as the recharge to porous and karstified/fractured basement aquifers. The deepest, regional flow system penetrates till delta-front and delta-plain sands of the Upper Pannonian age. Thermal waters with temperatures (usually much) above 20 °C discharge from this unit. Its main recharge zones are at the hilly parts of the western basin margin, in Slovenia, Austria and Hungary, while discharge is identified in the Croatian and Hungarian part of the Drava valley and partly at the Hévíz Lake, where mixing of thermal water from porous and karst systems occurs.

Geochemical investigations were done in the central and eastern Hungarian part of the Pannonian Basin (DEÁK et al., 1987; VARSÁNYI et al., 1997, 1999, 2011; VARSÁNYI & KOVÁCS, 2009) as well as in its Slovenian part (KRALJ & KRALJ, 2000a, 2000b; KRALJ, 2001; KRALJ et al., 2009; LAPANJE, 2006, 2007; PEZDIČ, 1991, 1999, 2003). However, no cross-border hydrogeochemical studies of the Mura-Zala basin aquifers were known before our research.

Methodology

To understand the hydrogeothermal system of the cross-border region of north-eastern Slovenia and south-western Hungary, geological, hydrogeological and geothermal data were collected first and based on expert consultations, a framework of common understanding was established. Based on the harmonization of nomen-

clature of various geological formations (Fig. 3) the lithostratigraphy of the studied boreholes was re-evaluated. The most important hydrogeological parameters (porosity, transmissivity and hydraulic conductivity) (RMAN et al., 2011c) and geothermal parameters (temperature and temperature gradient, thermal conductivity of rocks with different lithology and calculated heat-flow density) (TÓTH et al., 2011a) were also collected from the archives and published literature. They were re-evaluated and interpreted according to the new lithostratigraphical classification. As a result harmonized datasets from 792 Hungarian and 404 Slovenian boreholes were integrated into a joint database (MS Office Access) containing more than 42,000 inputs of which 12,904 are available to public through interactive ArcGIS web-map at http://akvamarin.geo-zs.si/t-jam_bo reholes (RMAN et al., 2011a).

Based on the harmonized lithostratigraphical classifications of borehole-logs and seismic profiles the spatial distribution of the most important hydrostratigraphic units (rock bodies with similar hydrogeological properties) were determined at a scale 1: 100,000, which was the major output of the geological model (FODOR et al., 2011) and later served as basic inputs for the numerical hydrogeological model.

Hydrogeochemical data from newly sampled thermal and cold waters (12 Hungarian and 12 Slovenian wells) include basic chemistry, trace elements, δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, ^{14}C , organic compounds, plus noble, free and dissolved gases and provided

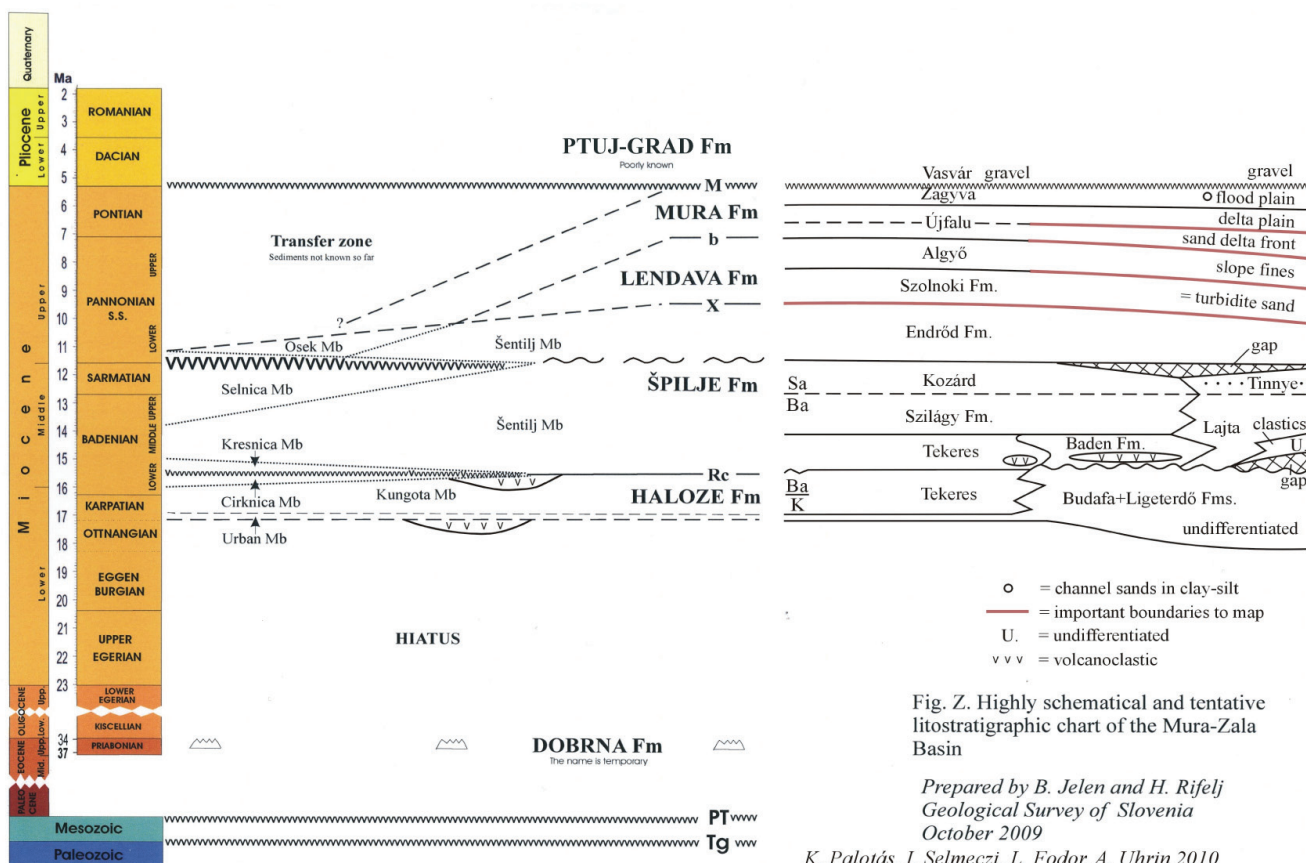


Fig. 3. Correlation of the Neogene formations

important tools for evaluation of cross-border flow, detection of stagnant aquifers and, additionally, for numerical model calibration (RMAN et al., 2011d; Szöcs et al. 2012).

The steady-state numerical hydrogeological modeling was performed in Visual MODFLOW. The rectangular model-area was 143×122 km, with grid size of 500×500 m and a vertical extension of 2 km. Only geothermal aquifers with presumably active groundwater flow were modeled, ranging from Upper Miocene to Quaternary sedimentary succession. In the steady-state numerical flow model (TÓTH et al., 2011b) the investigated Upper Miocene, Pliocene and Quaternary sediments, hosting regional, intermediate and shallow groundwater flow systems were divided into 6 model layers. The 6th (deepest) model layer corresponded to the Upper Miocene Mura/Újfalu Fm. delta front sequence (base of the regional thermal flow system), while the 1st model layer was analogous to the shallow unconfined "water-table aquifer". In between them, the Upper Miocene-Pliocene delta plain and alluvial sediments (upper part of the Mura Fm., Ptuj-Grad Fm. in Slovenia and Zagyva, Somló-Tihany Fms. in Hungary) were separated into four model layers. The numerical model made it possible to quantify the hydraulic potentials and therefore to outline groundwater flow direction. Incorporating cold and thermal water annual production data, drawdowns in different aquifers were estimated and also different scenarios were investigated showing depressions caused by production of cold and thermal water separately and together, applying abstraction in each country separately and in both of them simultaneously. The zone budgets were also calculated.

To understand the geothermal conditions, temperature distribution maps were edited for 500, 1,000, 2,000 and 4,000 m below the ground surface from various types of temperature measurements from 154 boreholes on the Slovenian and 284 boreholes on the Hungarian side of the project area. From temperature data the nearest measured temperature to the given surface was selected, and extrapolation was made by the help of the computed gradient along the same vertical profile (TÓTH et al., 2011a).

The evaluation of direct geothermal energy utilization till the first half of 2010 was based on the questionnaire of the International Geothermal Association used for world-wide country assessments performed every five years, which was sent to all direct heat users of geothermal energy in the T-JAM project area (LAPANJE et al., 2011).

Based on the integrated interpretation of all above investigations, recommendations have been phrased for a harmonized management system and sustainable utilization of joint geothermal resources in the Mura-Zala basin (PRESTOR et al., 2011).

Results and discussion

Geological delineation of transboundary formations in the Mura-Zala basin

The geological model was focusing on the edition of boundary horizons of those hydrostratigraphic units that are important for the regional thermal groundwater flow systems. These are the maps showing morphology and geology of the pre-Cenozoic basement, the depth contour map for the base of the Pannonian, bottom and top contour maps of the Pannonian turbiditic Lendava/Szolnok Fm., and the delta front Mura/Újfalu Fm. (Fig. 4), as well as the morphology and geology of the base of the Quaternary sediments. Moreover a surface geological map with an extensive harmonized legend was also edited. All these maps have been edited uniformly for the entire project area, and as such, they show first the results of joint understanding of geology and distribution of certain geological formations on both sides of the state border in the Mura-Zala basin.

For a better understanding of the geological structures nine cross-sections, 3 along the longer axis in SW-NE direction of the Mura-Zala basin and 6 perpendicular were elaborated and described in details (Fig. 5) (FODOR et al., 2011).

Geothermal conditions in the Mura-Zala basin

Earlier studies (DÖVÉNYI et al. 1983, RAVNIK 1991, LENKEY et al. 2002, RAJVER and RAVNIK 2002) already proved and described an elevated surface heat flow density (HFD) of the area, which has a value of 60-70 mW/m² at Ptuj in the southwest and increases towards the Slovenian-Hungarian border. Elevated HFD of above 120 mW/m² characterizes the Murska Sobota high from Lenart to Moravske Toplice and the Pečarovci-Dankovci area, which may be explained by the convection zones in the relatively shallow lying Pre-Neogene basement, as it is proved in Benedikt and is possible beneath Murska Sobota and Moravske Toplice. Smaller anomaly, of above 110 mW/m², is located in Lendava. The Hungarian part is characterized by a wider range of surface HFD. The lowest values occur in the southwestern part of the Transdanubian Range (Keszthely Mountains), where the Mesozoic basement carbonates crop out and infiltrating cold karstic waters cool down the environment. Values show a gradual increase towards the southwest and may reach 90-100 mW/m² close to the border.

The previously published HFD pattern is conform to the subsurface temperature distribution, which is shown in 4 newly edited maps. At a depth of 1,000 m (Fig. 6) temperatures over 50 °C are expected east of Maribor-Ptuj. The highest anomaly exists in the area from Lenart via Benedikt to Moravske Toplice with values over 65 °C that is so far confirmed with temperature measurements in the boreholes in Benedikt, Murska Sobota and Moravske Toplice. The anomaly in Benedikt, Murska Sobota and Moravske Toplice

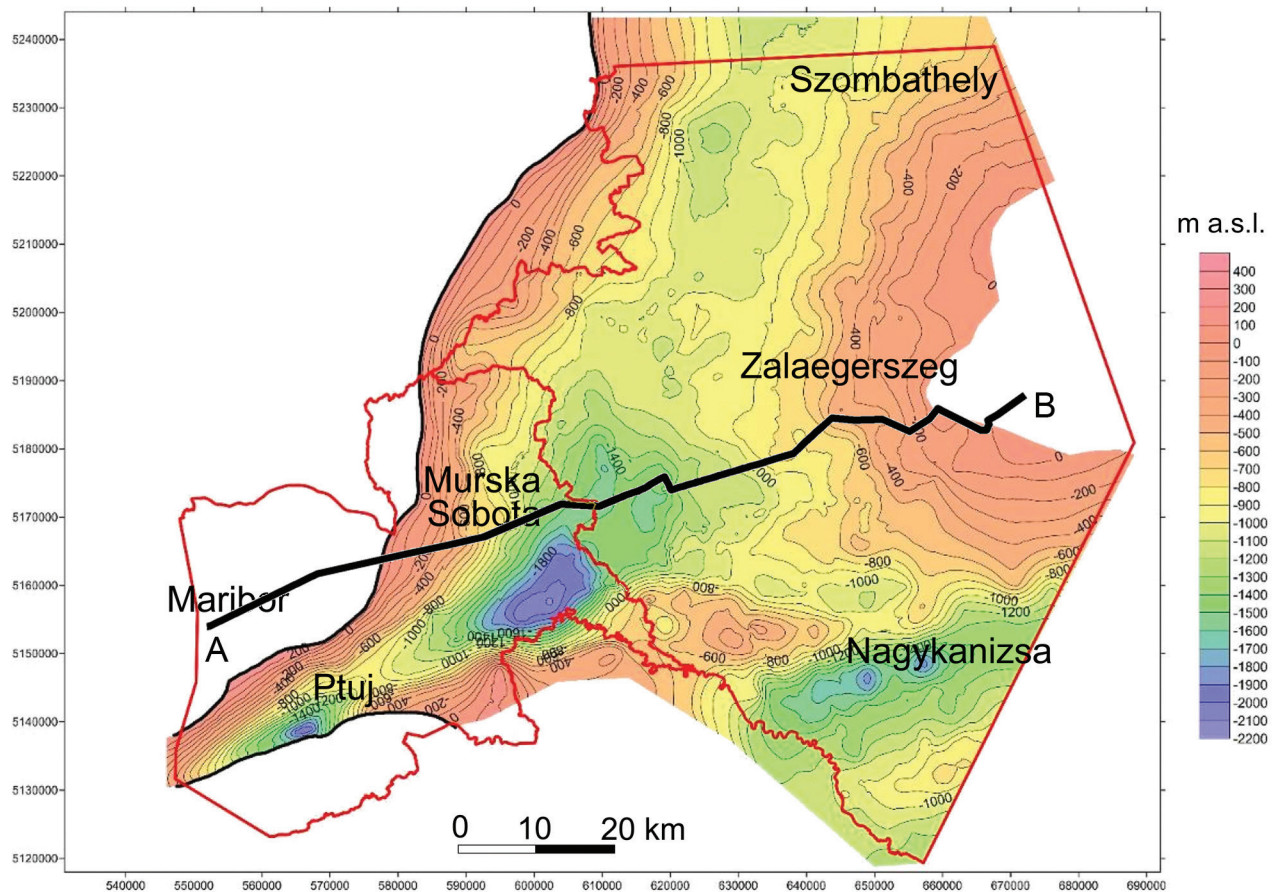


Fig. 4. Depth of the base of delta front sediments (base of the Mura/Újfalu Fm.) in meters a.s.l.

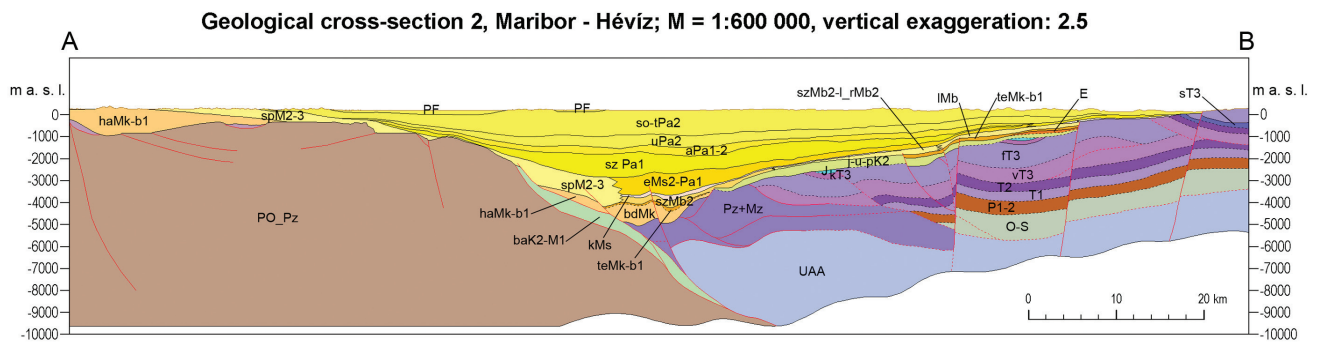


Fig. 5. A simplified cross-section through the basement and Neogene sedimentary deposits

Explanation of labels:

PF: Pliocene gravel, sand, silt (Ptuj-Grad Fm.); **so-tPa2:** Upper Miocene sandstone, siltstone, mudstone, coal (Mura/Újfalu Fm.); **uPa2:** Upper Miocene sandstone, siltstone, mudstone (Mura/Újfalu Fm.); **aPa1-2:** Upper Miocene argillaceous marl (Lendava/Algyó Fm.); **sz Pa1:** Upper Miocene sandstone, siltstone, marl (Lendava/Szolnok Fm.); **eMs2-Pa1:** Upper Miocene marl (Endrőd Fm.); **kMs:** Middle Miocene marl, silt, sandstone (Kozárd Fm.); **spM2-3:** Middle Miocene marl, silt, sandstone (Špilje Fm.); **szMb2:** Middle Miocene marl, argillaceous marl (Szilágy Fm.); **szMb2-1_rMb2:** Middle Miocene marl, argillaceous marl, limestone (Szilágy, Lajta Fm.); **IMb:** Middle Miocene limestone (Lajta Fm.); **teMk-b1:** lower Middle Miocene sandstone, silt (Tekeres Fm.); **haMk-b1:** lower Middle Miocene sandstone, silt (Haloze Fm.); **bdMk:** lower Middle Miocene gravel, sand, conglomerate, sandstone, marl, silt (Budafa Fm.); **E:** Eocene limestone, marl; **baK2-M1:** Upper Cretaceous-Lower Miocene mica schist, gneiss, milonite (Baján Fm.); **j-u-pK2:** Upper Cretaceous limestone, marl (Jáko, Ugod, Polány Fm.); **J:** Jurassic limestone, marlstone; **kt3:** Rhaetian limestone (Kössen Fm.); **ft3:** Upper Carnian-Norian main dolomite; **sT3:** Carnian limestone (Sándorhegy Fm.); **vt3:** Carnian marl (Veszprém Fm.); **T2:** Middle Triassic limestone, dolomite, siliciclastic rocks; **T1:** Lower Triassic sandstone, siltstone, dolomite, limestone; **Pz+Mz:** Paleozoic-Mesozoic clastic and carbonate (meta-)sedimentary and volcanoclastic rocks; **P1-2:** Permian sandstone, siltstone, conglomerate, dolomite; **O-S:** Ordovician-Silurian argillaceous schist, porphyry (Lovas, Alsóörs Fm.); **PO_Pz:** Paleozoic mica schist, gneiss, amphibolite, marble (Pohorje Fm.); **UAA:** Proterozoic-Lower Paleozoic gneiss, mica schist, amphibolite, marble

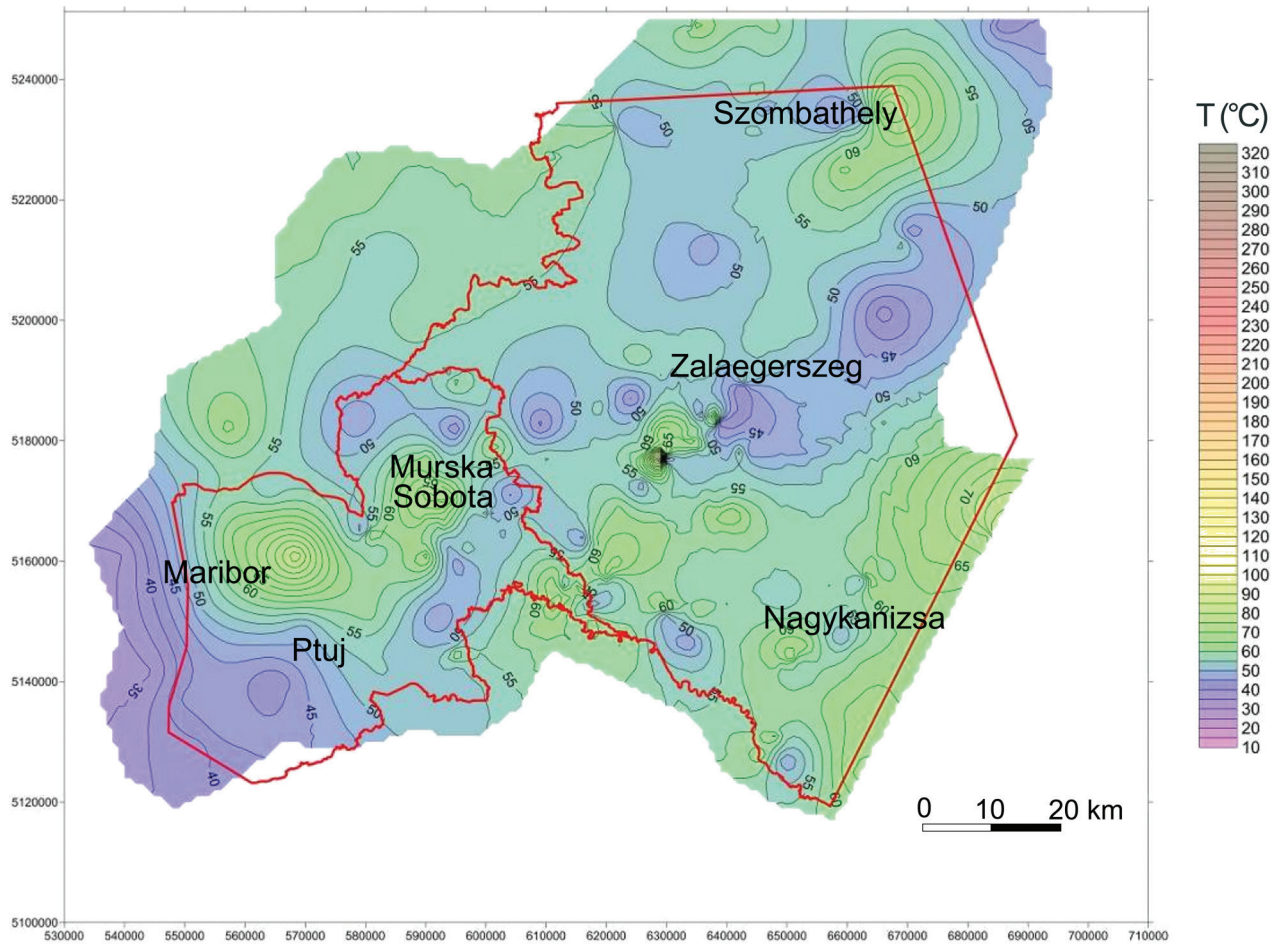


Fig. 6. Temperature distribution at a depth of 1000 m below the surface.

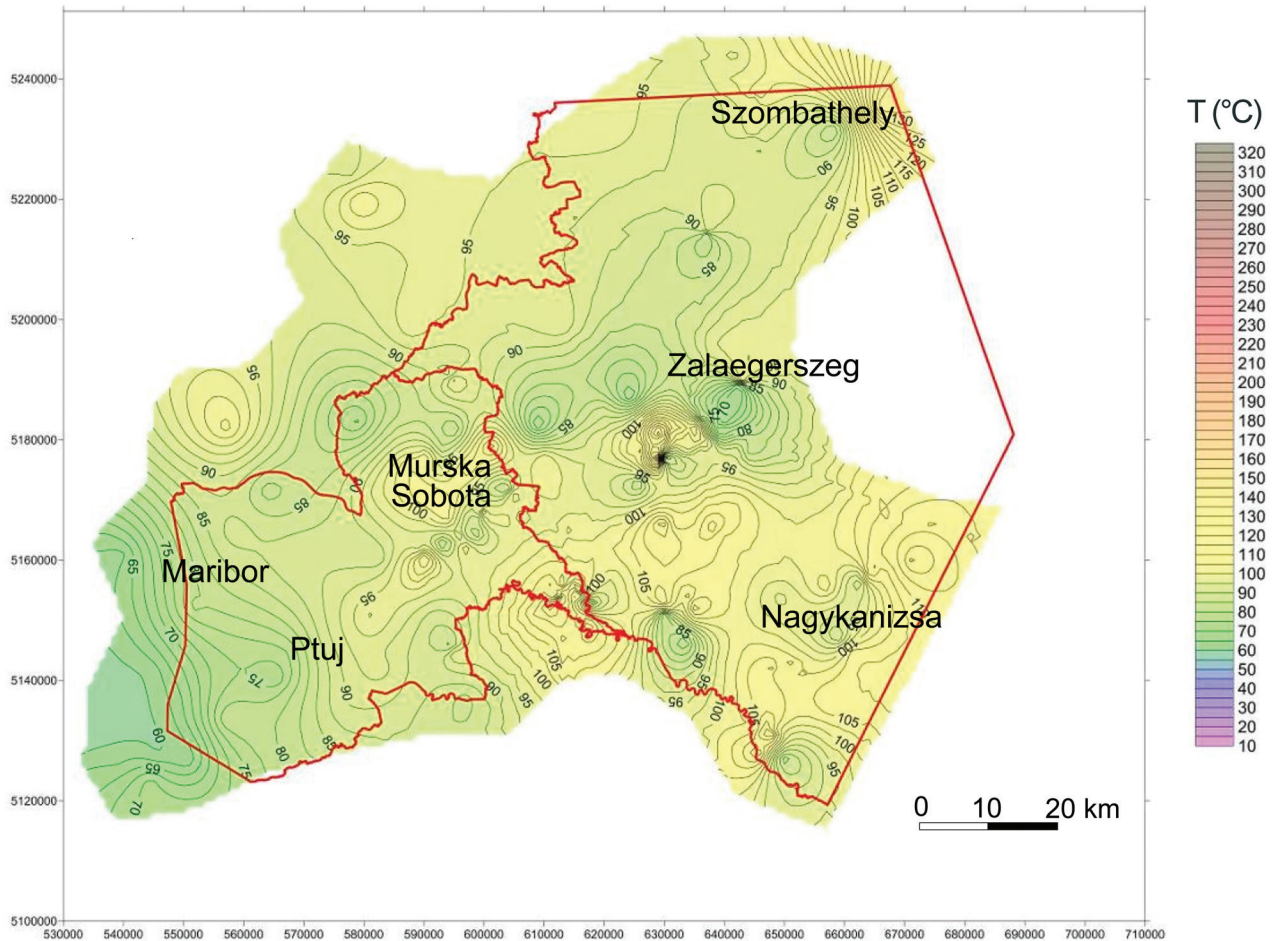


Fig. 7. Temperature distribution at a depth of 2,000 m below the surface.

is most probably due to some deep fracturing in the metamorphic rocks in the basement which enables heat to be transferred by convection from depths towards the Neogene layers. In the Hungarian part, the positive anomalies around Pusztaszentlászló (over 65 °C) are also linked to the basement high. The negative anomalies (below 45 °C) in the western, northern and north-eastern direction can be explained by downward ground-water movement in the deeper karst systems below 1,800 meters.

At a depth of 2,000 m below the surface (Fig. 7) temperatures are higher than 80 °C almost everywhere east of the line Maribor-Ptuj in Slovenia. Over 100 °C may be expected in Murska Sobota and further to the northeast towards the Slovenian-Hungarian border, in Veržej and Lendava. Lower temperatures are found in the Ljutomer-Ptuj depression compared to its surroundings. In Hungary, the positive temperature anomalies (>100 °C) in Nagylengyel-West and Zalaegerszeg-North are the consequences of the upwelling branch of the regional convection in the thermal karst. Similarly, the negative anomalies (< 75 °C) in Zalalövő, and between Nagylengyel and Zalaegerszeg indicate the downward water movement of the convective currents.

Geothermal energy utilization in 2010 in the Mura-Zala basin

The use of geothermal resources from all geothermal aquifers in the Mura-Zala basin, the basement rocks and sedimentary aquifers, was surveyed based on data available till the first half of 2010. In Slovenia, there were 13 direct heat users at 11 locations, and in Hungary 29 users at 20 locations (Table 1) (LAPANJE et al., 2011). On the Slovenian side, the 13 users used geothermal energy for individual space heating (Moravske Toplice, Murska Sobota, Lendava, Banovci, Ptuj), district heating (Murska Sobota, Lendava, Benedikt), cooling (Moravske Toplice), greenhouse heating (Tešanovci, Dobrovnik) and bathing and

swimming (Moravske Toplice, Murska Sobota, Lendava, Mala Nedelja, Banovci, Radenci, Ptuj, Maribor). In Hungary, the overwhelming majority of thermal water utilization systems is developed for bathing and swimming (Zalaszentgrót, Letenye, Hévíz, Alsópáhok, Zalakaros, Bázakerettye, Lenti, Galambok, Nagykanizsa, Kesidakustány, Gelse, Zalaegerszeg, Pusztaszentlászló, Vasvár, Mesteri, Szentgotthárd, Borgáta, Celldömölk, Sárvár, Szombathely), district heating exists only at Vasvár.

In north-eastern Slovenia, the total direct heat use was 382 TJ in 2010 while in south-western Hungary it was 648 TJ. The total installed capacity of the 13 Slovenian users was 38.8 MW_t, while that of the 29 Hungarian users was 70.6 MW_t in 2010 (Table 1). The average flow rate is about 40–50% of the maximum on the Slovenian as well as on the Hungarian side, which shows that wells do not operate efficiently, or the maxima are overrated. The thermal capacity factor is about 0.3 in both countries.

In Slovenia, the maximum wellhead temperatures in Neogene clastic reservoirs were reached in Terme 3000 in Moravske Toplice (72 °C), in Terme Banovci (68 °C) and in Lendava (66 °C). In Benedikt, the wellhead temperature was also 72 °C, with water discharging from the fractured metamorphic basement rocks. In Hungary, the wellhead temperatures were higher in wells discharging from the Mesozoic basement reservoirs (106 °C in Zalakaros and 98 °C in Zalaegerszeg), but the Mura/Újfalu reservoir close to the Slovenian border also showed high values (70 °C in Lenti).

Hydrogeochemical evidence on transboundary groundwater flow in the Mura-Zala basin

Although thermal groundwater is abstracted at few locations from the karstified-fractured Upper Triassic dolomites and limestones (e.g. Alsópáhok, Borgáta, Mesteri, Vasvár), Triassic-Cretaceous karstified limestones (Zalakaros, Zalaszentgrót) or from fractured Palaeozoic rocks (Benedikt) in

Table 1. Direct heat utilization of geothermal energy in the T-JAM project area in 2010 (NE-Slovenia and SW-Hungary).

Use	Unit		Individual space heating	District heating	Air conditioning (cooling)	Greenhouse heating	Bathing & swimming (incl. balneology)	Total
Flow rate at maximum utilization	(l/s)	SLOVENIA	81.0	32.2	1.0	57.8	122.6	294.6
Installed capacity	(MW _t)		11.86	3.29	0.13	7.06	16.49	38.83
Average flow rate	(l/s)		38.0	20.0	0.5	11.0	54.3	123.8
Annual energy use	(TJ/yr)		133.91	43.98	2.04	25.59	176.52	382.04
Capacity factor			0.36	0.42	0.50	0.11	0.34	0.31
Flow rate at maximum utilization	(l/s)	HUNGARY		10.0			985.9	995.9
Installed capacity	(MW _t)			1.76			68.84	70.60
Average flow rate	(l/s)			2.3			501.2	503.4
Annual energy use	(TJ/yr)			12.46			635.51	647.97
Capacity factor				0.22			0.29	0.29

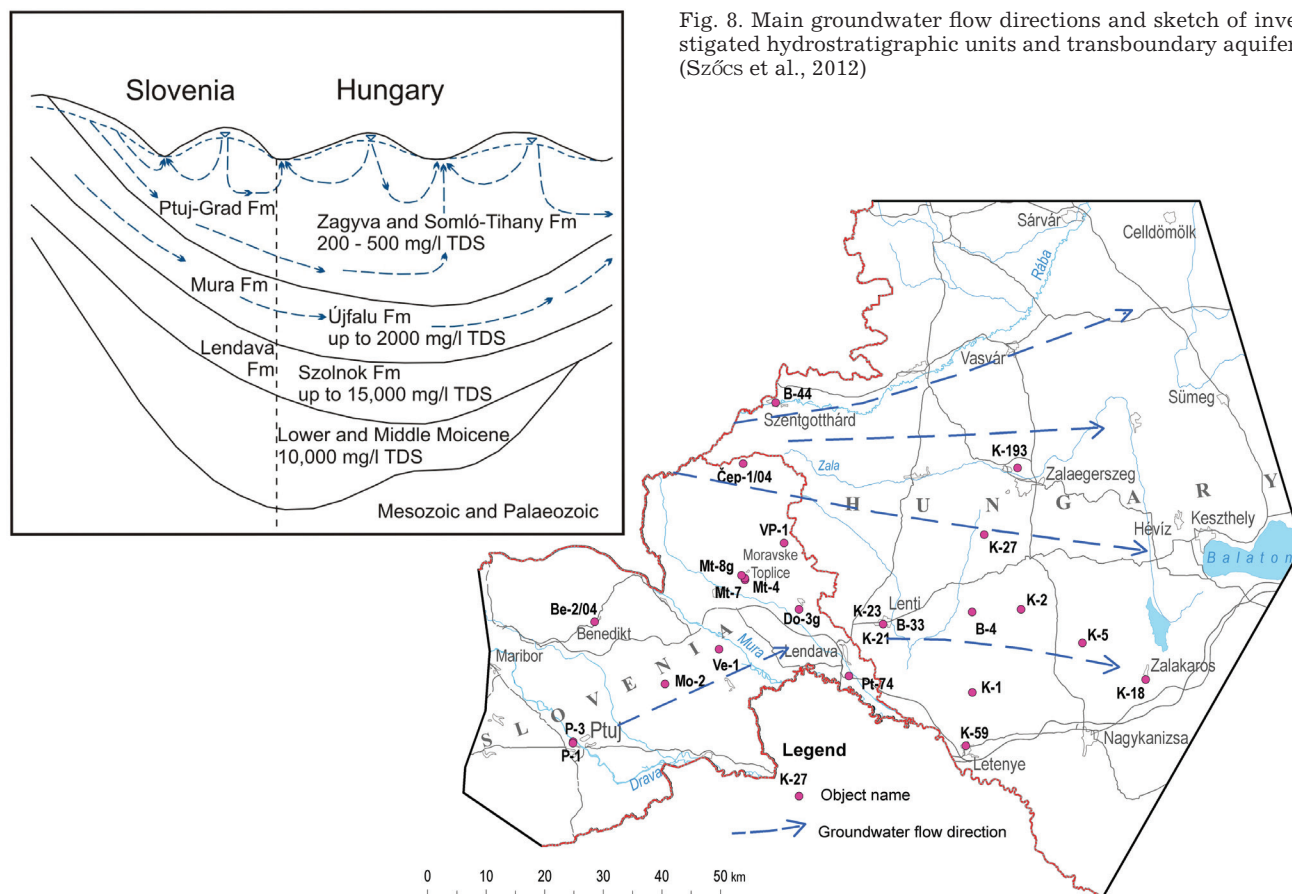


Fig. 8. Main groundwater flow directions and sketch of investigated hydrostratigraphic units and transboundary aquifers (Szócs et al., 2012)

the basement, the best and most widely exploited geothermal reservoirs in the Mura-Zala basin are the Upper Miocene delta-front sands and sandstones, which correspond to the Újfalú formation in Hungary and lower part of the Mura formation in Slovenia. A detailed hydrogeochemical survey (RMAN et al., 2011d; Szócs et al., 2012) contributed to the characterization of different transboundary aquifers (Fig. 8).

The uppermost (shallow) groundwater flow system is developed in unconfined Quaternary aquifers. The underlying Pliocene delta- and alluvial plain aquifers (Ptuj-Grad Fm. in Slovenia, Zagyva and Somló-Tihany Fms. in Hungary) are a part of the intermediate flow system and contain thermal water in their deeper parts, while from the shallower parts fresh drinking and industrial water is produced. In the Quaternary and Pliocene aquifers the Ca-Mg-HCO₃ water type prevails with a low total dissolved solid content. The Zagyva, Somló-Tihany and the lower part of the Ptuj-Grad Fm. show a developing trend of cation (calcium-sodium) exchange characteristic due to longer groundwater retention time. The water type changes from Ca-Mg-HCO₃ to Na-HCO₃ in these deeper levels. These waters are recent to a few thousand years old.

The deep regional thermal groundwater flow system is developed in the Mura/Újfalú aquifers and is characterized by an alkaline Na-HCO₃ character with a total dissolved solid content increasing with depth, with the highest values reached in depths from -1,500 to -2,000 m a.s.l.,

below which lower TDS contents is again measured. The Hungarian groundwater contains higher TDS values than the Slovenian in the -1,300 to -3,500 m a.s.l. depth interval, which can be attributed to a longer flow path on the Hungarian side. Locally, this water is enriched in chloride or sulphate anions, mostly due to mixing. Most of the δD and $\delta^{18}O$ data of the sampled groundwater from the Mura/Újfalú aquifers are positioned on the meteoric water line, indicating that they are old infiltrated rainwater. The ^{14}C values indicate age above 20,000 years. The $\delta^{18}O$ and δD values are more positive than the "typical ice-age" groundwater values which suggests a recharge during a warmer period of the Pleistocene. Based on the modelled travel times of a water particle (roughly equivalent to the age of infiltration), the majority of thermal groundwater in the Mura/Újfalú aquifer might have been recharged into the flow-system before the last ice-age, most probably in the Riss-Würm interglacial period (between 93,000-132,000 years BP).

Based on the geochemical character, the thermal groundwater of the Mura/Újfalú aquifer can be well distinguished from the groundwaters stored at greater depths, whose geochemical character shows that they are not (or are only to some extent) a part of the regional thermal groundwater flow system. Groundwater of the marly delta-slope sediments (corresponding to Algyó Fm. in Hungary and Upper Lendava Fm. in Slovenia) is a rather isolated brine of Na-Cl type. In contrast, the sandy turbiditic bodies (Szolnok and

Lower Lendava Fms. respectively) store water which is less isolated from its surroundings and is often mixed with other groundwater from Miocene aquifers therefore anions show a wide range. The Middle Miocene formations store different waters depending on the burial depth. Where layers outcrop, the infiltrating Ca-Mg-HCO₃ water type is observed while towards deeper parts the longer retention time, cation exchange, mixing, dissolved gas and other geochemical processes modify its composition, so Na-HCO₃ to Na-Cl types prevails.

Numerical groundwater flow model of the Upper Miocene to Quaternary aquifers in the Mura-Zala basin

The modeled potential fields indicate that groundwater recharges from NE Slovenia and the flow direction is from west to east (Fig. 9). The model showed that depressions in the cold-water aquifer (upper part of the intermediate flow system, corresponding to model layer 2) were local, caused mainly by water abstraction in Radenci, Szombathely and Zalaegerszeg, and could be neglected along the state border. If solely thermal water abstraction is modeled (which is currently 61.8 l/s in the Slovenian and 67.3 l/s in the Hungarian part of the model area), the depression would be 5–7 m along the state border in the Mura/Újfalú aquifer (6th model layer, Fig. 10). If only Slovenian thermal water abstraction was applied to the model, a depression of 4–5 m would be computed along the border, while if only Hungarian abstraction was considered, the depression would be only 1–1.5 m along the border. This indicates that thermal water abstraction on the Slovenian side close to the border (Murska Sobota, Moravske Toplice) has

much greater effect on the size and depth of the hydraulic depression of the transboundary area than current abstractions in Hungary, which are further away from the border (major regions are around Zalakaros and Szombathely). However, if cold and thermal water production data are considered together, the depression in the Mura/Újfalú aquifer in north-eastern Slovenia may exceed 20 m and reaches 6–8 m along the state border (Fig. 10), clearly showing the hydrodynamic connection between the deep thermal and shallow cold water aquifers.

Delineation of the Mura-Zala transboundary thermal groundwater body (TTGWB) and recommendations on its management

Based on the presented results a transboundary thermal groundwater body (TTGWB) was outlined (Fig. 11), also taking into account the major recharge and discharge areas, as well as the potential impact areas (TÓTH et al., 2011b). In the Hungarian part, the vicinity of Lake Hévíz was also included because it is a groundwater dependent ecosystem closely connected to the investigated thermal groundwater flow system. The upper boundary of the common transboundary thermal groundwater body was suggested at 500 meter below the surface because the majority of the thermal water wells are screened below this level. TTGWB Mura-Zala is not hydrodynamically confined except for the bottom (clayey aquitard-aquiclude complex of the Upper Miocene delta slope facies of Lendava and Algyő Fms.), which is recommended to be outlined at 2,200 m below the surface. It has an open hydrodynamic connection to the neighbouring cold and thermal intergranular, fissured and karst aquifers from where it is recharging and discharging.

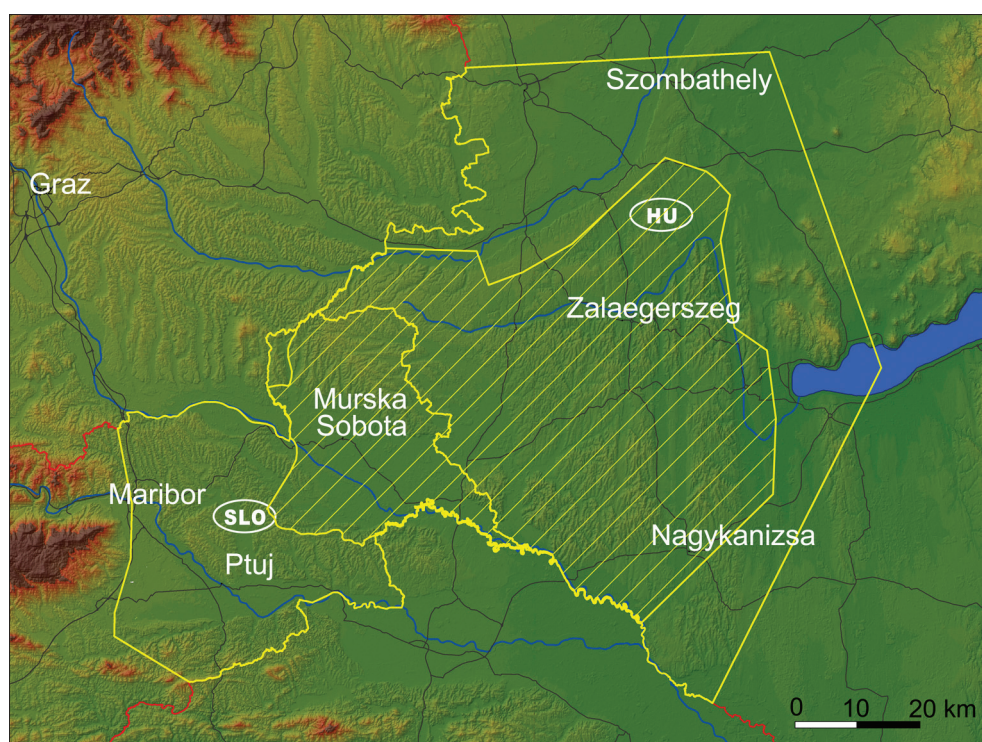


Fig. 11. Delineated transboundary thermal groundwater body Mura-Zala (TTGWB)

neighbouring body	Budget of the Hungarian part of the delineated transboundary thermal porous groundwater body (m ³ /day)								
	pre-exploited state			present production (thermal and cold)			5 x present thermal production		
	in	out	total	in	out	total	in	out	total
colder zone above 500 m depth	11676	-18799	-7123	12780	-16205	-3425	21626	-11276	10350
thermal wells	0	0	0	0	-3085	-3085	0	-15425	-15425
Hungarian part, deeper than 500 m	5891	-4305	1586	5788	-4472	1316	9443	-7324	2119
Slovenian part, deeper, than 500 m	7698	-2561	5137	6842	-2512	4330	4349	-3692	657
Croatian part, deeper, than 500 m	721	-424	297	1145	-475	670	2395	-553	1842
Total	25986	-26089	-103	26555	-26749	-194	37813	-38270	-457

neighbouring body	Budget of the Slovenian part of the delineated transboundary thermal porous groundwater body (m ³ /day)								
	pre-exploited state			present production (thermal and cold)			5 x present thermal production		
	in	out	total	in	out	total	in	out	total
colder zone above 500 m depth	9740	-5573	4167	11210	-5273	5937	20181	-4806	15375
thermal wells	0	0	0	0	-4069	-4069	0	-20345	-20345
Hungarian part, deeper than 500 m	2561	-7698	-5137	2512	-6842	-4330	3708	-4357	-649
Slovenian part, deeper, than 500 m	1445	-22	1423	1641	-35	1606	2300	-105	2195
Austrian part, deeper than 500 m	23	-1	22	37	-2	35	117	-12	105
Croatian part, deeper, than 500 m	2322	-2446	-124	2779	-2186	593	4727	-1722	3005

Table 2. Water balance zone budgets of the Mura-Zala TTGWB.

The area of the Mura-Zala TTGWB is 4,974 km² wide of which 1,151 km² falls in the territory of Slovenia and 3,823 km² in Hungary (PRESTOR et al., 2011). In Hungary, the borders of the intergranular thermal groundwater water bodies delineated for the EU Water Framework Directive River Basin Management Plan were followed where possible. In Slovenia, the suggested Mura - Zala TTGWB is delineated by the Slovene - Croatian state border in the south and by the Slovene - Austrian state border in the north. Respectively, in the northwest by the pinching out of the Mura formation and in the west by the surface water divide between Mura and Drava rivers at the Slovenske Gorice Hills. As the modelling showed that the west-lying thermal water abstraction has quite insignificant impact on the aquifers quantitative status at the SI-HU border, the latter decision was made although the authors are aware that this surface water divide does not affect the thermal groundwater flow. This compromise was set also to ease the administrative and management strategies of the TTGWB.

The numerical flow model was used to calculate the groundwater budget components of the delineated thermal groundwater body across the Slovenian-Hungarian state border, also considering the connections towards Croatia and Austria. The budget was calculated for three scenarios: (1) pre-exploited state, (2) present production, (3) extreme production conditions, assuming production five times higher than at present (Table 2). Recharge (inflow) water comes from the zones above 500 m depth and laterally from the neighbouring thermal water bodies of Slovenia, Hungary, Austria and Croatia.

The pre-exploited balance of the transboundary thermal groundwater body Mura-Zala between Slovenia and Hungary was strongly positive for Hungary: 59.5 l/s water surplus from Slovenia. At the present production (61.8 l/s in the Slovenian and 67.3 l/s in the Hungarian part of the TTGWB) this decreased to 50.1 l/s. The extreme production scenario would cause much stronger change: only 7.5 l/s surplus would remain from Slovenia.

Based on these results it was possible to phrase some tangible recommendations regarding the future management of the Mura-Zala TTGWB. The general environmental objective is to maintain the good status, i.e. to prevent the deterioration of the actual status. This can be achieved by maintaining the long term positive water balance, which means that thermal water abstraction should not stop or redirect the recharge surplus from Slovenia to Hungary. Consequently, regional abstraction should not approximate to as much as 5-times higher thermal water production as present in both countries. If we take into consideration that the available reserves would not be endangered if the abstraction does not exceed 70 % of the renewable volume of groundwater, the increment factor should not be more than 3.5. The critical point of 3.5 factor of abstraction increment should be lowered in those cases where significant negative long-term trends in the piezometric heads are observed or any kind of other groundwater intrusions occur, i.e. significant long-term negative trends arise in the quality, quantity or temperature of the thermal water. Abstraction from an individual well should not be increased in such a way that this affects

neighbouring wells of the neighbouring users. Increase of abstraction should not provoke a draw-down or long term trend that could significantly diminish the conditions of exploitation in the future from the technological or economical point of view. This constraint is a maximum allowable local lowering of the pre-exploitation piezometric head that is being limited to 30 m.

Conclusions

The presented two-year research has confirmed the existence of transboundary and regional aquifers in the Mura-Zala basin. The most widely exploited transboundary geothermal aquifer is identified in the Upper Miocene delta front sandy deposits of the Mura/Újfalú Fm. The extent and distinctive hydrogeological characteristics of the so called transboundary thermal groundwater body Mura-Zala were defined in details. Regarding the sustainable use of these groundwater resources, it was realised that the future increase of actual abstraction rate by a factor below 3.5 would theoretically enable to follow the renewable energy utilization objectives till 2020 in Slovenia and in Hungary without threatening environmental objectives. However, priority should not be put on increased abstraction, but rather on improved thermal efficiency, lowering the temperature of the discharged thermal waste water and promotion of reinjection, where it is possible.

Acknowledgements

The T-JAM project was running in the frame of the Slovenia-Hungary Operational Programme 2007-2013 and was co-financed by ERFD. The work was performed by a large team both from Slovenia and Hungary. Contributions from Ádámné Incze, Sz., Bartha A., Babinszki E., Budai T., Halmai J., Jerabek Cs., Katona G., Lajtos S., Orosz L., Palotás K., Pálfi E., Rotárné Szalkai Á., Scharek P., Selmeczi I., Tihanyiné Szép E., Tóthné Makk Á., Tullner T., Turczi G. (MÁFI) and K. Hribernik, M. Hrženjak, M. Janža, B. Jelen, J. Krivic, Š. Kumelj, T. Matoz, S. Mozetič, M. Požar, H. Rifelj, I. Rižnar, B. Simić, M. Trajanova (GeoZS), as well as Bányai P., Bócz B., Hamza I., Juhász I., Németh J., Tóth L. (Nyuduvizig) are greatly acknowledged. Some of the Slovene reserchers are members of the ARRS Programme P1-0020-0215 Groundwaters and geochemistry. The authors are also very grateful to the two reviewers who significantly helped to improve the article.

References

- BÉRCZI, I. & PHILLIPS, R. L. 1985: Processes and depositional environments within deltaic-lacustrine sediments, Pannonian Basin, South-east Hungary. *Geophysical Transactions*, 31: 55-74.
- CSEERNY, T., GÁL, N., JOCHÁNE EDELÉNYI, E., JORDÁN, G., ROTÁRNÉ SZALKAI, A., TÓTH, G. & VISZKOK, J. 2009: Déli-Bakony – Zalai-medence regionális hidrogeológiai modell és felszín alatti áramlás szimuláció (in Hungarian). Karsztvíz kutatási projekt, ZÁRÓJELENTÉS (Hantken Miksa Alapítvány kutatócsoportja). Archive MFGI.
- DEÁK, J., STUTE, M., RUDOLPH, J., SONNTAG, C. 1987: Determination of the flow regime of quaternary and Pliocene layers in the Great Hungarian Plain (Hungary) by D, 18O, 14C, and noble gas measurements. *International Symposium on the Use of Isotopes Techniques in Water Resources Development*, IAEA, Vienna, Austria.
- DÖVÉNYI, P., HORVÁTH, F., LIEBE, P., GÁLFI, J. & ERKI, I. 1983: Geothermal conditions of Hungary. *Geophysical Transactions*, 29/1: 3-114.
- DÖVÉNYI, P. & HORVÁTH, F. 1988: A review of temperature, thermal conductivity and heat flow data from the Pannonian Basin. In: ROYDEN, L. H. & HORVÁTH, F. (eds.): *The Pannonian Basin a Study in Basin Evolution*. American Association of Petroleum Geologist memoirs, 45: 195-233.
- FODOR, L., BADA, G., CSILLAG, G., HORVATH, E., RUSZKICZAY-RUDIGER, Z., PALOTAS, K., SIKHEGYI, F., TIMAR, G., CLOETINGH, S. & HORVATH, F. 2005: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 410: 15-41, doi:10.1016/j.tecto.2005.06.008.
- FODOR, L., JELEN, B., MARTON, E., RIFELJ, H., KRALJIC, M., KEVRIC, R., MARTON, P., KOROKNAI, B., BALDI-BEKE, M. 2002: Miocene to Quaternary deformation, stratigraphy and paleogeography in northeastern Slovenia and Southwestern Hungary. *Geologija*, 45/1: 103-114, doi:10.5474/geologija.2002.009.
- FODOR, L., KOROKNAI, B., BALOGH, K., DUNKL, I. & HORVÁTH, P. 2003: A Dunántúli-középhegységi egység ("Bakony") takarós helyzete szlovéniai szerkezeti-geokronológiai adatok alapján = Nappe position of the Transdanubian Range Unit ("Bakony") based on structural and geochronological data from NE Slovenia (in Hungarian). *Földtani Közlöny*, 133/4: 535-546. Archive MFGI.
- FODOR, L., UHRIN, A., PALOTÁS, K., SELMECZI, I., NÁDOR, A., TÓTH-MAKK, Á., SCHAREK, P., RIŽNAR, I., TRAJANOVA, M., RIFELJ, H., JELEN, B., LAPLANER, A., MOZETIČ, S., MURÁTI, J., BUDAI, T. & TULLNER, T. 2011: Geological conceptual model within the framework of project T-JAM (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.t-jam.eu>).
- HAAS, J., BUDAI, T., CSONTOS, L., FODOR, L. & KONRÁD, GY. 2010: Magyarország pre-kainozoos földtani térképe 1:500000 = Pre-Cenozoic geological map of Hungary, 1:5000000 (in Hungarian). Archive MFGI.
- HORVÁTH, F. & ROYDEN, L. H. 1981: Mechanism for formation of the intra-Carpathian basins: A review. *Earth Evolutionary Sciences*, 1: 307-316.
- HURTIG, E., ČERMAK, V., HAENEL, R. & ZUI, V. (eds.) 1992: *Geothermal Atlas of Europe*. Potsdam, GeoForschungsZentrum.
- JELEN, B., RIFELJ, H., BAVEC, M. & RAJVER, D. 2006: Opredelitev dosedanega konceptualnega geo-

- loškega modela Murske depresije = Definition of current conceptual geological model of the Mura Depression (in Slovene). *Archive GeoZS*.
- JELÉN, B. & RIFELJ, H. 2011: Površinska litostratigrafska in tektonska strukturna karta območja T-JAM projekta, severovzhodna Slovenija = Surface litostratigraphic and tectonic structural map of T-JAM project area, northeastern Slovenia, 1 : 100.000 GeoZS (in Slovene). (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.geo-zs.si/podrocje.aspx?id=489>).
- JOCHÁNÉ EDELÉNYI, E., HORVÁTH, I., JORDÁN, G., MURÁTI, J. & TÓTH, G. 2005: A fürdőfejlesztésekkel kapcsolatban a hazai termálvízkészlet fenntartható hasznosításáról és a használt víz kezeléséről szóló hidrogeológiai kutatás MÁFI munkái (in Hungarian). Zárójelentés, (készült a Gazdasági és Közlekedési Minisztérium megbízásából, a Vituki-MAFI-AQUAPROFIT konzorcium kivitelezésében). *Archive MFGI*.
- JUHÁSZ, A., TÓTH, T.M., RAMSEYER, K., MATTER, A. 2002: Connected fluid evolution in fractured crystalline basement and overlying sediments, Pannonian Basin, SE Hungary. *Chemical Geology*, 182: 91–120, doi:10.1016/S0009-2541(01)00269-8.
- JUHÁSZ, G. 1994: Magyarországi neogén medencérszek pannóniai s. l. üledéksorának összehasonlító elemzése = Comparison of the Pannonian s.l. sedimentary successions of the Neogene sub-basins in Hungary (in Hungarian). *Földtani Közlöny*, 124: 341–365.
- KRALJ, P. 2001: Das Thermalwasser-System des Mur-Beckens in Nordost-Slowenien, PhD Thesis (in German). *Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie*, 81. Aachen: Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH, 82 p.
- KRALJ, P. & KRALJ, P. 2000a: Thermal and mineral waters in north-eastern Slovenia. *Environmental Geology*, 39/5: 488–500, doi:10.1007/s002540050455.
- KRALJ, P. & KRALJ, P. 2000b: Overexploitation of geothermal wells in Murska Sobota, north-eastern Slovenia. *Proceedings (electronic)*, World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, 837–842.
- KRALJ, P., EICHINGER, L. & KRALJ, P. 2009: The Benedikt hydrothermal system (north-eastern Slovenia). *Environmental Geology*, 58: 1653–1661, doi:10.1007/s00254-008-1631-3.
- LAPANJE, A. 2006: Izvor in kemijska sestava termalnih in termomineralnih vod v Sloveniji = Origin and chemical composition of thermal and thermomineral waters (in Slovene). *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 = A few clarifications to the comments of Dr. Polone Kralj on the article „The origin and chemical composition of thermal and thermo-mineral waters in Slovenia „(*Geology* 49/2, 2006) (in Slovene). *Geologija*, 50/1: 215–220.
- LAPANJE, A., RAJVER, D., SZÉKELY, E., KUMELJ, Š., MOZETIČ, S., JUHÁSZ, I., BÁNYAI, P., TÓTH, L. & HAMZA, I. 2011: Review of geothermal energy utilization in north-eastern Slovenia and south-western Hungary within the framework of project T-JAM (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.t-jam.eu>).
- LENKEY, L., DÖVÉNYI, P., HORVÁTH, F. & CLOETINGH, P.L. 2002: Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the neotectonics. *EGU Stephan Muller Special Publication Series*, 3: 29–40.
- MAGYAR, I., GEARY, D. H. & MÜLLER, P. 1999: Paleogeographic evolution of the Late Miocene Lake Pannon in Central Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 147/3: 151–167, doi:10.1016/S0031-0182(98)00155-2.
- NEMZETI FEJLESZTÉSI MINISZTERIUM 2010: Magyarországi megújuló energia hasznosítási cselekvési terve a 2020-ig terjedő megújuló energiahordozó felhasználás alakulásáról (in Hungarian) (available on 1.11.2012 at: http://www.kormany.hu/download/2/88/20000/NCsT_20110106).
- PEZDIČ, J. 1991: Izotopi v termo-mineralnih vodnih sistemih = Isotopes in thermo-mineral aqueous systems, PhD thesis (in Slovene). Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 157 p.
- PEZDIČ, J. 1999: Izotopi in geokemijski procesi = Isotopes and geochemical processes (in Slovene). Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana.
- PEZDIČ, J. 2003: Origin and migration of gases in the Pannonian sedimentary basin. *Proceedings, ICGG7*, 47–49.
- PRESTOR, J., NÁDOR, A., ROTÁR-SZALKAI, Á., SZÓCS, T., TÓTH, GY., RMAN, N., LAPANJE, A., SZÉKELY, E., TÓTH L., HAMZA, I., FUKS, T. & RAJVER, D. 2011: Cross-border management recommendations within the framework of project T-JAM (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.t-jam.eu>).
- RAJVER, D. & RAVNIK, D. 2002: Geotermična slika Slovenije-razširjena baza podatkov in izboljšane geotermične karte = Geothermal pattern of Slovenia-enlarged data base and improved geothermal maps (in Slovene). *Geologija* 45/2, 519–524, doi:10.5474/geologija.2002.058.
- RAVNIK, D., 1991. Geotermične raziskave v Sloveniji = Geothermal investigations in Slovenia (in Slovene). *Geologija*, 34: 265–303.
- RMAN, N. et al. 2012: Database of users and database of current and potential utilization parameters. *GeoZS, MAFI, SGDUS, GBA* (available on 1. 11. 2012 at: <http://transenergy-eu.geologie.ac.at/>).
- RMAN, N., KUMELJ, Š., TULLNER, T., OROSZ, L., PALOTAS, K., POŽAR, M., HRIBERNIK, K., FUKS, T. & LAJTOS, S. 2011a: Joint three-lingual geothermal database within the framework of project T-JAM (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.t-jam.eu>).

- RMAN, N., LAPANJE, A. & PRESTOR, J. 2011b: Water concession principles for geothermal aquifers in the Mura-Zala Basin, NE Slovenia. *Water resources management*, 25/13: 3277-3299, doi:10.1007/s11269-011-9855-5.
- RMAN, N., TÓTH, GY., MURÁTI, J., LAPANJE, A. & FUKS, T. 2011c: Hydrogeological conceptual model within the framework of project T-JAM (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.t-jam.eu>).
- RMAN, N., SZÓCS, T., LAPANJE, A., TÓTH, GY., LAJTOS, S., TIHANYI-SZÉP, E., SZÓCS, A., OROSZ, L. & MAIGUT, V. 2011d: Hydrogeochemical conceptual model within the framework of project T-JAM (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.t-jam.eu>).
- SAFTIĆ, B., VELIĆ, J. et al. 2003: Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW Part of the Pannonian Basin (Northern Croatia and South-Western Hungary). *Geologia Croatica*, 56/1: 101-122. (available on 1.11.2012 at: <http://hrcak.srce.hr/3793>)
- SACHSENHOFER, R. F., JELEN, B., HASENHUTTL, C., DUNKL, I. & RAINER, T. 2001: Thermal history of Tertiary basins in Slovenia (Alpine-Dinaride-Pannonian junction). *Tectonophysics*, 334: 77-99, doi:10.1016/S0040-1951(01)00057-9.
- SZÓCS, T., RMAN, N., SÜVEGES, M., PALCSU, L., TÓTH, G. & LAPANJE, A. 2012: The application of isotope and chemical analyses in managing transboundary groundwater resources. *Applied Geochemistry*. doi:10.1016/j.apgeochem.2012.10.006.
- TARI, G. 1994: Alpine tectonics of the Pannonian basin, PhD. Thesis. Rice University, Texas, USA: 501 p.
- TOMLJENOVIC, B. & CSONTOS, L. 2001: Neogene-Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac Basins, Croatia). *International Journal of Earth Sciences*, 90/3: 560-578.
- TÓTH, G. 2009: Case study: XL groundwater model of the Pannonian basin and its use for transboundary consultations. Workshop on Groundwater modelling TAIEX-INFRA 32389. Belgrade.
- TÓTH, J. & ALMÁSI, I. 2001: Interpretation of observed fluid potential patterns in a deep sedimentary basin under tectonic compression: Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. *Geofluids*, 1/1: 11-36, doi:10.1046/j.1468-8123.2001.11004.x.
- TÓTH, GY., MURÁTI, J., RAJVER, D., NÁDOR, A. & LAPANJE, A. 2011a: Geothermal conceptual model within the framework of project T-JAM (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.t-jam.eu>).
- TÓTH, GY., MURÁTI, J., RMAN, N., KRIVIC, J. & BI-ZJAK, M. 2011b: Numerical flow model within the framework of project T-JAM (available on 1. 11. 2012 at: <http://www.t-jam.eu>).
- UHRIN, A., MAGYAR, I. & SZTANÓ, O. 2009: Az aljzat-deformáció hatása a pannóniai üledékképződés menetére a Zalai-medencébe = Control of the Late Neogene (Pannonian s.l.) sedimentation by basement deformation in the Zala Basin (in Hungarian). *Földtani Közlöny*, 139: 273-282.
- URBANČIČ, A., SUČIĆ, B., MERŠE, S., STANIČIĆ, D., LAH, P., ČESEN M., AL MANSOUR, F., PUŠNIK, M., PODGORNİK, A., KOŠNJEK, Z., BUGEZA, M., BREČEVIČ, D., JAMŠEK, S., BUČAR, A., ROJNIK, E., LAMPIČ, G., TOMŠIČ, G.M., DERVARIČ, E., SKUBIN, G. & ŠJANEC, M. 2011: Draft proposal for a National Energy Programme by 2030: Active Energy Management (in Slovene). Institut „Jožef Stefan“, CEU, Ljubljana.
- VARSÁNYI, I., MATRAY, J.-M. & KOVÁCS, L. 1997: Geochemistry of formation waters in the Pannonian Basin (southeast Hungary). *Chemical Geology*, 140/2: 89-106.
- VARSÁNYI, I. & KOVÁCS, L. 2009: Origin, chemical and isotopic evolution of formation water in geopressed zones in the Pannonian Basin, Hungary. *Chemical Geology*, 264: 187-196, doi:10.1016/j.chemgeo.2009.03.006.
- VARSÁNYI, I., MATRAY, J.-M., KOVÁCS, L. 1999: Hydrogeochemistry in two adjacent areas in the Pannonian Basin (Southeast-Hungary). *Chemical Geology*, 156/1-4: 25-39, doi:10.1016/S0009-2541(98)00178-8.
- VARSÁNYI, I., PALCSU, L. & KOVÁCS, L. 2011: Groundwater flow system as an archive of palaeotemperature: Noble gas, radiocarbon, stable isotope and geochemical study in the Pannonian Basin, Hungary. *Applied Geochemistry*, 26: 91-104, doi:10.1016/j.apgeochem.2010.11.006.
- VOLLHOFER, O. & SAMEK, M. 2010: Austrian-German cooperation in modelling and managing a transboundary deep groundwater body. *ISARM*, 7 p.
- ŽLEBNIK, L. 1978: Terciarni vodonosniki v Slovenskih goricah in na Goričkem = Tertiary aquifers in the Slovenske gorice and Goričko hills (in Slovene). *Geologija*, 21: 311-324. (available on 1.11.2012 at: <http://www.geologija-revija.si/dokument.aspx?id=477>)

Analiza uporabe termalne vode v severovzhodni Sloveniji

Analysis of thermal water utilization in the northeastern Slovenia

Nina RMAN, Andrej LAPANJE & Dušan RAJVER

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana; e-mail: nina.rman@geo-zs.si;
andrej.lapanje@geo-zs.si; dusan.rajver@geo-zs.si

Prejeto / Received 18. 10. 2012; Sprejeto / Accepted 26. 11. 2012

Ključne besede: termalna voda, geotermalna energija, direktna raba, Murska formacija, Mursko-Zalski bazen, Pomurje, Murska depresija

Key words: thermal water, geothermal energy, direct use, Mura Formation, Mura-Zala basin, Pomurje, Mura depression

Izvleček

S predstavljen raziskavo smo želeli identificirati uporabnike termalne vode v SV Sloveniji, ugotoviti kakšno in koliko vode pridobivajo ter kako jo uporabljajo. Pregled energetske izrabe termalne vode smo nadgradili z opisom stanja obratovalnega monitoringa in ravnanja z odpadno vodo, dodali pa smo tudi informacije o tehnoloških težavah pri rabi vode in njihovem reševanju. Ugotovili smo, da kar 14 od 26 aktivnih vrtin zajema vodonosnik v Murski formaciji, v katerega posega tudi edina reinjekcijska vrtina. Odvzem termalne vode je v letu 2011 znašal 3,29 mio m³. Prevladuje kaskadna izraba termalne vode, pri čemer ogrevanju prostorov in sanitarne vode sledi ogrevanje bazenskih kompleksov z balneologijo. Poznano je tudi ogrevanje rastlinjakov ter daljinsko ogrevanje. Obratovalni monitoring termalnih vrtin je v splošnem nezadovoljiv, geotermalni vodonosniki pa so zaradi več desetletnega odvzema podvrženi preizkoriščanju. Ugotovljeno stanje kaže na nujnost izvedbe ustreznih ukrepov za izboljšanje njihovega stanja, ki bodo omogočili nadaljnjo in hkrati večjo rabo termalne vode v prihodnosti.

Abstract

The presented research aims at identification of thermal water users in NE Slovenia, at finding type and amount of the produced thermal water as well as its utilization practice. The energetic overview has been upgraded by a description of current observational monitoring practice and thermal waste water management, but technological problems of thermal water use and their mitigation are discussed also. We have ascertained that 14 of 26 active geothermal wells tap the Mura Formation aquifer in which the only reinjection well is perforated also. Total thermal water abstraction summed to 3.29 million m³ in 2011. Cascade use of thermal water is abundant, where individual space and sanitary water heating is followed by heating of spa infrastructure and balneology. Greenhouse heating systems and district heating were also identified. Operational monitoring of these geothermal wells is generally insufficient, and geothermal aquifers are overexploited due to decades of historical water abstraction. All these facts indicate the need for applying appropriate measures which will improve their natural conditions as well as simultaneously enable further and even higher thermal water utilization in the future.

Uvod

Direktna raba je ena najstarejših, najpogostejših in najbolj vsestranskih oblik izkoriščanja geotermalne energije (DICKSON & FANELLI, 2003). Tako se izrabljajo številni nizkotemperaturni vodonosniki v sedimentacijskih bazenih (RYBACH, 2010), kar je značilno tudi za bližnjo Madžarsko (OTTLIK et al., 1981) in slovenski del Mursko-Zalskega bazena (NOSAN, 1973; ŽLEBNIK, 1975; KRALJ, 1999; LAPANJE et al., 2007; LAPANJE et al., 2010; RAJVER et al., 2010; RMAN et al., 2011). Raba teh virov je pogosto ekonomična le, kadar odvzem termalne vode bistveno presega naravni iztok iz geotermalnega sistema, to pa sčasoma povzroči izčrpanje razpo-

ložljivih zalog (RYBACH, 2003). S tem se hidro- in termodinamsko ter kemično stanje vodonosnikov spreminja (AXELSSON & GUNNLAUGSSON, 2000), kar je že ugotovljeno tudi v severovzhodni Sloveniji (PEZDIČ, 1991; KRALJ, 1993; KRALJ & KRALJ, 2000a; KRALJ & KRALJ, 2000b; KRALJ, 2001; KRALJ et al., 2009; RMAN et al., 2011; RMAN & SZŐCS, 2011; TÓTH et al., 2011). Naravna obnova sistema po prenehanju izkoriščanja je dolgotrajna in lahko obsega več sto let (MÉGEL & RYBACH, 2000; AXELSSON, 2010), zato je način izkoriščanja tega naravnega vira izredno pomemben. Razprava o trajnostni rabi razpoložljivih naravnih virov poteka že desetletja, pri čemer še vedno velja osnovno načelo, da sedanji razvoj ne sme ogroziti prihodnjega (ZDRU-

ŽENI NARODI, 1987). Podzemne vodne vire lahko rabilimo na več načinov. Prvi koncept je poimenovan »varen odvzem« (*ang. safe yield*) in predvideva, da so vodonosniki obnovljivi (SOPHOCLEOUS, 2000). V tem primeru celotni odvzem podzemne vode ne sme presežati količine naravnega napajanja. V Vodni direktivi (2000/60/EC) se kot dodatne omejitve odvzema upoštevajo soodvisnost površinskih voda in ekosistemov od podzemne vode ter vdori kemijsko drugačne vode v vodonosnik. To seveda dodatno zmanjša razpoložljivo količino na višino »trajnostnega odvzema« (*ang. sustainable yield*), ki je bistveno nižji od napajanja. V primeru vračanja vode nazaj v vodonosnik se lahko odvzem ustrezno poveča ali celo doseže »ničelno izčrpanje zalog« (*ang. zero depletion*), a pri slednji se mora celotna odvzeta količina vračati v vodonosnik. Četrty način je naravovarstveno gledano najslabši in definira »načrtno izčrpanje zalog« (*ang. planned depletion*), pri čemer se vir v določenem in dogovorjenem časovnem obdobju namenoma preizkorišča (SOPHOCLEOUS, 2010). Na žalost je upravljanje z regionalnimi in čezmejnimi (Szócs et al., 2012) geotermalnimi vodonosniki v SV Sloveniji še vedno zelo pomanjkljivo, saj koncesije za rabo termalne vode večinoma niso podeljene, hkrati pa še ni vzpostavljen državni monitoring stanja globokih vodonosnikov (VIŽINTIN et al., 2008; RMAN et al., 2011).

Raziskava opisuje obstoječ način izrabe geotermalnih vodonosnikov SV Sloveniji in opozarja na njegove prednosti in slabosti. V članku smo najprej opisali značilnosti geotermalnih vodonosnikov v tem delu Slovenije ter načina pridobivanja in obdelave podatkov. Ker smo želeli identificirati sedanje in bodoče uporabnike termalne vode, smo ugotavljali s katerimi vrtnami pridobivajo termalno vodo, v kakšni količini ter kako jo uporabljajo. Izračun energetske izrabe in razpoložljive kapacitete tega vira energije smo nadgradili z opisom stanja obratovalnega monitoringa in ravnanja z odpadno vodo, dodali pa smo tudi informacije o tehnoloških težavah pri rabi vode in njihovem reševanju. Na podlagi interpretiranih podatkov je mogoče izpostaviti območja z dolgotrajnim odvzemom termalne vode, kjer je pričakovana oziroma opazovana sprememba stanja geotermalnih vodonosnikov zaradi izrabe največja. S tem opisom obstoječega stanja rabe smo želeli postaviti osnovo za nadaljnjo razpravo med uporabniki, upravljavci in investitorji o prihodnjem načinu izkoriščanja dragocenega naravnega vira, »trajnostnem« ali kakšnem drugačnem.

Geotermične značilnosti severovzhodne Slovenije

Regionalna geotermična slika je predstavljena v okviru različnih geotermičnih kart (HURTIG, 1992; RAVNIK et al., 1992; RAVNIK et al., 1995; RAJVER & RAVNIK, 2002; RAJVER et al., 2002). Območje severovzhodne Slovenije se v zadnjih letih intenzivno proučuje v okviru evropskih projektov, kot so Transthermal (LAPANJE et al., 2007), T-JAM

Seznam kratic:

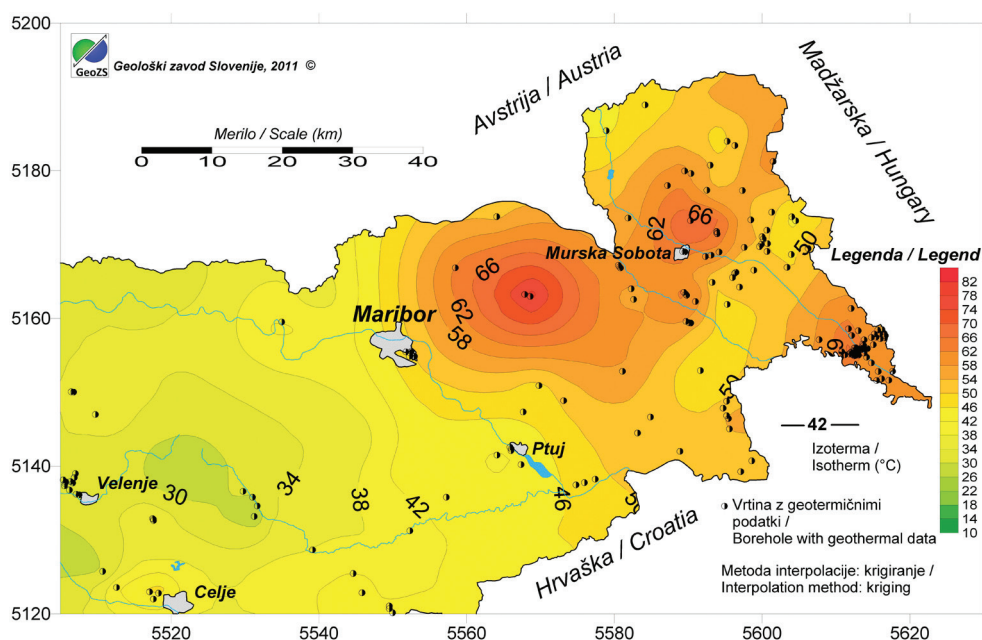
Ang.	– angleško
Form.	– formacija (<i>ang. Formation</i>)
GTT	– površinska gostota toplotnega toka
GTČ	– geotermalna toplotna črpalka
GHP	– geothermal heat pump
l.	– leto
mio	– milijon

(LAPANJE et al., 2010; NÁDOR et al., 2012) in Trans-energy (GOETZL et al., 2012).

Ozemlje severovzhodne Slovenije leži na stičišču treh velikih regionalnih strukturnih enot, Vzhodnih Alp (Avstro-Alpidi), Panonskega bazena ter Južnih Alp kot dela Dinaridov (PLACER, 1999). Raznolikost struktur je opazna v geotermičnem polju več tisoč km² velike toplotne anomalije, katere vzrok tiči globoko v skorji ali v zgornjem plašču (CHAPMAN et al., 1979; ROYDEN et al., 1983b; CHAPMAN & RYBACH, 1985; ČERMÁK & BODRI, 1986). Prehod med debelejšo skorjo Alp v zahodni Sloveniji (do 43 km) ter tanjšo skorjo Panonskega bazena (do 28 km) je zelo strm, saj se v vzhodni Sloveniji globina do Mohorovičičeve diskontinuitete zmanjša za 8 km na dolžini 50 km (GOETZL et al., 2012).

Predneogenska podlaga je z višjo toplotno prevodnostjo nosilka toplote in s tem vir povišanih geotermičnih gradientov v neogenskih plasteh povsod, kjer je dvignjena proti površini.

Na območju Panonskega bazena so vrednosti površinske gostote toplotnega toka povišane in nad 100 mW/m² (RAJVER & RAVNIK, 2002). Poleg tanjše Zemljine skorje in možnih magmatskih intruzij je eden od vzrokov za višjo geotermalnost tudi lokalna konvekcija termalne vode skozi razpokane prelomne cone. Nanjo vplivata še radiogena produkcija toplote (RAVNIK, 1991) in advekcija podzemne vode (BODVARSSON, 1973). Najvišje vrednosti GTT, med 145 in 154 mW/m², so izračunane na lokacijah vrtn T-4 (Radenci), Dan-3 (Dankovci), Pg-9 (Petišovci) in BS-2 (Benedikt) ter vsebujejo nekaj konvektivne komponente (okvirno 35 do 45 mW/m²), ki vpliva na povišan temperaturni gradient v terciarnem paketu sedimentov. V nekaterih delih bazena so zaradi hitrega odlaganja velikih debelin hladnih sedimentov temperature in GTT za 10 do 30% nižje, kot bi bile ob počasnejši sedimentaciji (ROYDEN et al., 1983a). Temperaturne karte vseeno kažejo kar nekaj pozitivnih anomalij. V manjših globinah (0,5 do 1 km; sl. 1) je anomalija povezana z lokalnimi konvekcijskimi celicami termalne vode v tektonsko razpokani metamorfni podlagi pri Benediktu, ki se verjetno širi proti Radgoni in Radencem. Ponekod, predvsem na Murskosoboškem ekstenzijskem bloku med Lenartom in Moravskimi Toplicami ter pri Lendavi so pričakovane temperature v globini 500 m nad 38 °C in v globini 1000 m nad 58 °C. Anomalija se verjetno nadaljuje proti Madžarski. Vzrok za anomalije v srednjih globinah (1 do 2 km) je najverjetneje termalna konvekcija vzdolž globokih prelomov v predterciarni podlagi, ki je dokazana v Benediktu in je možna tudi



Sl. 1.
Pričakovane temperature
v globini 1000 m pod površino
(posodobljeno po RAJVER &
RAVNIK, 2002)

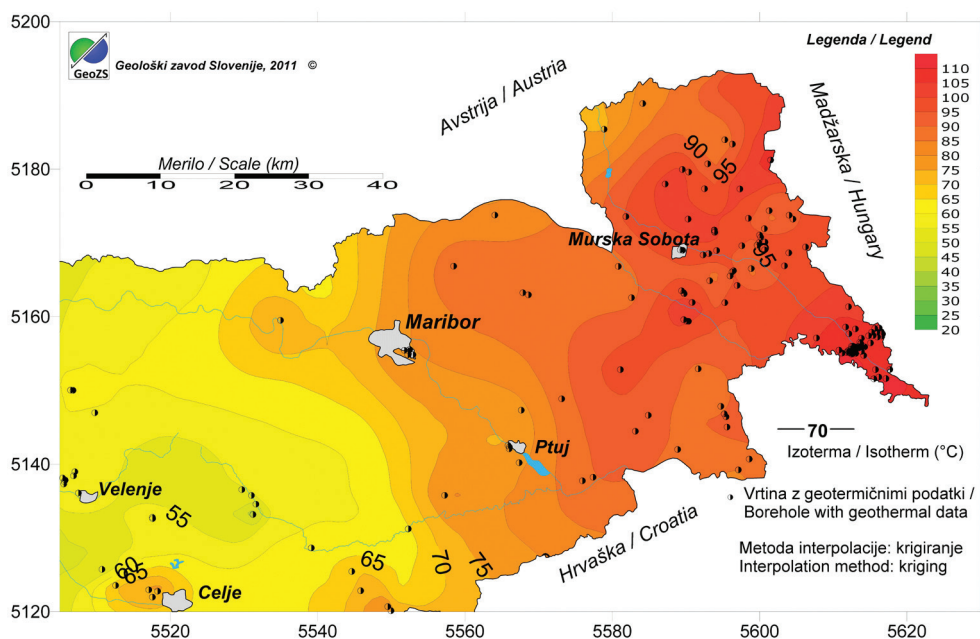
Fig. 1.
Expected temperatures at
a depth of 1000 m beneath
surface (updated after RAJVER
& RAVNIK, 2002)

na območju Moravskih Toplic in Murske Sobote, globlje pa pričakovana na območju Lendave in Murskega gozda. V globini 2000 m (sl. 2) se temperaturna slika spremeni, saj se temperature nad 90 °C pričakujejo v večjem delu Prekmurja, tudi na predelu Bočko-Ormoško-Budafaške antiforme oziroma njenega podaljška pri Lendavi, anomalija med Lenartom in Mursko Soboto pa ne izstopa več. V Ptujsko-Ljutomerski sinformi se poglobitev do podlage bazena odraža na rahlo znižanem geotermičnem gradientu v neogenskih sedimentih. Zato so temperature v globini 1000 m nekoliko nižje kot na antiformah v bližini.

Geotermalni vodonosniki severovzhodne Slovenije

Pomembni regionalni geotermalni vodonosniki na raziskanem območju so nastali zavoljo

povišane GTT in dovolj velike prepustnosti neogenskih sedimentov in kamnin. Poglavitno regionalno paleogeografsko strukturo predstavlja Mursko-Zalski sedimentacijski bazen, ki leži v zahodnem delu Centralne Paratetide (MARTON et al., 2002; FODOR et al., 2005; JELEN et al., 2006). Današnji relief predneogenske podlage je posledica večfaznih tektonskih procesov v razvoju bazena. Kamnine podlage so razlomljene v tektonske bloke in poljarke, ki so usmerjali neogensko sedimentacijo (FODOR et al., 2011). Njena prepustnost je povečana na območju regionalnih prelomnih struktur, vendar je njihovo napajanje pogosto omejeno kot npr. v Mariboru. V Benediktu je termalna voda ugotovljena v prelomnih conah metamorfnih kamnin do globine 1,8 km, medtem ko je mezozojski dolomit v Zrečah in Korovcih (tu skupaj s Haloško formacijo) zajet do globine 2 km. Čeprav se domneva, da so te kamnine potencialni nosilci visokotemperaturnih geotermalnih



Sl. 2.
Pričakovane temperature
v globini 2000 m pod površino

Fig. 2.
Expected temperatures at
a depth of 2000 m beneath
surface

fluidov (KRALJ et al., 1994; RAJVER et al., 2012), le-ti še niso odkriti.

Na predneogensko podlago so odloženi plastoviti siliciklastični neogeni sedimenti (ŽLEBNIK, 1978), ki so glede na dinamični procesni pristop razvrščeni v pet formacij. Karpatijska in sp. badenijska (JELEN & RIFELJ, 2011) Haloška formacija sestoji v spodnjem delu iz debelozrnatih pobočnih in rečnih sedimentov. Kasneje je to področje zalilo morje. V plitvinah se je odlagal pesek, globlje pa mulj, ki sta deloma litificirala v peščenjak in meljevec ali laporovec. Pretežno drobnozrnata sp. badenijska do sp. panonijska (JELEN & RIFELJ, 2011). Špiljska formacija je odložena deloma v rečnem, deloma pa v morskem okolju. V preteklosti sta bili Haloška in Špiljska formacija skupaj poimenovani kot Murskosoboška formacija (TURK, 1993; KRALJ & KRALJ, 2000b). Špiljska formacija sestoji iz prostorsko omejenih vodonosnih plasti peščenjaka, ki jih v globini 0,4 do 1,3 km zajemajo v Radencih in Moravskih Toplicah. Murska in Lendavska formacija (JELEN & RIFELJ, 2011) sta nastajali sočasno v panoniju in pontiju. Za Lendavsko je značilna globokomorska sedimentacija muljevca in laporovca z vložki turbiditnega peščenjaka v vzhodni polovici bazena. Zahodneje so se odlagale peščene in prodnate plasti napredujočega deltnega čela, ki so bile kasneje pokrite z drobnozrnatimi sedimenti deltne ravnice. Deltni sistemi so zasipavali umikajoče se Panonsko jezero s severozahoda in severa proti jugovzhodu in so poimenovani Murska formacija. Izolirane vodonosnike Lendavske formacije izkoriščajo v Banovcih, Lendavi, Moravcih v Slovenskih goricah, Moravskih Toplicah in Murski Soboti v globini od 0,8 do 1,6 km. Hidravlično povezane peščene leče Murske formacije predstavljajo najizdatnejši nizkotemperaturni geotermalni vodonosnik v sedimentacijskem bazenu v Sloveniji, ki se izkorišča v Banovcih, Dobrovniku, Lendavi, Moravcih v Slovenskih goricah, Moravskih Toplicah, Murski Soboti, Petišovcih in Ptujju. Zajet je v globini 0,6 do 1,5 km. Zasipavanje bazena z rečnimi nanosi iz Alpskega predgorja je bilo aktivno od pliocena do pleistocena. Debelo in drobnozrnati sedimenti aluvialne ravnice Ptujsko-Grajske formacije so ugotovljeni med vzhodnim delom Slovenskih goric in vzhodnim Goričkem (JELEN & RIFELJ, 2011). Na Ptujju vsebujejo termalno vodo, drugod pa neogreto podzemno vodo. Hidravlično povezani vodonosniki v Murski in Ptujsko-Grajski formaciji so poimenovani tudi Termal 1 (KRALJ, 2004). Vsi opisani geotermalni vodonosniki so pretežno zaprtega hidravličnega tipa, le plikvartarni in kvartarni prodni vodonosniki na Murskem in Dravskem polju so odprti in povezani z rečno mrežo.

Naravni mineralni izviri se pojavljajo ob prelomnih strukturah v dolini Ščavnice in Nuskove ter okoli Radencev (PEZDIČ et al., 1995). Tam že desetletja pridobivajo in stekleničijo mineralno vodo, zaradi česar se je hitrost dreniranja podzemne vode proti območju črpanja močno povečala (PEZDIČ, 1991; PEZDIČ et al., 2006). Nove čezmejne regionalne raziskave so potrdile ugotovitev,

da se termalna voda v Murski formaciji (na Madžarskem je poimenovana Újfalu formacija) pretaka okvirno od zahoda proti vzhodu s hitrostjo 2–3 mm na leto (TÓTH et al., 2011). Zahodno od Blatnega jezera se ta termalna voda drenira iz zgornjemiocenskih peskov v zakrasele karbonatne kamnine v podlagi sedimentacijskega bazena, nato pa izvira v termalnem jezeru Hévíz, kjer je njen delež pritoka približno 5 % (TÓTH, 2009).

Metodologija

V Sloveniji je termalna voda opredeljena v Zakonu o vodah kot podzemna voda, ki izteka iz izvira ali vrtine in »ki ustreza predpisanim kriterijem« (ANONIMNI, 2000). Ti še niso definirani v ustreznem podzakonskem aktu, a v praksi se kot spodnja temperaturna meja za to oznako uporablja 20 °C. Ta ločnica je uradno opredeljena tudi v Avstriji (ÖWAV, 2010) in na Slovaškem (NATIONAL COUNCIL OF THE SLOVAK REPUBLIC, 2007), medtem ko je na Madžarskem spodnja meja za omenjeno oznako 30 °C (HUNGARIAN PARLIAMENT, 1995). Severovzhodna Slovenija je ena najperspektivnejših regij za rabo geotermalne energije. Za opis stanja trenutne rabe geotermalnih vodonosnikov smo izvedli terenski popis rabe termalne vode pri uporabnikih. Z njimi smo dopolnili arhivske podatke o stanju, namenu uporabe in termalni moči posameznih virov, ki se sistematično zbirajo in interpretirajo že več kot petnajst let (RAJVER et al., 1995; KRALJ & RAJVER, 2000; RAJVER & LAPANJE, 2005; RAJVER et al., 2010). Najnovejši zbor energetskih informacij kaže, da raba geotermalne energije narašča predvsem zaradi večjega števila vgrajenih geotermalnih toplotnih črpalk, predvsem za individualne stavbe, in ne toliko zaradi dodatnega zajema termalne vode (LAPANJE et al., 2010).

Arhivske podatke o geotermalnih vrtinah smo v letih 2008–2011 dopolnili z različnimi skupinami parametrov. *Osnovni podatki o uporabniku termalne vode* sestojijo iz njegovih kontaktnih podatkov, kot so ime, naslov in spletna stran podjetja ter njihovi razpoložljivi vodni viri, torej geotermalne vrtine ali izviri. Opis termalnega vira sestoji iz več skupin. *Tehnične lastnosti objekta* sestajajo lokacijo vodnega vira, čas, namen in globino vrtanja ter cevitev, usmerjenost vrtine in globino odprtih intervalov. Iz njih smo določili glavne zajete vodonosnike, njihove *hidrogeološke lastnosti* pa smo opredelili s tipom poroznosti, izdatnostjo in temperaturo vode ter ugotovljenim medsebojnim vplivom med vrtinami. *Proizvodne značilnosti* vsebujejo podatke o obdobju delovanja vrtine, načinu pridobivanja vode, dejanskem letnem odvzemu oziroma opredeljenem v koncesijah ter tehnoloških težavah in spremembah zaradi rabe. Vpliv odvzema podzemne vode na količinsko in kakovostno stanje geotermalnih vodonosnikov je možno oceniti le, če so na voljo kvalitetni podatki spremljanja njihovega stanja, zato smo preverili delovanje *opazovalnega sistema geotermalnih vrtin* oziroma pogostost in vrsto vzpostavljenega obratovalnega monitoringa

piezometrične gladine, odvzema, temperature in kemijske sestave termalne vode. Za grobo oceno vpliva rabe termalne vode na okolje smo popisali *ravnanje z odpadno termalno vodo*, njeno temperaturo na iztoku v okolje ter lokacijo izpusta.

Zbrane podatke smo poenotili in organizirali v MS Office Access in SQL podatkovnih bazah, pridobljene informacije pa interpretirali in prikazali z različnimi statističnimi in prostorskimi tehnikami z računalniškimi programi MS Office Excel, Statistica in ArcGIS. Prostorski podatki o vrtinah so dostopni na spletnih straneh http://akvamarin.geo-zs.si/t-jam_boreholes/ in na Geopediji (GEOPEDIA.SI, 2006), interaktivna podatkovna baza uporabnikov na spletnem naslovu <http://akvamarin.geo-zs.si/users/>, medtem ko so interpretirani podatki o rabi termalne vode dostopni kot poročila v pdf datotekah preko spletnih strani <http://www.t-jam.eu> in <http://transenergy-eu.geologie.ac.at/>.

Rezultati

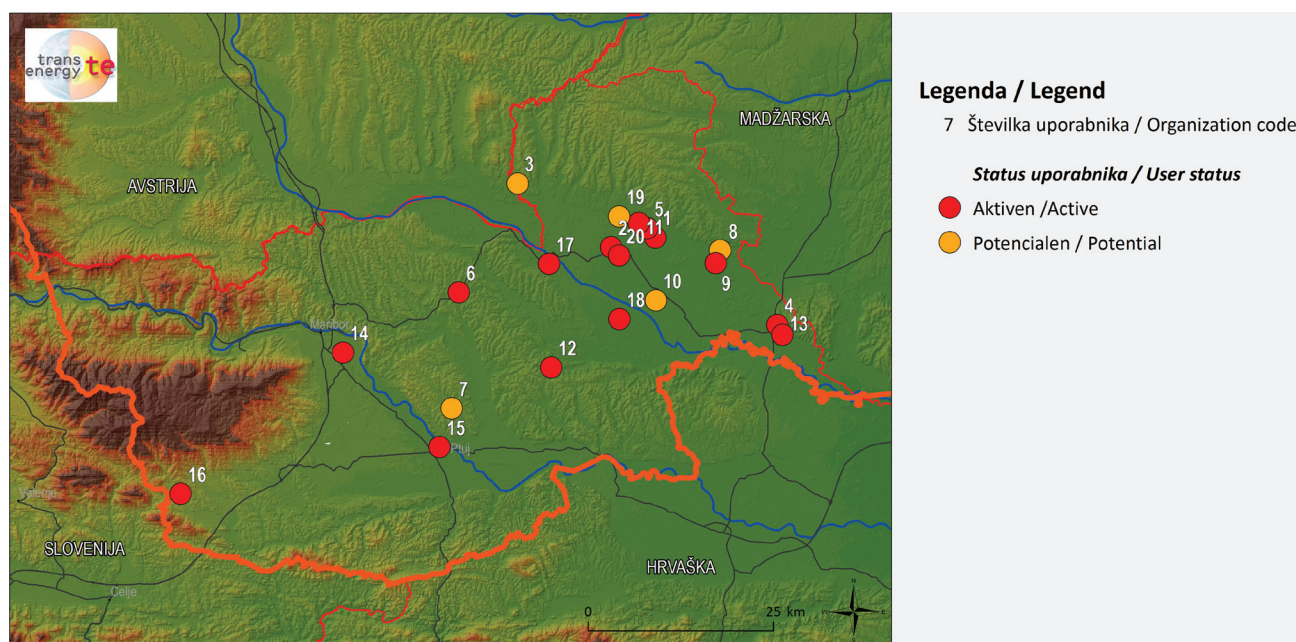
V raziskavi smo omejili 3941 km² veliko območje vzhodno od Zreč in Maribora, ki pokriva slovenski del Mursko-Zalskega bazena (sl. 3). V njem smo popisali 15 uporabnikov, ki so v l. 2011 pridobivali termalno vodo iz 26 geotermalnih vrtin, z eno pa jo vračali v vodonosnik. Poleg njih smo v raziskavo vključili 5 potencialnih uporabnikov (preglednica 1). Ugotovili smo, da je gostota aktivnih uporabnikov približno eden na 250 km², medtem ko v povprečju obratuje ena geotermalna vrtina na 145 km² (ustreza velikosti Občine Moravske Toplice). Zaradi geoloških in demografskih danosti ter različne stopnje raziskanosti geotermalnih vodonosnikov porazdelitev obstoječih uporabnikov seveda ni enotna. Največ jih je v Murski Soboti in Moravskih Toplicah,

kjer odvzem termalne vode sega že več desetletij v preteklost.

Poleg naštetih vrtin velja omeniti, da so bile številne opuščene raziskovalne naftne vrtine po l. 2000 sanirane (sl. 4). Tri izmed njih služijo kot opazovalne točke raziskovalnega monitoringa stanja vodonosnika v Murski formaciji, ostale pa so pripravljene na izrabo (GEOPEDIA.SI, 2006; MAUČEC, 2006; LAPANJE et al., 2011). Poleg obstoječih, je bila konec l. 2011 izvrtana nova geotermalna vrtina Re-1g v Renkovcih, ki je še v testni fazi, jeseni 2012 pa je bila dokončana tudi nova vrtina Sob-3g v Černelavcih pri Murski Soboti (KRALJIC & TURK, 2010).

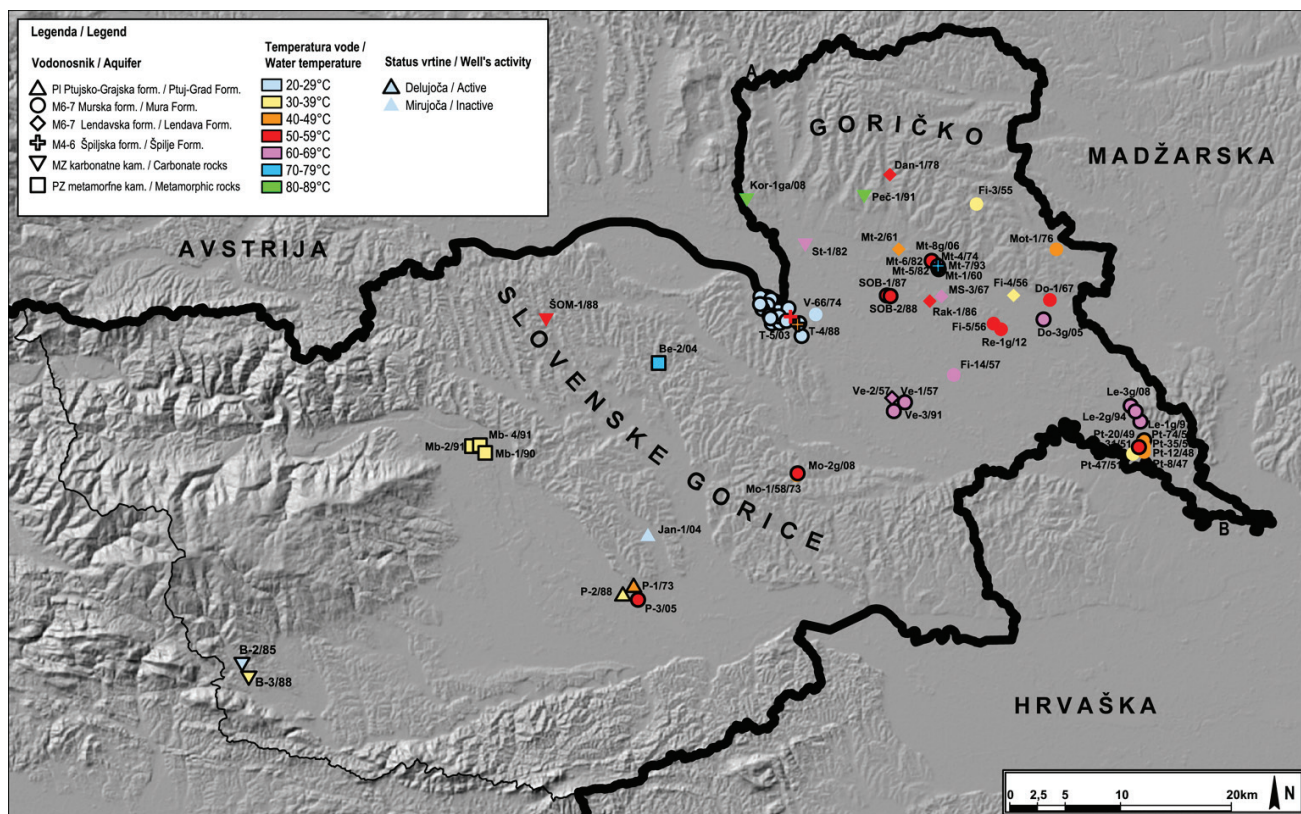
Odvzem termalne vode skozi čas

Na območju SV Slovenije so do 60. let prejšnjega stoletja izkoriščali le mineralno vodo v Radencih (ZLEBNIK, 1978). Vodonosniki v metamorfnih kamninah v podlagi so bili zajeti šele l. 1992 v Mariboru in l. 2006 v Benediktu v Slovenskih goricah, medtem ko je dolomitni vodonosnik že od 80. let prejšnjega stoletja zajet v Zrečah. Njihov skupni odvzem je l. 2011 dosegel 0,160 mio m³. Pri neuspešnih raziskavah nafte in plina v Pomurju so kmalu ugotovili, da je »črna naftna« voda iz Špiljske formacije zdravilna (CIGIT, 1975; SZABO, 1975), zato se je po letu 1962 pričel razvoj zdravišiš v Banovcih, Radencih in Moravcih (PLENIČAR, 1954; LAPANJE & RMAN, 2009). Lokalni pomen tega razvoja se kaže celo v preimenovanju kraja Moravci v Moravske Toplice l. 1984 (SEVER, 1993). Ko so kopališča pričela obratovati skozi celo leto, se je odvzem vode nekoliko povečal (sl. 5), a zaradi tehnološko zahtevnejše izrabe ni večjih novih zajemov. V letu 2011 je odvzem te vode dosegel 0,210 mio m³. Le v Banovcih se pridobiva voda pretežno iz Lendavske formacije v količini, ki je

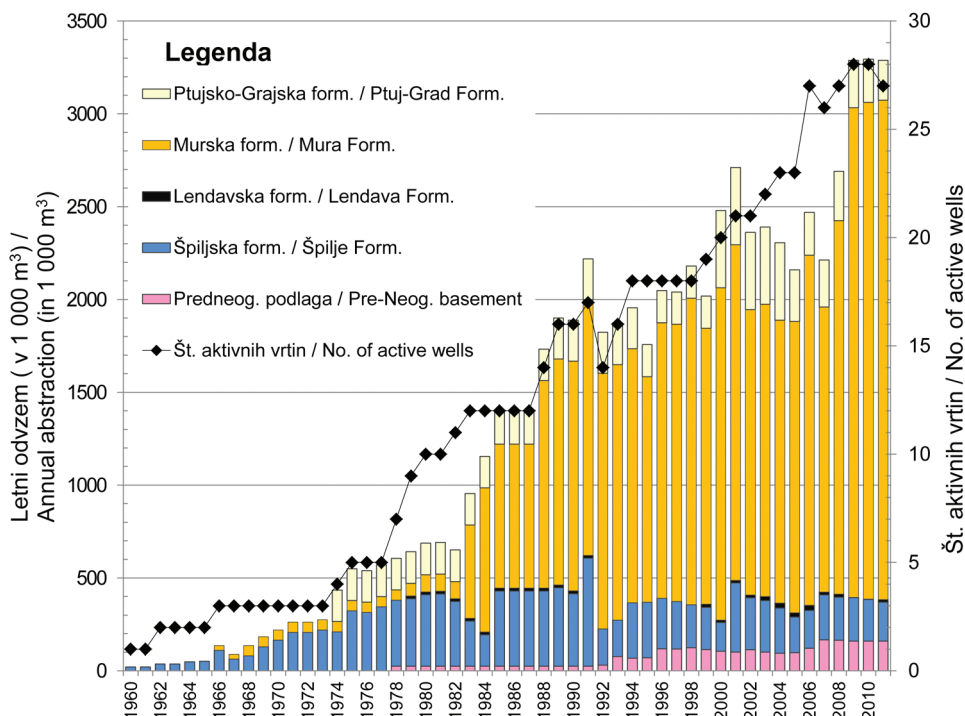


Sl. 3. Obstoječi in potencialni uporabniki termalne vode v SV Sloveniji

Fig. 3. Active and potential thermal water users in NE Slovenia



Sl. 4. Geotermalne vrtine na raziskanem območju glede na prevladujoči vodonosnik in temperaturo vode na ustju
Fig. 4. Geothermal wells in the investigated area classified by prevailing aquifer and water wellhead temperature



Sl. 5. Število aktivnih vrtin in skupni letni odvzem termalne vode iz geotermalnih vodonosnikov v SV Sloveniji v obdobju 1960–2011

Fig. 5. Number of active geothermal wells and total annual thermal water abstraction from geothermal aquifers in NE Slovenia in period 1960–2011

l. 2011 dosegla 0,014 mio m³. Iz Murske formacije črpajo »belo« vodo, ki je bila okoli l. 1970 zajeta z opuščeniimi naftnimi vrtinami v Moravcih v Slovenskih goricah in Petišovcih. Prva geotermalna vrtina v tej formaciji je bila izdelana l. 1983 v Moravcih in z njo se je pričela raba geotermalne energije za ogrevanje. V naslednjem desetletju so

sledile nove vrtine na tej lokaciji, v Banovcih in Murski Soboti, po letu 2000 pa še v Dobrovniku, Lendavi in Renkovcih ter na Ptuj. Peski Murske formacije so zelo izdatni. Voda iz te formacije ne povzroča tehnoloških težav, zato je njen letni odzjem visok in je v l. 2011 dosegel 2,690 mio m³. Nekaj termalnih vrtin poleg Murske zajema tudi

Preglednica 1. Seznam uporabnikov termalne vode na območju SV Slovenije (številke so prikazane na slikah 4–16)

Table 1. List of thermal water users in the NE Slovenia (codes are used on figures 4–16)

Št. vrtine / Well's code	Št. uporabnika / User code	Ime uporabnika / Organization name	Vir termalne vode / Thermal water source	Pridobivanje vode / Water production
1	16	Unior Kovaška industrija d.d.	B-2/85	Da
2	16	Unior Kovaška industrija d.d.	B-3/88	Da
3	6	Občina Benedikt	Be-2/04	Da
4	8	Občina Dobrovnik	Do-1/67	Ne
5	9	Ocean Orchids, d.o.o.	Do-3g/05	Da
6	10	Panonska energetika, upravljanje z energijo d.o.o.	Fi-14/57	Ne
7	7	Občina Destrnik	Jan-1/04	Ne
8	3	Kotrman d.o.o.	Kor-1gα/08	Ne
9	13	Terme Lendava d.d.	Le-1g/97	Da
10	4	Nafta Geoterm, d.o.o.	Le-2g/94	Da
11	4	Nafta Geoterm, d.o.o.	Le-3g/08	Reinjekcija
12	14	Terme Maribor, d.d.	Mb-1/90	Da
13	14	Terme Maribor, d.d.	Mb-2/91	Da
14	14	Terme Maribor, d.d.	Mb-4/91	Da
15	12	Segrap d.o.o.	Mo-1/58/73	Ne
16	12	Segrap d.o.o.	Mo-2g/08	Da
17	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-1/60	Da
18	19	Zdravilišče Rimska Čarda d.o.o.	Mt-2/61	Ne
19	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-4/74	Da
20	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-5/82	Ne
21	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-6/82	Da
22	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-7/93	Da
23	11	Počitek – užitek, turistično podjetje d.o.o.	Mt-8g/06	Da
24	15	Terme Ptuj d.o.o.	P-1/73	Da
25	15	Terme Ptuj d.o.o.	P-2/88	Da
26	15	Terme Ptuj d.o.o.	P-3/05	Da
27	13	Terme Lendava d.d.	Pt-20/49	Da
28	13	Terme Lendava d.d.	Pt-74/50	Da
29	2	Komunala, Javno podjetje, d.o.o.	Sob-1/87	Da
30	20	Zvezda Diana d.o.o.	Sob-2/88	Da
31	17	Zdravilišče Radenci d.o.o.	T-4/88	Da
32	17	Zdravilišče Radenci d.o.o.	T-5/03	Ne
33	18	Terme Banovci	Ve-1/57	Da
34	18	Terme Banovci	Ve-2/57	Da
35	18	Terme Banovci	Ve-3/91	Da
-	1	Grede Tešanovci, d.o.o.	Termalni odpad Term 3000	-

Preglednica 2. Aktivne in mirujoče geotermalne vrtine v SV Sloveniji v letu 2011

Table 2. Active and inactive geothermal wells in the NE Slovenia in 2011

Stanje vrtine / Well's status		Mirujoča / Inactive	Aktivna / Active	Reinjekcijska / Reinjection	Skupaj / Total
Neogenski vodonosniki (formacije) / Neogene aquifers (formations)	Ptujsko-Grajska / Ptuj-Grad	1	2	0	3
	Murska / Mura	13	14	1	28
	Lendavska / Lendava	5	1	0	6
	Špiljska / Špilje	3	3	0	6
Predneogenski vodonosniki / Pre-Neogene aquifers	Karbonatne kamnine / Carbonate rocks	3	2	0	5
	Metamorfne kamnine / Metamorphic rocks	0	4	0	4
Skupaj / Total		25	26	1	52

Lendavsko formacijo, a je delež vode iz slednje večinoma pod 5 %. Prva namenska geotermalna vrtina na tem območju je bila izvrtana l. 1973 na Ptujju ter je zajela termalno vodo v Ptujsko-Grajski formaciji. Zaradi relativno nizke temperature vode je njen odvzem še vedno nizek in je l. 2011 dosegel 0,215 mio m³.

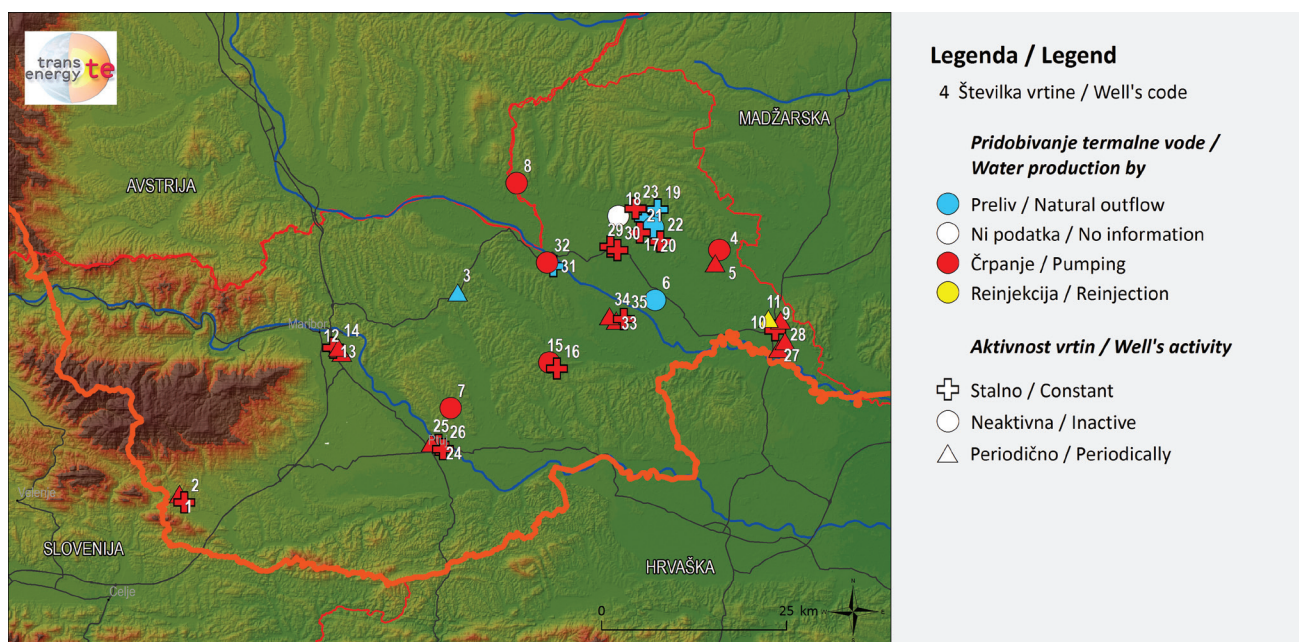
Povzamemo lahko, da je bilo l. 2011 na raziskanem območju SV Slovenije stalno ali občasno aktivnih 26 proizvodnih in 1 reinjekcijska vrtina (preglednica 2), s katerimi je bilo pridobljenih 3,289 mio m³ termalne vode. Poleg njih se je iz napajalnega zaledja regionalnih geotermalnih vodonosnikov z več kot 300 plitvimi vodnjaki načrpalo več milijonov m³ pitne in mineralne vode, katerih skupni letni odvzem po vodnih dovoljenjih lahko doseže 22 mio m³, s čimer je napajanje termalne vode bistveno znižano. Pričakovano je, da bo odvzem termalne vode naraščal, saj zaprošena letna količina odvzema v koncesijah za rabo termalne vode (z upoštevanjem 100 % reinjekcijo v Lendavi) presega 6 mio m³ (RMAN et al., 2011). Večina novih uporabnikov odvzema termalno vodo iz Murske formacije in nadaljevanje tega trenda pričakujemo tudi v prihodnje.

Pridobivanje termalne vode

Način pridobivanja termalne vode je odvisen predvsem od hidravličnega stanja geotermalnega vodonosnika (sl. 6). Voda iz arteških razpoklinskih vodonosnikov v podlagi sedimentacijskega bazena v Zrečah in Mariboru se pridobiva s črpalkami. Skupni optimalni odvzem v Zrečah je približno 8 l/s, v Mariboru pa zaradi omejenega napajanja ni mogoče odvezati več od 1,5 l/s. V Benediktu je zaradi velike vsebnosti prostega CO₂ učinek plinskega dviga (*ang. gas lift*) zelo izrazit in voda prelija s približno 8 l/s. Termal-

na voda iz razpoklinsko-medzrnskih vodonosnikov Špiljske in Lendavske formacije prelija iz vrtin v Radencih, Banovcih in Moravskih Toplicah zaradi plinskega in toplotnega (*ang. thermo lift*) dviga. V prvem primeru je iztok pod 2 l/s, v drugih dveh pa nekoliko večji, a še vedno le do 5 l/s iz posamezne vrtine. Termomineralna voda vsebuje veliko CO₂, zato morajo v vrtine dodajati inhibitor, ki preprečuje obarjanje mineralov v njej in v cevovodu sistema za izrabo. Na ustju vrtin prosti CO₂ ločujejo in odvajajo v atmosfero. V Moravskih Toplicah voda vsebuje tudi pomembno količino ogljikovodikov. Termalna voda iz medzrnskega vodonosnika Murske formacije večinoma še naravno prelija zaradi toplotnega dviga, a je količina iztoka bistveno nižja kot ob pričetku rabe. Začetna izdatnost je bila do 60 l/s, sedanjí največji odvzem s črpalko pa je v razponu 10–30 l/s, odvisno od posamezne vrtine. Voda se uporablja predvsem za ogrevanje, kjer je potreben pretok reda velikosti 10 l/s, in to je mogoče zagotoviti le z uporabo potopnih črpalk. Ta voda skorajda ne vsebuje prostega CO₂ in je tehnološko nezahtevna za izrabo. Pri delovanju premočnih črpalk ponekod iz vrtin iznaša drobnozrnato frakcijo, ki jo je potrebno pred vtokom termalne vode v sistem odstraniti s filtriranjem. Tudi v Lendavi, kjer reinjektirajo toplotno izrabljeno vodo, je vodonosnik še arteški, zato za vtiskanje uporabljajo kompresorje. Vrtine v Ptujsko-Grajski formaciji skorajda ne prelivajo več, odvzem s črpalko pa dosega povprečno 8 l/s.

S črpalnimi poizkusi so bile dokazane hidravlične povezave med bližnjimi vrtinami, od tega 2 posegata v Ptujsko-Grajsko formacijo, 17 v Mursko, 2 v Špiljsko in 5 v vodonosnike v predneogenski podlagi. Ena še neaktivna vrtina ima odprte intervale sočasno v Haloški formaciji in predneogenski podlagi, dve obenem posegata v Špiljsko in Lendavsko formacijo, v desetih pa je



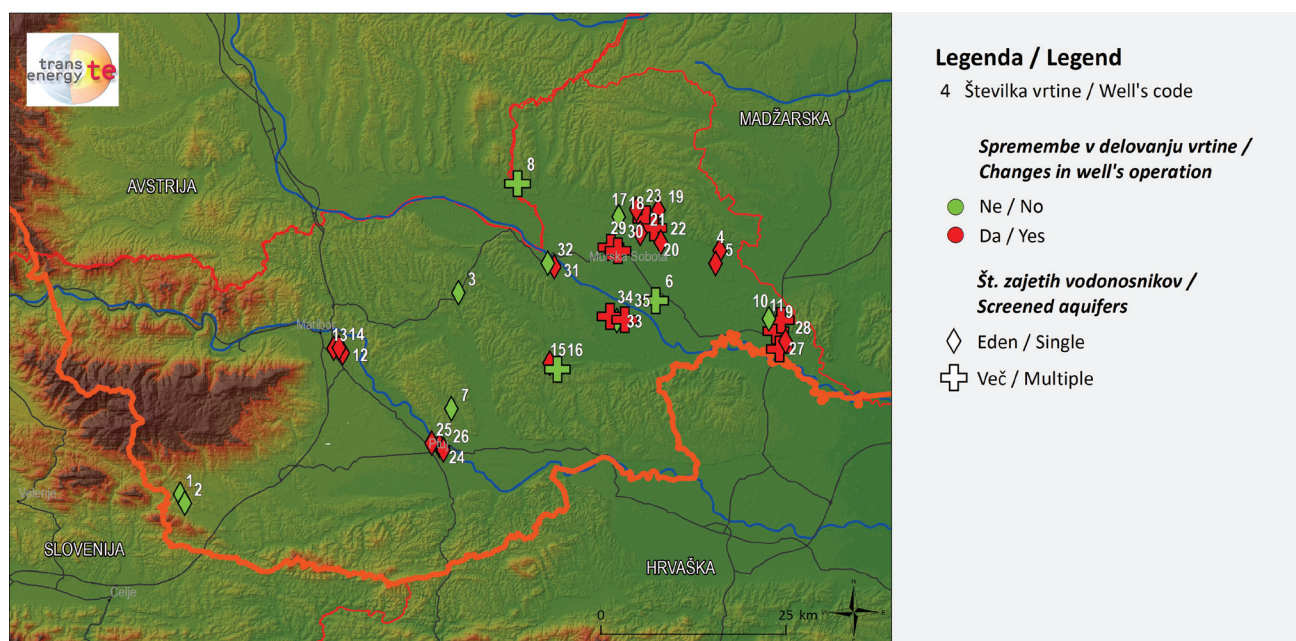
Sl. 6. Način pridobivanja termalne vode ter obdobje obratovanja vrtin
Fig. 6. Thermal water abstraction type and period of well's activity

ob Lendavski zajeta tudi Murska formacija. Kar 9 aktivnih vrtin (35 %) sočasno pridobiva vodo iz dveh formacij (sl. 7). To je v nasprotju s smernicami Vodne direktive (2000/60/EC), saj omogoča umetno pretakanje vode med sicer hidravlično ločenimi vodonosniki. S pravilno tehnično izgradnjo vrtine je možen hkraten ločen odvzem vode iz več odprtih intervalov, kar potrjuje uspešno delovanje vrtine Mt-8g v Moravskih Toplicah.

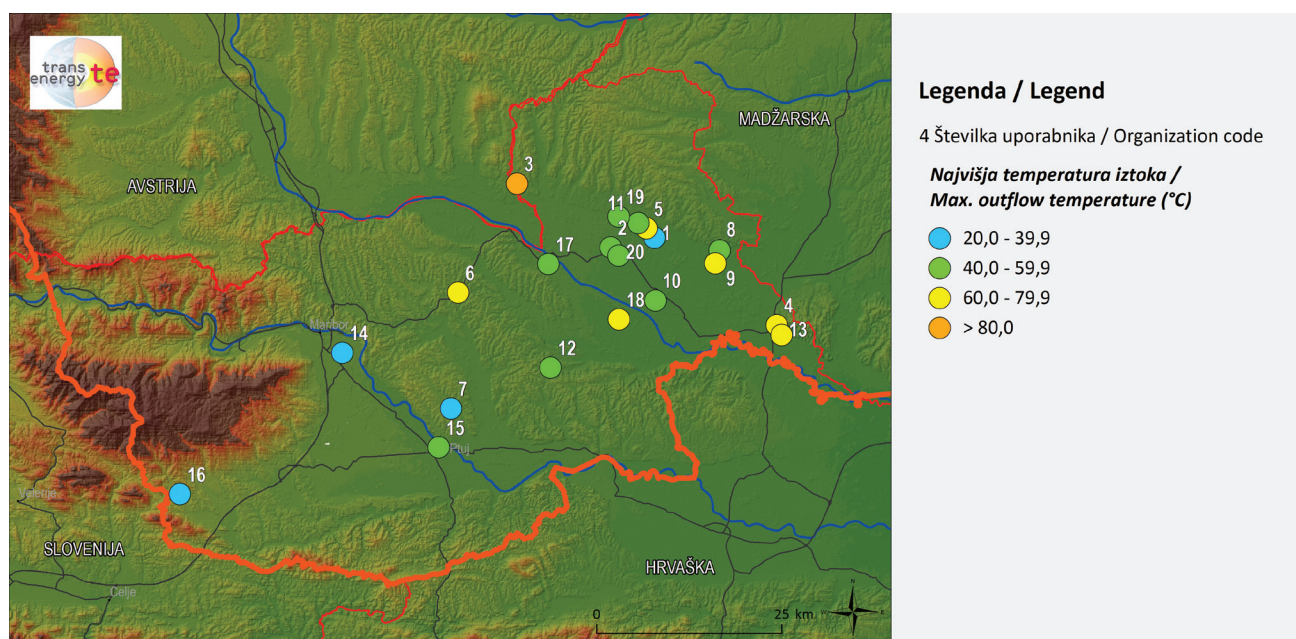
V letu 2011 je bilo stalno aktivnih 15 vrtin, občasno pa še 12 (sl. 6). Osem jih je obratovalo v hladnejšem delu leta, pretežno med oktobrom in aprilom, saj se je voda uporabljala za ogrevanje prostora ter rastlinjakov. Nasprotno so v Zrečah

in na Ptuj poleti aktivirali nekatere vrtine za polnjenje dodatnih bazenov v letnih kopališčih.

Zaradi dolgotrajnega odvzema termalne vode so na 24 geotermalnih vrtinah opazili hidravlične spremembe (sl. 7). V primeru neustrezno izdelanih, vzdrževanih ali uporabljenih vrtin, še posebno starejših, so lahko spremembe posledica poslabšanja stanja same vrtine ter bližnje okolice, ne pa stanja vodonosnika. Zato bodo za natančen opis regionalnega stanja vodonosnikov ter vzrokov in posledic opaženega potrebne nadaljnje raziskave. Kljub temu lahko omenimo, da so spremembe najpogosteje izražene kot znižanje piezometrične gladine podzemne vode, zaradi če-



Sl. 7. Število zajetih vodonosnikov v vrtini ter opažene spremembe v njenem delovanju
Fig. 7. Number of captured aquifers in a single well and noticed changes in its operation



Sl. 8. Najvišja temperatura iztoka termalne vode po uporabnikih
Fig. 8. The highest thermal water outflow temperature at user sites

sar je bilo potrebno v prvotno samoizlivne vrtine namestiti črpalko ali pa jo spustiti globlje. V Moravskih Toplicah (SZČS et al., 2012) in Murski Soboti (KRALJ & KRALJ, 2000a; KRALJ et al., 2009) je dokazano tudi spreminjanje kemijske sestave vode. Skoraj povsod voda preliva v bistveno manjši količini kot ob pričetku rabe, medtem ko spremembe temperature podzemne vode še niso bile spremljane dovolj sistematično, da bi lahko ocenili njihovo velikost. Hidravlične spremembe so ugotovljene v vseh geotermalnih vodonosnikih v SV Sloveniji, njihova izrazitost pa je odvisna od trajanja izkoriščanja in prostorske porazdelitve proizvodnih vrtin.

Temperatura termalne vode

Potreba po termalni vodi je pogojena z namenom njene uporabe in temperaturo iztoka. Najvišja ugotovljena temperatura na ustju trenutno neaktivne vrtine dosega 83 °C v Korovcih (sl. 8), kjer sta zajeta vodonosnika Haloške formacije in karbonatnih kamnin v podlagi sedimentacijskega bazena (sl. 4). Voda s temperaturo 72 °C se uporablja v Benediktu, kjer so zajete

metamorfne kamnine v podlagi, in Moravskih Toplicah, kjer izteka »črna naftna« voda iz Špiljske formacije. Visoko temperaturo dosega tudi termalna voda iz Murske formacije v Banovcih (62 °C), Dobrovniku (62 °C) in Lendavi (66 °C). Ostali uporabniki, ki izkoriščajo Murski vodonosnik, in nekatere mirujoče vrtine zajemajo vodo z nekoliko nižjo temperaturo iztoka, do 50 °C. Termalna voda iz metamorfnih kamnin v Mariboru se zaradi nizkega pretoka do ustja vrtine ohladi na 39 °C, medtem ko je voda iz dolomita v Zrečah še hladnejša in dosega okoli 30 °C. V Janežovcih je v Ptujsko-Grajski formaciji identificirana termalna voda z 28 °C na ustju vrtine, vendar se ne uporablja. Enako velja za vrtino v Rimski Čardi, kjer iz Lendavske formacije teče termalna voda s 36 °C na ustju vrtine.

Uporaba termalne vode

Raba termalne vode je v največji meri povezana z njeno temperaturo. Uporaba geotermalne toplote je bolj raznovrstna, kot je bila pred leti (RAJVER et al., 1995; KRALJ & RAJVER, 2000; RAJVER & LAPANJE, 2005; RAJVER et al., 2010), a še ve-

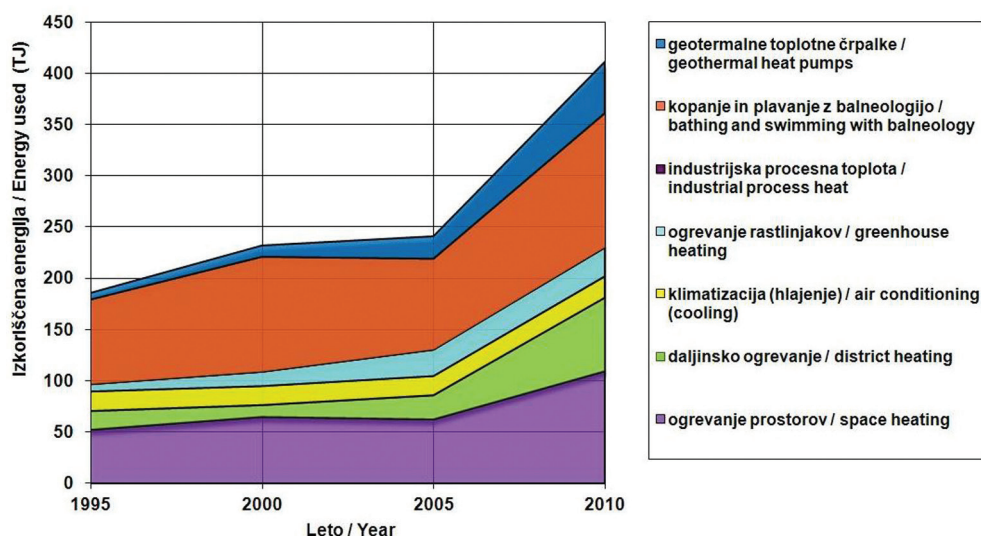
Preglednica 3. Izkoriščanje geotermalne energije za direktno rabo toplote v SV Sloveniji v l. 2010 (brez geotermalnih toplotnih črpalk). Številka uporabnika je enaka kot v preglednici 1.

Table 3. Utilization of geothermal energy for direct heat use in NE Slovenia in 2010 (without GHPs). User code is the same as in Table 1.

Štev. uporabnika / User code	Kategorija / Type ¹⁾	Najvišja možna raba / Max. utilization			Kapaciteta / Capacity (MWt)	Letno koriščenje / Annual Utilization		
		Pretok / Flow rate (kg/s)	Temp. / Temp. (°C)			Povp. pretok / Ave. Flow (kg/s)	Energija / Energy (TJ/yr)	Razpoložljivost/ Capacity Factor
			Vhodna / Inlet	Izhodna / Outlet				
1	G	27,8	40	30	1,16	8,3	11,0	0,30
2	D,B	10,3	49	30	0,82	9,8	24,6	0,95
4	D	25	66	40	2,72	15,0	51,4	0,60
5	H,C,B	87	61	15	15,65	30,9	126,8	0,26
6	D	10	72	55	0,71	2,1	3,1	0,14
9	G	30	62	15	5,90	2,8	17,0	0,09
11	H,C,B	12	60	29	1,56	3,8	14,5	0,30
12	H,B	22	48	27	1,97	7,1	20,5	0,33
13	H,B	14	59	30	1,70	6,7	26,1	0,49
14	B	1,5	39	13	0,16	1,4	4,8	0,95
15	H,B	23	41	29	1,15	14,0	24,6	0,68
16	H,B	27	31	26	0,57	15,0	9,0	0,50
17	B	6,5	42	28	0,38	0,3	0,5	0,04
18	H,B	24	62	15	4,59	3,7	15,8	0,11
20	H,B	12	43	22	1,05	4,5	10,6	0,32
Skupaj/Total		331,6			40,09	125,36	360,4	0,29

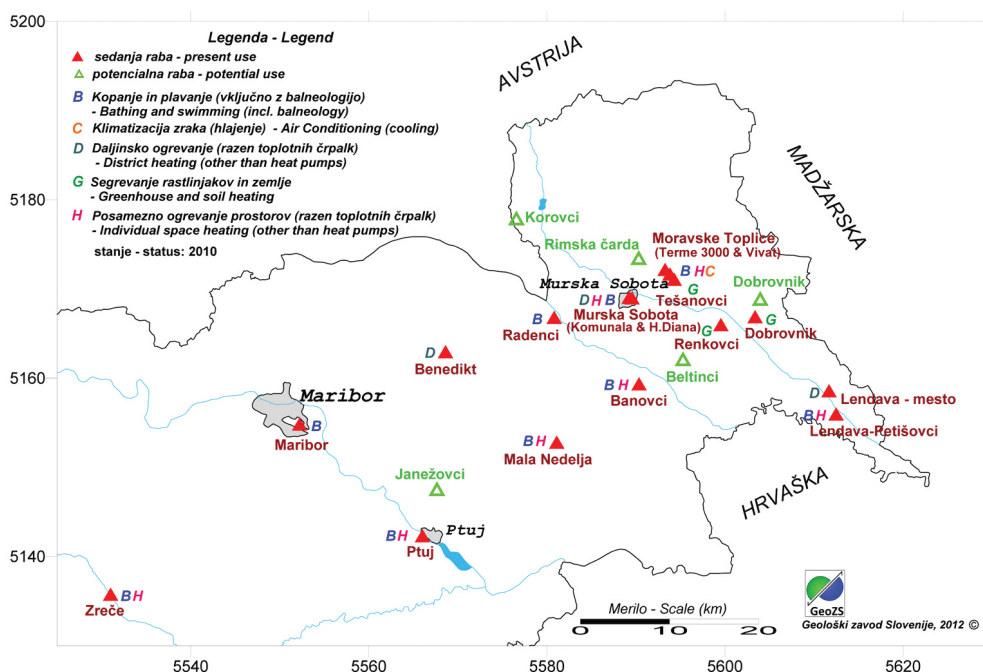
¹⁾ Kategorije rabe / Types of use:

H = Individualno ogrevanje prostorov (vse razen toplotnih črpalk) / Individual Space Heating (other than heat pumps)
D = Daljinsko ogrevanje (vse razen toplotnih črpalk) / District Heating (other than heat pumps)
C = Klimatizacija zraka (hlajenje) / Air Conditioning (cooling)
B = Kopanje in plavanje (vklj. balneologija) / Bathing and Swimming (incl. Balneology)
G = Segrevanje rastlinjakov in zemlje / Greenhouse and Soil Heating



Sl. 9. Izkoriščena geotermalna energija v SV Sloveniji v obdobju 1995–2010; skupna izkoriščena energija v letu 2010: 411 TJ

Fig. 9. Geothermal energy used in NE Slovenia in a period 1995–2010; total energy used in 2010: 411 TJ

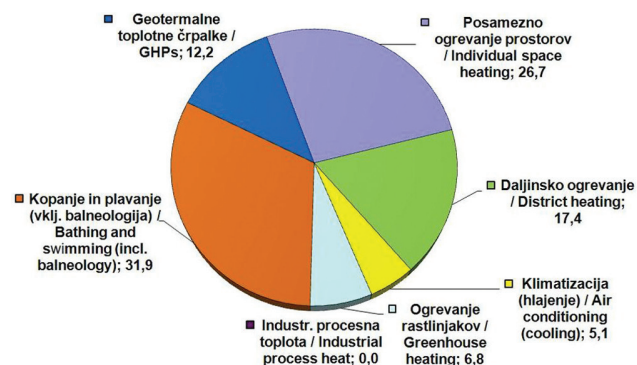


Sl. 10. Vrste neposredne rabe toplote termalne vode

Fig. 10. Categories of direct heat use of thermal water

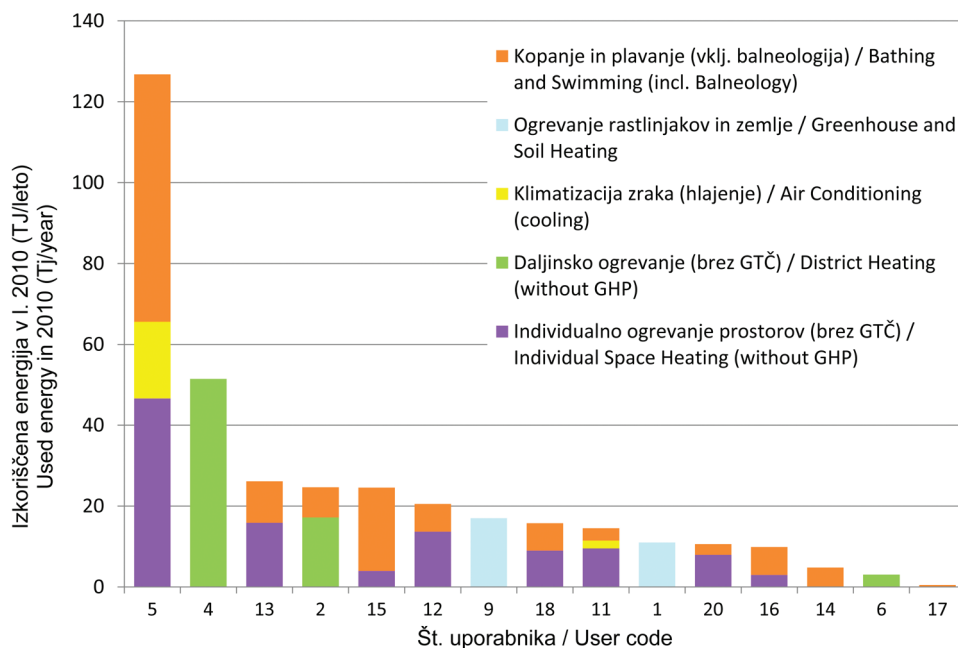
dno prevladuje posamezno ogrevanje prostorov in polnjenje bazenov za balneologijo (sl. 10 in 11). Posodobljen pregled izkoriščene geotermalne energije po uporabnikih v l. 2010 kaže preglednica 3 in slika 9. Na sliki 9 je vključena tudi energija, pridobljena z geotermalnimi toplotnimi črpalkami, ki so večinoma manjših moči in služijo individualnemu ogrevanju stavb. Njihovi podatki so zaradi nepopolnih evidenc le ocenjeni iz skupnih števil za celo Slovenijo (RAJVER et al., 2010). V preglednico 3 je vključenih vseh 15 aktivnih uporabnikov termalne vode, brez podatkov za individualne GTČ. V kolikor ima en uporabnik več vodnih virov, se njegova kapaciteta izračuna na podlagi utežene povprečne vrednosti temperatur in pretokov iz vseh vrtin skupaj (3. in 4. stolpec v preglednici 3) pri najnižji možni izhodni temperaturi vode. Količine o letni izkoriščeni energiji (8. stolpec v preglednici 3) so izračunane na podlagi dejanskih vhodnih in izhodnih temperatur termalne vode ter celoletnega odvzema iz posamične vrtine.

Tako inštalirana kapaciteta kot izkoriščena geotermalna energija beležita porast v zadnjih 15 letih pri vseh uporabnikih, ki je najbolj izrazit po l. 2005. V nekaterih kategorijah rabe je iznos



Sl. 11. Deleži izkoriščene geotermalne energije (%) po kategoriji direktne rabe v letu 2010 v SV Sloveniji

Fig. 11. Geothermal direct applications in 2010, distributed by percentage of total energy use in NE Slovenia



Sl. 12.
Izkoriščena geotermalna energija v letu 2010 po uporabnikih in kategorijah rabe

Fig. 12.
Used geothermal energy in 2010 by users distributed in categories of use

izkoriščene energije do l. 2005 naraščal počasneje (posamezno ogrevanje prostorov, ogrevanje rastlinjakov, GTČ) ali pa sploh ne (kopanje in plavanje z balneologijo, klimatizacija). Razmeroma nizka razpoložljivost z 29 % kaže na razmeroma slabo izkoriščenost razpoložljive geotermalne energije.

Znižanje izkoriščene geotermalne energije v kategoriji kopanje in plavanje z balneologijo je posledica manjšega letnega odvzema termalne vode iz posameznih vrtin v l. 2005 glede na l. 2000 in natančnejših podatkov za zadnje obdobje (sl. 9). Razlike so v oceni izkoriščene geotermalne energije v Termah 3000, Termah Ptuj, Termah Maribor in Zvezdi Diani in nekoliko manj izrazite v Termah Radenci in Banovci. Istočasno se je sicer lahko povečal odvzem iz drugih vrtin ali pa so se aktivirale vrtine, ki prej niso delovale, vendar je skupna bilanca odvzema še vedno nižja kot prej. V obdobju 2005–2010 se je povečal delež izkoriščene energije za posamezno ogrevanje prostorov in daljinsko ogrevanje (z nastopom le-tega v Lendavi in Benediktu) ter za manjše GTČ, manj pa za kopanje in plavanje.

Na obravnavanem območju smo z opravljeno raziskavo popisali 9 termalnih zdravilišč in kopališč (sl. 10). Razveseljivo je, da je kaskadna raba termalne vode pogosta, saj v sedmih primerih s termalno vodo najprej ogrevajo prostore (hotelske stavbe toplic in zdravilišč, bungalove, ipd.) in/ali sanitarno vodo, nato pa jo uporabijo za balneologijo in/ali polnjenje bazenov. Tu delujejo tudi trije sistemi daljinskega ogrevanja mest: Benedikta, Lendave in Murske Sobote, ki obratujejo v hladni polovici leta. V Lendavi je v okviru tega vzpostavljen geotermalni par vrtin in s tem delujoča reinjekcijska vrtina, edina v Sloveniji. Prav tako imajo le tu vzpostavljen sistem taljenja snega na javnih površinah. Rastlinjaka orhidej v Dobrovniku in paradižnika v Tešanovcih se ogrevata pretežno v zimskem času. Ker je temperatura termalne vode v Zrečah relativno nizka, služi

vrtina B-2 kot rezervni vodni vir za oskrbo prebivalcev s pitno vodo, običajno pa se uporablja kot dodatni vodni vir za kopališče. Izmed petih v raziskavo vključenih neaktivnih vrtin je predvideno, da se bodo Jan-1, Kor-1gα in Mt-2 uporabljale v kopališčih in zdraviliščih, Do-1 in Fi-14 pa za ogrevanje prostorov (sl. 11).

Največji koristnik termalne vode za direktno rabo toplote so Terme 3000 v Moravskih Toplicah (sl. 12). Sledijo Nafta Geoterm z daljinskim ogrevanjem Lendave, Terme Lendava z ogrevanjem prostorov in bazenske vode, Terme Ptuj z ogrevanjem bazenske vode in prostorov ter Komunala Murska Sobota z daljinskim ogrevanjem dela mesta.

Opazovanje stanja geotermalnih vodonosnikov

Vpliv odvzema termalne vode na količinsko in kakovostno stanje geotermalnih vodonosnikov lahko raziskujemo, če imamo na voljo časovne nize primerljivih meritev. Izmed 27 aktivnih vrtin v l. 2011 so v 10 (37 %) vsaj občasno izmerili piezometrično gladino podzemne vode, v 6 (22 %) pa je podatek pridobljen dnevno. Na 15 (56 %) vrtinah so vsaj občasno preverili temperaturo iztoka, dnevne meritve pa so opravljali le na tretjini vrtin. Nekoliko pogosteje so ugotavljali količino iztoka, saj so za 21 (78 %) vrtin dostopni podatki o celoletnem odvzemu termalne vode, spet pa je dnevni odvzem merjen le pri tretjini vseh aktivnih vrtin. Sistematičnih letnih kemičnih analiz termalne vode v času našega pregleda stanja v severovzhodni Sloveniji še ni bilo. Najpogostejše se kemijska sestava vode ugotavlja le občasno v okviru različnih raziskovalnih nalog in med preprečevanjem tehnoloških težav pri izrabi termalne vode.

Splošno stanje obratovalnega monitoringa ocenjujemo kot neustrezno, kajti gladino, temperaturo in odvzem termalne vode je potrebno

spremljati vsaj dnevno, saj se tekom leta potrebe po termalni vodi in s tem njene lastnosti spreminjajo. Slabo stanje monitoringa je posledica le redkih podeljenih koncesij za rabo termalne vode, zato ga uporabniki še niso dolžni vzpostaviti. Nekaj se jih zaveda pomena kvalitetnih meritev, ki omogočajo prilaganje odvzema vode dejanskim potrebam in s tem dolgoročno trajnostno rabo geotermalne energije, zato se stanje kljub pomanjkljivemu upravljanju z geotermalnimi viri počasi izboljšuje.

Ravnanje z izrabljeno termalno vodo

Dobro količinsko stanje geotermalnih vodonosnikov se ohranja, kadar odvzem vode bistveno ne presega naravnega ali antropogenega napajanja sistema. Na žalost le Nafta Geoterm vrača toplotno izrabljeno termalno vodo v nazaj v vodonosnik. V Lendavi odpadno vodo iz sistema daljinskega ogrevanja mesta s temperaturo nad 40 °C vtiskujejo v peske Murske formacije, kar je trenutno edini primer trajnostne rabe geotermalne energije pri nas. V Moravskih Toplicah lahko kot primer dobrega sodelovanja izpostavimo kaskadno rabo termalne vode za ogrevanje objektov, sanitarne vode in bazenov Term 3000, z delom toplotnega odpada pa se ogreva tudi bližnji rastlinjak paradižnika v Tešanovcih. Le štirje uporabniki kemično prečistijo odpadno termalno

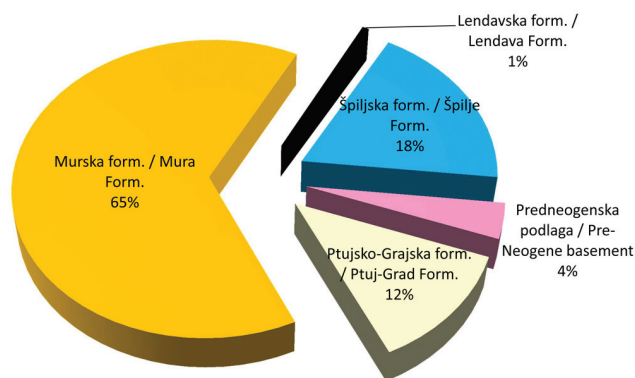
vodo, oziroma jo izpustijo v javno kanalizacijo in na komunalne čistilne naprave. Večina jo odvaja v okolje, bližnje potoke in kanale, brez posebne fizikalne in kemične obdelave. Njena temperatura je dokaj visoka, hkrati pa je zaskrbljujoče, da del odpadne vode hladijo tako, da jo pred izpustom v okolje redčijo s hladno podzemno vodo. Zaradi izpolnjevanja zahtev Uredbe o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo (ANONIMNI, 2005) se večina povprečnih letnih temperatur odpadne termalne vode giblje okoli dovoljene vrednosti 30 °C. Takšno ravnanje je ekološko in trajnostno neustrezno, saj povzroča kemično in temperaturno onesnaženje površinskih voda ter ne omogoča antropogenega napajanja uporabljenih vodonosnikov. Izkušnje v Dobrovniku in Mariboru kažejo, da je z ohladitvijo termalne vode pod 20 °C možno in smiselno izkoristiti razpoložljivo toplotno energijo.

Diskusija

Rezultati raziskave kažejo dobre in slabe strani rabe termalne vode v severovzhodni Sloveniji. To območje že danes prispeva skoraj polovico izkoriščene geotermalne energije v Sloveniji (MG, 2010) in pričakujemo, da se bo trend nadaljeval tudi v prihodnje. V l. 2011 je bilo s 26 geotermalnimi vrtinami pridobljenih 3,29 mio m³ termalne vode, l. 2010 pa 3,15 mio m³ termalne vode. Čeprav le 54 % aktivnih vrtin zajema vodonosnik Murske formacije, te zagotavljajo kar 82 % letnega odvzema.

Količina odvzete termalne vode na obravnavanem območju od leta 1960 do 2011 je ocenjena na 68,51 mio m³ (sl. 13). Največ vode je bilo načrpano iz Murske formacije (65 %) in od tega skoraj 70 % v Murski Soboti in Moravskih Toplicah. Voda se uporablja predvsem za ogrevanje, zato je razmeroma visoka količina odvzema pričakovana. V peske Murske formacije posega tudi edina reinjekcijska vrtna, ki deluje v Lendavi od l. 2009 (TORHAČ, 2010). Lokalno je zelo pomembna za ohranjanje dobrega količinskega stanja vodonosnika, regionalno pa se skozi njo vrača manj od 3 % letnega odvzema, kar je zanemarljivo.

Če upoštevamo, da je izračunan pretok termalne vode v Murski formaciji iz Slovenije na Ma-



Sl. 13. Delež termalne vode iz različnih vodonosnikov v celotnem odvzemu v obdobju 1960-2011

Fig. 13. Shares of thermal water from different aquifers in total abstraction in period 1960-2011

Preglednica 4. Predviden bodoči letni odvzem termalne vode po vodonosnikih

Table 4. Expected future annual abstraction of thermal water by aquifers

Vodonosnik / Aquifer	Vrtine s koncesijo ali v postopku podeljevanja		Vrtine brez koncesije
	Delujoče / Active (m ³)	Mirujoče / Inactive (m ³)	Mirujoče / Inactive (m ³)
Ptujsko-Grajska form. / Ptuj-Grad Form.	441.504	220.752	
Murska form. / Mura Form.	3.933.108	656.720	1.046.995
Lendavska form. / Lendava Form.	52.560		141.912
Špiljska form. / Špilje Form.	176.602	176.602	15.768
Predneogenska podlaga / Pre-Neogene basement	362.664		189.216
Skupaj /Total	4.966.438	1.054.074	1.393.891

džarsko približno 50 l/s (Tóth et al., 2011) in njen identificiran iztok v jezero Hévíz približno 20 l/s (Tóth, 2009), njen sedanji odzem (85 l/s) že presega identificiran naravni iztok iz sistema. Do podobnega zaključka smo prišli tudi na podlagi opazovanj regionalnega trenda nihanja piezometrične gladine. Ta se od začetka opazovanj v l. 2009 stalno niža, s hitrostjo približno pol metra na leto. Spremembe o delovanju vrtin so poročane za vse geotermalne vodonosnike, zato ocenjujemo, da odvzem že dosega ali presega naravno zmogljivost sistema. Brez ustreznih ukrepov za preprečevanja slabšanja količinskega stanja vodonosnikov, npr. reinjekcije, in ustreznega nadzora nad njihovim izvajanjem (RMAN et al., 2011), je kot bistveno posledico prekomernega odvzema pričakovati vse težjo in predvsem dražjo izrabo (še) razpoložljive geotermalne energije. Zaradi več desetletnega odvzema na območju Moravskih Toplic in Murske Sobote je osrednji del Pomurja še posebej ranljiv za dodatne zajeme termalne vode, tako v Murski kot Špiljski formaciji. V zadnjih nekaj letih se je v bližini aktiviralo nekaj novih geotermalnih vrtin, ob čemer uporabniki o vzpostavitvi reinjekcije večinoma ne razmišljajo.

Obstoječi uporabniki pričakujejo, da bodo v okviru podeljenih koncesij za rabo termalne vode lahko povečali odvzem iz sedanjih 3,29 mio m³ na 4,97 mio m³ (preglednica 4). Aktivacija mirujočih vrtin s koncesijo bi teoretično zagotovila še dodatnih 1,05 mio m³, medtem ko bi mirujoče vrtnine brez koncesije lahko dodale še 1,39 mio m³ termalne vode. Aktivne vrtnine s koncesijo v 80 % merijo na vodonosnik Murske formacije, katerega toploto bi uporabljali pretežno za ogrevanje. Tudi pri mirujočih vrtinah je največ zanimanja po termalni vodi iz Murske formacije za pridobivanje geotermalne toplote, sledi termalna voda iz Ptujsko-Grajske formacije za rabo v kopališčih in iz Špiljske formacije za zdravilišča. Na podlagi obstoječih podatkov je pričakovati, da je trend pri mirujočih vrtinah še brez vloge za koncesijo podoben. Podana ocena možnega dodatnega odvzema termalne vode upošteva le upravno omejitve, torej najvišje dovoljene količine odvzema opredeljene v podeljenih koncesijah in tistih, ki so še v postopku. Študija zaradi pomanjkanja hidrogeoloških podatkov seveda ne upošteva medsebojnega vpliva med vrtinami ter hidravličnih zmoglosti vodonosnikov. Že v prejšnjih odstavkih smo opozorili, da je povečanje odvzema termalne vode brez reinjekcije ali podobnih ukrepov omejeno z naravnimi zmoglostmi geotermalnega sistema, katerega količinsko stanje že zdaj ni zadovoljivo.

Zaključek

Izsledki opravljene raziskave kažejo, da je izraba geotermalne energije dobro razvita, saj pogosto temelji na kaskadni izrabi termalne vode. Direktna raba zajema sisteme daljinskega ogrevanja, ogrevanja rastlinjakov, individualnega ogrevanja zdraviliških in kopaliških prostorov ter sanitarne vode, uporabo za balneologijo in

kopanje, taljenje snega itd. Količina odvzema se stalno povečuje in od tega največji delež pripada geotermalnemu vodonosniku v Murski formaciji. Vanj posega tudi edina reinjekcijska vrtina v Sloveniji, ki obratuje v Lendavi, in omogoča lokalno ohranjanje dobrega količinskega stanja tega vodnega vira.

Opazene spremembe stanja geotermalnih vodonosnikov kažejo na njihovo prekomerno izkoriščanje, ki ga lahko označimo za »rudarjenje«. Zanj je v prvi meri odgovoren zgodovinski, več desetletni odvzem termalne vode brez vzpostavljenega sistema vračanja toplotno izrabljene vode nazaj v vodonosnik. Le ena reinjekcijska vrtina, ki šele od leta 2009 deluje v Lendavi, ne more izboljšati regionalnega stanja vodonosnika, saj je zamišljena kot geotermalni par vrtin – torej bo zagotovila obnavljanje le tiste količine termalne vode, ki se jo odvzema iz pridobivalne vrtnine v paru. Preostali uporabniki se morajo zavedati (in to tudi udejanjiti), da so zmoglosti naravnega obnavljanja obstoječega geotermalnega sistema brez antropogenega posredovanja, kot je recimo reinjekcija, zelo omejene. Poleg tega pomanjkljiv obratovalni monitoring in neustrezno ravnanje z odpadno termalno vodo dodatno zmanjšujeta ekološke prednosti, ki jih prinaša izraba tega obnovljivega vira energije. Svoj del odgovornosti nosijo tudi nacionalni upravljavci naravnih virov, kajti zapletena in nejasna zakonodaja, pomanjkljivo izvajanje podeljenih vodnih oziroma koncesijskih pravic in iz tega sledeča nenamenska poraba pridobljenih sredstev, predvsem pa nedelujoča skupna strategija upravljanja z regionalnimi vodnimi viri dodatno otežujejo načrtovanje in izvajanje potrebnih ukrepov za vzpostavitev nadzora in ohranjanje dobrega količinskega in kakovostnega stanja geotermalnih vodonosnikov. Ker je pričakovano, da se bo finančni vložek v omenjene aktivnosti povrnil šele čez nekaj časa (let), je vzpostavitev in upoštevanje skupnega dogovora o načinu izrabe obstoječih geotermalnih virov prvi pogoj za njihovo ohranitev. Ob tem pa je potrebno interes za rabo geotermalne energije z izkoriščanjem tako obstoječih kot novih vrtin razvijati in spodbujati še naprej, a le na ustrezen »trajnosten« način.

Zahvala

Za pripravo grafičnih podlag, ki so bistveno pripomogle prostorski predstavi podatkov, se zahvaljujemo S. Mozetiču, T. Fuksu in Š. Kumelj. Hvala tudi vsem uporabnikom termalne vode, ki so nam razložili delovanje sistemov izrabe geotermalne energije in omogočili dostop do potrebnih podatkov. Raziskavo smo izvedli s pomočjo sofinanciranja evropskega regionalnega razvojnega sklada slovensko-madžarskega operativnega programa 2007-2012 in projekta T-JAM (št. pogodbe SI-HU-1-2-013/01), srednjeevropskega programa 2007-2013 in projekta TRANS-ENERGY (št. pogodbe 2CE124P3) ter slovenskega programa ARRS P1-0020-0215 Podzemne vode in geokemija.

Viri in literatura

- 2000/60/EC. Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike = The Water Framework Directive. Uradni list Evropske unije, 15/Zv. 5, 275-346. Dostopno 1. 11. 2012 na http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html.
- ANONIMNI, 2000: Zakon o vodah = The Water Law. Ur. l. RS, št. 67/2002. Dostopno 1. 11. 2012 na http://zakonodaja.gov.si/rpsi/r04/predpis_ZAKO1244.html.
- ANONIMNI, 2005: Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo = Decree on the emission of substances and heat in the discharge of wastewater into waters and public sewage system. Ur. l. RS 47/2005. Dostopno 1. 11. 2012 na http://zakonodaja.gov.si/rpsi/r06/predpis_URED3606.html.
- AXELSSON, G. 2010: Sustainable geothermal utilization – Case histories; definitions; research issues and modelling. *Geothermics*, 39/4, 283-291, doi:10.1016/j.geothermics.2010.08.001.
- AXELSSON, G. & GUNNLAUGSSON, E. 2000: Long-term monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation. Short Courses of the World Geothermal Congress. IGA, Kjushu – Tohoku: 226 p.
- BODVARSSON, G. 1973: Temperature inversions in geothermal systems. *Geoexploration*, 11: 141-149, doi:10.1016/0016-7142(73)90057.
- CHAPMAN, D. S., POLLACK, H. N. & ČERMAK, V. 1979: Global heat flow with special reference to the region of Europe. In: ČERMAK, V. & RYBACH, L. (eds.): *Terrestrial heat flow in Europe*. Springer-Verlag, 41-48.
- CHAPMAN, D. S. & RYBACH, L. 1985: Heat flow anomalies and their interpretation. *Journal of Geodynamics* 4/1-4: 3-37, doi:10.1016/0264-3707(85)90049-3.
- CIGIT, K. 1975: Kakšne probleme je prineslo odkritje in pridobivanje termomineralne vode v Moravcih? = Which problems did occur after thermomineral water in Moravci was found and exploited? *Radenski vestnik*, 11: 3-11.
- ČERMÁK, V. & BODRI, L. 1986: Temperature structure of the lithosphere based on 2-D temperature modelling, applied to Central and Eastern Europe. In: BURRUS, J. (ed.): *Thermal modelling in sedimentary basins*. Éditions Technip, 7-32.
- DICKSON, M. H. & FANELLI, M. 2003: Geothermal background. In: DICKSON, M. H. & FANELLI, M. (eds.), *Geothermal energy: utilization and technology*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris: 28 p.
- FODOR, L., BADA, G., CSILLAG, G., HORVATH, E., RUSZKICZAY-RUDIGER, Z., PALOTÁS, K., SIKHEGYI, F., TIMAR, G., CLOETINGH, S. & HORVATH, F. 2005: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 410: 15-41, doi:10.1016/j.tecto.2005.06.008.
- FODOR, L., UHRIN, A., PALOTÁS, K., SELMECZI, I., NÁDOR, A., TÓTH-MAKK, Á., SCHAREK, P., RIŽNAR, I., TRAJANOVA, M., RIFELJ, H., JELEN, B., LAPANJE, A., MOZETIČ, S., MURÁTI, J., BUDAI, T. & TULLNER, T. 2011: Geološki konceptualni model v okviru projekta T-JAM = Geological conceptual model in the framework of the project T-JAM. GeoZS, MAFI, Budapest, Ljubljana. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.t-jam.eu/>.
- Geopedia.si. 2006. Borehole location and datasets. Dostopno 1. 10. 2012 na http://www.geopedia.si/?params=T105_L7279_F56#T105_L7279_F56_x611455_y154762_s17_b4). LEA Pomurje, Martjanci.
- GOETZL, G., ZEKIRI, F., LENKEY, L., RAJVER, D. & SVASTA, J. 2012. Summary report: Geothermal Models at Supra-Regional Scale for Trans-energy project. MAFI, GBA, GeoSZ, SGUDS. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://transenergy-eu.geologie.ac.at/>.
- HUNGARIAN PARLIAMENT, 1995: Act LVII of 1995 on Water Management. Dostopno 1. 10. 2012 na <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/.../HungaryWaterLaw.doc>.
- HURTIG, E., ČERMAK, V., HAENEL, R. & ZUI, V. 1992: *Geothermal Atlas of Europe*. Hermann Hack Verlagsgesellschaft: Geographisch-Kartographische Anstalt, Gotha.
- JELEN, B. & RIFELJ, H. 2011: Površinska litostratiografska in tektonska strukturna karta območja T-JAM projekta, severovzhodna Slovenija = Surface lithostratigraphic and tectonic map of the T-JAM project area, northeastern Slovenia, 1 : 100.000. GeoZS, Ljubljana. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.geo-zs.si/podrocje.aspx?id=489>.
- JELEN, B., RIFELJ, H., BAVEC, M., RAJVER, D. & ČERTALIČ, S. 2006: Opredelitev dosedanjega konceptualnega geološkega modela Murske depresije = Definition of current conceptual geological model of the Mura Depression. GeoZS, Ljubljana. Arhiv GeoZS.
- KRALJ, P. 1993: Hidrodinamične značilnosti geotermalnega sistema Termal I na širšem območju Murske Sobote = Hydrodynamic characteristics of the geothermal system Termal I in the wider Murska Sobota area. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 40: 169-176.
- KRALJ, P. 1999: Geotermalni viri v Sloveniji: njihov potencial in izraba = Geothermal resources in Slovenia: their potential and exploitation. In: KRALJ, P. (ed.): *Geotermalna energija islandske in slovenske izkušnje*. MZT, Ljubljana, 29-42.
- KRALJ, P. 2001: Das Thermalwasser-System des Mur-Beckens in Nordost-Slowenien, doktorat. RTWH Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, Aachen: 139 p.
- KRALJ, P. 2004: Trace elements in medium-temperature (40–80 °C) thermal waters from the Mura basin (North-Eastern Slovenia). *Environmental Geology*, 46: 622-629, doi:10.1007/s00254-004-1000-9.
- KRALJ, P., KOZARSKI, A. & MLINARIC, J. 1994: Geotermalni pilotni projekt Ljutomer = Geother-

- mal pilot project Ljutomer. Komunalna energetika, 17-25.
- KRALJ, P. & KRALJ, P. 2000a: Overexploitation of geothermal wells in Murska Sobota, north-eastern Slovenia. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Kyushu-Tohoku, 837-842.
- KRALJ, P. & KRALJ, P. 2000b: Thermal and mineral waters in north-eastern Slovenia. Environmental Geology, 39: 488-500, doi:10.1007/s002540050455.
- KRALJ, P. & RAJVER, D. 2000: State-of-the-art of geothermal energy use in Slovenia. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Kyushu – Tohoku, 267-275.
- KRALJ, P., RYCHAGOV, S., & KRALJ, P. 2009. Changes in geothermal reservoir induced by exploitation: case studies from North-East Slovenia and South Kamchatka. Proceedings (tiskano), Applied Environmental Geochemistry – Anthropogenic impact on the human environment in the SE Europe. GeoZS, Ljubljana, 71-76.
- KRALJIĆ, M. & TURK, V. 2010. Rudarski projekt za izvajanje del: izgradnja raziskovalne geotermalne vrtine Murska Sobota - 3g (Sob-3g) = Mining project: drilling of the research geothermal borehole Murska Sobota - 3g (Sob-3g). Nafta Geoterm, Lendava. Dostopno 1. 10. 2012 na <http://www.murska-sobota.si/javni-razpis-izgradnja-geotermalnih-vrtin-sob-3-sob-4-ter-sanacija-sob-1-turisti%C4%8Dni-center>.
- LAPANJE, A., BAEK, R., BUDKOVIČ, T., DOMBERGER, G., GOETZL, G., HRIBERNIK, K., KUMELJ, Š., LETOUZE, G., LIPIARSKI, P., POLTNIK, W. & RAJVER, D. 2007: Geotermalni viri severne in severovzhodne Slovenije = Geothermal resources of northern and north-eastern Slovenia. RRA Koroška, GeoZS, Dravograd, Ljubljana: 126 p.
- LAPANJE, A., CELARC, B., FUKS, T., RAJVER, D., MARKIČ, M., KOMAC, M., LISJAK, L., HORN, B., KRALJIĆ, M., OREŠNIK, K., GRUDNIK, Z. M., MAVEC, M., TANCAR, M., SUPOVEC, I., VUKELIĆ, T. & DERVARIČ, E. 2011: Možnosti za geološko skladiščenje CO₂ v Sloveniji in izven Slovenije. Knjiga 2: Popis možnih lokacij za geološko skladiščenje v vodonosnikih z oceno skladiščne kapacitete. GeoZS, NTF, HGEM, ERICO, Nafta Geoterm, Ljubljana, Lendava, Velenje. Arhiv GeoZS.
- LAPANJE, A., RAJVER, D., SZÉKELY, E., KUMELJ, Š., MOZETIČ, S., JUHÁSZ, I., BÁNYAI, P., TÓTH, L. & HAMZA, I. 2010: Pregled izkoriščanja geotermalne energije v severovzhodni Sloveniji in na jugozahodnem Madžarskem v okviru projekta T-JAM = Review of geothermal energy utilization in north-eastern Slovenia and south-western Hungary. GeoZS, MAFI. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.t-jam.eu/>.
- LAPANJE, A. & RMAN, N. 2009: Termalna in termomineralna voda = Thermal and thermomineral water. In: PLENIČAR, M. et al. (eds.): Geologija Slovenije = The geology of Slovenia. GeoZS, Ljubljana, 553-560.
- MARTON, E., FODOR, L., JELEN, B., MARTON, P., RIFELJ, H. & KEVRIĆ, R. 2002: Miocene to Quaternary deformation in NE Slovenia: complex paleomagnetic and structural study. Journal of Geodynamics, 34/5: 627-651, doi:10.1016/S0264-3707(02)00036-4.
- MAUČEC, J. 2006: Energetska vizija Pomurja 2007-2013. LEA Pomurje, Martjanci, 35-38. Dostopno 1. 11. 2012 na http://web.rra-mura.com/prenosi/Energetska_vizija_Pomurja_2007_-_2013.pdf
- MÉGEL, T. & RYBACH, L. 2000: Production capacity and sustainability of geothermal doublets. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Kyushu-Tohoku, 849-854.
- MG 2010: Nacionalni akcijski načrt za obnovljive vire energije (AN OVE) za obdobje 2010-2020 = National action plan for renewable energy resources (AN OVE) for period 2010-2020. Ministrstvo za gospodarstvo, IJS, Ljubljana, 134 p. Dostopno 1. 11. 2012 na http://www.mzip.gov.si/fileadmin/mzip.gov.si/pageuploads/Energetika/Porocila/AN_OVE_2010-2020_final.pdf
- NÁDOR, A., LAPANJE, A., TÓTH, G., RMAN, N., SZŐCS, T., PRESTOR, J., UHRIN, A., RAJVER, D., FODOR, L., MURÁTI, J. & SZÉKELY, E. 2012: Transboundary geothermal resources of the Mura-Zala basin: joint thermal aquifer management of Slovenia and Hungary. Geologija, (v tej številki).
- NATIONAL COUNCIL OF SLOVAK REPUBLIC, 2007: Geological Act. Nr. 569/2007 Coll. on Geological Works. Dostopno 1. 10. 2012 na <http://www.vyvlastnenie.sk/predpisy/geologicky-zakon/>.
- NOSAN, A. 1973: Termalni in mineralni vrelci v Sloveniji = Thermal and mineral springs in Slovenia. Geologija, 16: 6-81.
- OTTLIK, P., GALFI, J., HORVATH, F., KORIM, K. & STEGENA, L. 1981: The Low Enthalpy Geothermal Resource of the Pannonian Basin, Hungary In: RYBACH, L. & MUFFLER, L.J.P. (eds.), Geothermal Systems: Principles and Case Histories. John Wiley & Sons, 221-245.
- ÖWAV, 2010. Regelblatt 215 Nutzung und Schutz von Thermalwasservorkommen = Utilisation and protection of thermal water resources, Vienna.
- PEZDIČ, J. 1991: Izotopi v termo-mineralnih vodnih sistemih = Isotopes in thermo-mineral aqueous systems, doktorat. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 158 p.
- PEZDIČ, J., DOLENEC, T., PIRC, S. & ŽIŽEK, D. 1995: Hydrogeochemical properties and activity of the fluids in the Pomurje Region of the Pannonian Sedimentary Basin. Acta Geologica Hungarica, 39: 319-340.
- PEZDIČ, J., VIŽINTIN, G., GERIČ, N. & VERBOVŠEK, T. 2006: Dependence between exploitation, recharge and pollution sensitivity of the deep aquifers: case study in Pomurje, Slovenia. Proceedings (elektronsko), GIRE3D, Marakech, 6 p.
- PLACER, L. 1999. Prispevek k makrotektonski razionizaciji mejnega ozemlja med Južnimi Alpami in Zunanji Dinaridi = Contribution to

- the macrotectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. *Geologija*, 41(1998): 223-225, doi:10.5474/geologija.1998.013.
- PLENIČAR, M. 1954: Obmurska naftna nahajališča. *Geologija*, 2: 36-93.
- RAJVER, D. & LAPANJE, A. 2005: The Current Status of Geothermal Energy Use and Development in Slovenia. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Antalya, 9 p.
- RAJVER, D., LAPANJE, A. & RMAN, N. 2010: Geothermal Development in Slovenia: Country Update Report 2005-2009. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Bali, 10 p.
- RAJVER, D., LAPANJE, A. & RMAN, N. 2012: Možnosti proizvodnje elektrike iz geotermalne energije v Sloveniji v naslednjem desetletju = Possibilities for electricity production from geothermal energy in Slovenia in the next decade. *Geologija*, 55/1: 117-140, doi:10.5474/geologija.2012.009.
- RAJVER, D. & RAVNIK, D. 2002: Geotermična slika Slovenije – razširjena baza podatkov in izboljšane geotermične karte = Geothermal pattern of Slovenia – enlarged data base and improved geothermal maps. *Geologija*, 45/2: 519-524, doi:10.5474/geologija.2002.058.
- RAJVER, D., RAVNIK, D., PREMRU, U., MIOČ, P. & KRALJ, P. 2002: Slovenia. In: HURTER, S. & HANEL, R. (eds.): Atlas of Geothermal Resources in Europe. EC, Research Directorate, Luxembourg.
- RAJVER, D., RAVNIK, D., ŽLEBNIK, L. & ČEBULJ, A. 1995: Utilization of geothermal energy in Slovenia. Proceedings (tiskano), World Geothermal Congress. IGA, Florence, 321-326.
- RAVNIK, D. 1991: Geotermične raziskave v Sloveniji = Geothermal investigations in Slovenia. *Geologija*, 34: 265-303.
- RAVNIK, D., KOLBAH, S., JELIĆ, K., MILIVOJEVIĆ, M., MIOŠIĆ, N., TONIĆ, S. & RAJVER, D. 1992: Yugoslavia. In: HURTER, S. et al. (eds.): Geothermal Atlas of Europe. GeoForschungsZentrum, Potsdam, 102-104: 152-153.
- RAVNIK, D., RAJVER, D., POLJAK, M. & ZIVCIC, M. 1995: Overview of the geothermal field of Slovenia in the area between the Alps, the Dinarides and the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 250: 135-149.
- RMAN, N., LAPANJE, A. & PRESTOR, J. 2011: Water Concession Principles for Geothermal Aquifers in the Mura-Zala Basin, NE Slovenia. *Water Resources Management*, 25: 3277-3299, doi:10.1007/s11269-011-9855-5.
- RMAN, N. & SZŐCS, T. 2011: Hidrogeokemični konceptualni model v okviru projekta T-JAM = Hydrogeochemical conceptual model within the framework of project T-JAM. GeoZS, MAFI, Budapest, Ljubljana. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.t-jam.eu/>.
- ROYDEN, L., HORVÁTH, F., NAGYMAROSY, A. & STEGENA, L. 1983a: Evolution of the Pannonian Basin System: 2. Subsidence and thermal history. *Tectonics*, 2: 91-137.
- ROYDEN, L., HORVÁTH, F. & RUMPLER, J. 1983b: Evolution of the Pannonian Basin System: 1. Tectonics. *Tectonics*, 2: 63-90.
- RYBACH, L. 2003: Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32: 463-470, doi:10.1016/S0375-6505(03)00057-9.
- RYBACH, L. 2010: Status and Prospects of Geothermal Energy. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Bali: 5 p.
- SEVER, B. 1993: Enciklopedija Slovenije 7, Marin – Nor. In: VOGLAR, D. & DERMASTIA, A. (eds.): Enciklopedija Slovenije. Mladinska knjiga, 217-218.
- SOPHOCLEOUS, M. 2000: From safe yield to sustainable development of water resources – the Kansas experience. *Journal of Hydrology*, 235: 27-43.
- SOPHOCLEOUS, M. 2010: Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA – lessons and recommended actions. *Hydrogeology Journal*, 18: 559-575, doi:10.1007/s10040-009-0540-1.
- SZABO, J. 1975: O termalnih vodah v Petišovcih in Banovcih. *Radenski vestnik*, XIV: 20-24.
- SZŐCS, T., RMAN, N., SÜVEGES, M., PALCSU, L., TÓTH, G. & LAPANJE, A. 2012: The application of isotope and chemical analyses in managing transboundary groundwater resources. *Applied Geochemistry*, Special Issue, doi:10.1016/j.apgeochem.2012.10.006.
- TORHAČ, E. 2010: Eureka success story – Pumping up the heat for a climate-friendly future. Nafta Geoterm, Lendava. Dostopno 1. 11. 2012 na http://www.eurekanetwork.org/showsuccessstory?p_r_p_564233524_articleId=362473&p_r_p_564233524_groupId=10137
- TÓTH, G. 2009: Case study: XL groundwater model of the Pannonian basin and its use for transboundary consultations. Proceedings (tiskano), Workshop on Groundwater modelling TAIEX-INFRA 32389.
- TÓTH, G., MURATI, J. & RMAN, N. 2011: Matematično model toka podzemne vode v okviru projekta T-JAM = Numerical flow model within the framework of project T-JAM. GeoZS, MAFI, Budapest, Ljubljana. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.t-jam.eu/>.
- TURK, V. 1993: Reinterpretacija kronostratigrafskih in litostratigrafskih odnosov v Murski udornini = Reinterpretation of chronostratigraphic and lithostratigraphic relations in the Mura Depression. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 40: 145-148.
- VIZINTIN, G., VUKELIĆ, Ž. & VULIĆ, M. 2008: Monitoring the geothermal potential of deep Tertiary aquifers in north-east Slovenia using old abandoned oil and gas wells. Proceedings (tiskano), 2nd International Symposium Mining Energetic, Tara, 39-52.
- ZDRUŽENI NARODI, 1987. Chapter 2: Towards Sustainable Development. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development No. A/RES/42/187. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm>.

ŽLEBNIK, L. 1975: Termalne in termomineralne vode v Prekmurju in Slovenskih goricah = Thermal and thermomineral waters in Prekmurje and Slovenske gorice. Radenski vestnik, XIV: 25-35.

ŽLEBNIK, L. 1978: Terciarni vodonosniki v Slovenskih goricah in na Gorickem = Tertiary aquifers in the Slovenske gorice and Goričko hills. Geologija, 21/2: 311-324.

Pregled novih organskih onesnaževal v podzemni vodi v Sloveniji

Review of emerging organic pollutants in groundwater in Slovenia

Anja KOROŠA & Nina MALI

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija;
e-mail: anja.korosa@geo-zs.si; nina.mali@geo-zs.si

Prejeto / Received 9. 11. 2012; Sprejeto / Accepted 27. 11. 2012

Ključne besede: nova onesnaževala, organske spojine, podzemna voda, vodni viri, zdravila, ocena tveganja

Key words: emerging contaminants, organic compounds, groundwater, water resources, pharmaceuticals, risk assessment

Izvleček

Novo nastale organske spojine (emerging organic compounds – EOC) so spojine, ki so bile šele pred kratkim določene kot onesnaževala, in tiste, ki so na novo razvite in odkrite v okolju. EOC lahko povzročijo neželene vplive na okolje in zdravje ljudi. V naravno okolje vstopajo kot posledica raznih antropogenih dejavnosti. V članku je predstavljen pregled novih organskih onesnaževal, ki se pojavljajo v podzemni vodi. To so spojine iz skupine ostankov zdravil, snovi izdelkov za osebno nego, pesticidov, veterinarskih izdelkov, dodatkov v prehrani, nano materialov, industrijskih in drugih spojin, ki jih najdemo v odpadnih vodah. V članku so opisani njihovi glavni viri, njihova prisotnost v podzemni vodi, poti in mogoči vplivi (tveganja) na živa bitja in rastline. Podan je pregled raziskav evidentiranja EOC v svetu. V pregledu slovenskih raziskav so analizirane študije, ki so se ukvarjale z določitvijo širokega spektra prisotnosti EOC v podzemni vodi, z ostanki zdravil v podzemni in odpadni vodi ali pa z razvojem analitskih metod za te substance. Iz celotne analize smo povzeli, da se moramo zavedati morebitnega tveganja prisotnosti EOC v podzemni vodi, pa čeprav v majhnih vsebnostih. Za zmanjšanje, še v določeni meri nepoznanega tveganja, je potrebno določiti mejne vrednosti EOC v podzemni vodi in njihov vpliv. Potrebno bo identificirati nova onesnaževala, razviti nove analitske metode, določiti njihove vire in poti, predvsem pa bo potrebno vzpostaviti monitoring za te substance.

Abstract

Emerging organic compounds EOC are substances which have been only recently determined as pollutants, and substances which have been newly developed or discovered in the environment. EOC in groundwater can cause adverse effects on the environment and human health. They enter into the natural environment as a result of various anthropogenic activities. The article provides an overview of emerging organic pollutants that occur in groundwater. These compounds are drug residues, substances originating from personal care products, pesticides, veterinary products, food additives, nanomaterials, industrial and other compounds found in wastewater. The article describes the main sources and the presence of EOC in groundwater, pathways and potential impacts (risks). An overview of EOC detection research in the world is presented. Within the review of Slovenian studies the investigations dealing with the determination of wide spectrum of EOC presence in groundwater, with drug residues in groundwater and waste water, or with the development of analytical methods for these substances were analyzed. From the entire analysis we inferred that we must be aware of the possible presence of EOC risk in groundwater even in small concentrations. To reduce the yet extent unknown risks, it is necessary to determine EOC threshold values in groundwater and their impact. In the future it will be necessary to identify new pollutants, to develop new analytical methods to determine their sources and routes, and in particular, to establish monitoring for these substances.

Uvod

Organske spojine antropogenega izvora predstavljajo pomemben dejavnik pri onesnaževanju okolja. Izraz novo nastale organske spojine (emerging organic compounds – EOC) se na splošno uporablja za spojine, ki so bile šele pred kratkim določene kot onesnaževala. To je predvsem po-

sledica razvoja analitskih metod, ki omogočajo določitev spojin v nižjih vsebnostih (LAPWORTH et al., 2012; STUART et al., 2012). Kot onesnaževala v podzemni vodi lahko EOC povzročijo neželene vplive na okolje in zdravje ljudi, saj vsebujejo široko paleto različnih spojin, tudi metabolitov, produkte transformacije in razkroja: farmacevtske spojine, izdelke za osebno nego, pesticide, ve-

terinarske izdelke, industrijske spojine/stranske proizvode, dodatke v prehrani, nano materiale itd. (LAPWORTH et al., 2012). Izvora mnogih EOC ne poznamo, prav tako so neznane njihove transportne in presnovne poti. Zaradi nepoznavanja njihovih lastnosti je veliko EOC v okolju še nadzorovanih (STUART et al., 2012).

EOC v naravno okolje vstopajo kot posledica raznih antropogenih dejavnosti urbanega okolja in kmetijstva. Okolju poleg kmetijstva veliko grožnjo predstavlja tudi onesnaženje z industrijskimi odplakami, farmacevtskimi izdelki (medicina in veterina) ter njihovimi stranski produkti in metaboliti. Eden izmed virov onesnaževanja so tudi netesna kanalizacijska omrežja, izcedne vode iz odlagališč, komunalne in industrijske čistilne naprave itd. Tako najdemo EOC v blatu komunalnih čistilnih naprav, površinskih vodah, podzemnih vodah in celo v pitni vodi. Danes je posebna pozornost raziskovalcev usmerjena v ugotavljanje prisotnosti antropogenih organskih spojin v podzemni vodi.

V Sloveniji se kar 98 % potreb po pitni vodi pokriva iz virov podzemne vode. Glede na razvojne perspektive se bo potreba po pitni vodi v bodoče še povečala. Že sedaj ne zadoščamo potrebam po kakovostni pitni vodi za potrebe kmetijstva, industrije, turizma in vodooskrbe. Veliko virov podzemne vode je onesnaženih s celo vrsto onesnaževal antropogenega izvora. Vodonosniki nimajo neskončne in popolnoma zanesljive samočistilne sposobnosti. Dolgi zadrževalni časi vode v vodonosniku, nizka temperatura, nizka stopnja redčenja in manjša mikrobiološka aktivnost so dejavniki, ki pogojujejo ohranjanje prisotnosti ostankov zdravil in podobnih substanc v podzemni vodi. Odporna onesnaževala se lahko akumulirajo v vodonosniku, kar pa lahko ima dolgoročne posledice. Študije so pokazale, da se nekatere antropogene organske spojine lahko zadržujejo v vodonosniku tudi do več let ter lahko prepotujejo tudi dolgo pot (ROBERTS & VALOCCHI, 1981).

V članku je pripravljen pregled mogočih antropogenih organskih onesnaževal EOC, ki jih lahko najdemo v podzemni vodi. V pregled so vključeni ostanki zdravil, snovi izdelkov za osebno nego, pesticidi, industrijske spojine in druge spojine, ki jih najdemo v odpadnih vodah. Obravnavamo glavne vire, poti in pojave EOC v podzemni vodi in podajamo tudi pregled raziskav določanja EOC v podzemni vodi v svetu. Večina analiziranih člankov je bila objavljena po letu 2004. V pregledanih člankih je posebna pozornost namenjena izvoru in prenosu posameznih EOC. Podana so izhodišča za oceno toksičnosti in morebitnega tveganja za pitno vodo in okolje. V članku je predstavljen tudi pregled raziskav EOC v Sloveniji. V pregledu smo obravnavali raziskave, ki so se ukvarjale z določitvijo širokega spektra prisotnosti EOC v podzemni vodi, z ostanki zdravil v podzemni ali odpadni vodi in z razvojem analitskih metod za te substance. Glede na to, da so pesticidi in nekatera industrijska onesnaževala bolje obravnavani in regulirani kot druge skupine EOC, so posledično vključeni tudi v različne monitoringe, vendar te

raziskave niso vključene v pregled. Na koncu so podane smernice za nadaljnje raziskave in izzivi, ki se pojavljajo pred nami za zmanjšanje tveganja vpliva EOC.

Zakonodaja

Veliko EOC v podzemni vodi ni nadzorovanih, zato njihovo določanje in nadzor predstavljajo tehnični in institucionalni izziv (KAVANAUGH, 2003; STUART et al., 2012). Do sedaj nobena zakonodaja ne obravnava vseh znanih EOC (med njimi tudi zdravilnih učinkovin) kot parametre, ki bi vplivali na kakovostno stanje ali zdravstveno ustreznost virov pitne vode. Na evropski ravni je kakovost podzemne vode urejena na podlagi Vodne direktive evropskega sveta (2000/60/ES) in Direktive o varstvu podzemne vode pred onesnaževanjem in poslabšanjem (2006/118/ES). Pitno vodo obravnava Evropska direktiva o pitni vodi (98/83/ES), uporabo pesticidov in njihovo vsebnost pa Direktiva o varstvu rastlin in biocidov (91/414/EGS; 98/8/ES). Evropska direktiva o pitni vodi (98/83/ES) postavlja omejitve za majhno število organskih mikropolutantov, ki zajemajo aromatske ogljikovodike, klorirana topila in stranske produkte razkuževanja ter pesticide. Direktiva o okoljskih standardih na področju vodne politike (2008/105/ES) določa številne prednostne snovi ali prednostno nevarne snovi ter nekatera nova organska onesnaževala.

Ameriška okoljska agencija (US Environmental Protection Agency) je objavila smernice in vrednosti za onesnaževala v pitni vodi pri monitoringu. Med njimi so tudi organski mikropolutanti, kot so hormoni, virusi (*E.coli*, itd.) in perflorirane spojine, nobena od njih pa ni spojin iz skupine ostankov zdravil (razen hormonov) (US EPA, 2012).

Z Zakonom o vodah je bila Vodna direktiva tudi v Sloveniji prenesena v nacionalno zakonodajo (Ur. L. RS 67/2002, 110/2002, 2/2004, 41/2004, 57/2008, 57/2012). Namen Vodne direktive je vzpostaviti okvir za zaščito voda, z glavnim ciljem doseči dobro stanje vseh vodnih teles do leta 2015. Pravilnik o pitni vodi (Ur. L. RS 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09) obravnava različne mikrobiološke, kemijske in indikatorske parametre. Pesticidi so poleg policikličnih aromatskih ogljikovodikov, nitratov in lahkihloplnih organskih spojin uvrščeni med kemijske parametre. Ostankov zdravil ter nekaterih drugih EOC pa pravilnik ne obravnava, navaja le, »da je pitna voda zdravstveno ustrezna, kadar ne vsebuje snovi v vsebnostih, ki same ali skupaj z drugimi snovmi lahko predstavljajo nevarnost za zdravje ljudi«. Vendar še ne vemo, v kakšnih vsebnostih različna onesnaževala vplivajo na zdravje ljudi in živali. Pri ocenjevanju stanja morajo biti določene mejne vrednosti (standardi) za onesnaževala takšne, da še ne ogrožajo zdravja ljudi. V primeru ostankov zdravil in drugih organskih onesnaževal (EOC) še ne poznamo njihove strupenosti, vpliva in obnašanja spojin, zato mejnih vrednosti za te substance še ni mogoče določiti, se

pa to pričakuje v prihodnosti. Določitev mejnih vrednosti za še neprepoznane antropogene organske snovi predstavlja velik izziv in zahteva boljše razumevanje lastnosti teh snovi, njihove porazdelitve in obnašanja v podzemni vodi (določitev novih nastajajočih spojin, določitev primernih standardov, razvoj strategij za zmanjševanje vnosa v vodno okolje in razvoj novih metod za monitoring). Pomembno je, da te snovi opazujemo v podzemni vodi in tako zadostimo zakonodaji, saj veliko teh snovi predstavlja nevarnost tako za zdravje ljudi kot za ekosisteme (VRANA et al., 2005). Hiter razvoj občutljivosti analitskih metod v zadnjih letih omogoča uporabo analiz na meji sledljivosti (meja zaznavnosti (LOD) in meja določanja (LOQ)) za raziskave prisotnosti, razgradnje in transportnih poti organskih onesnaževal v podzemni vodi.

Organska onesnaževala antropogenega izvora v podzemni vodi

Veliko EOC spojin do sedaj ni bilo mogoče zaslediti ali pa njihova pojavnost ni bila značilna. V skupino EOC spadajo pesticidi in ostanki zdravil z metaboliti, hormoni, steroidi, industrijski dodatki in njihovi stranski produkti, izdelki za osebno nego, dišave, blato čistilnih naprav, zavranci gorenja, površinsko aktivne snovi in dodatki v prehrani (STUART et al., 2012).

Farmacevtski izdelki

V Evropi je registriranih okoli 4000 različnih aktivnih učinkovin, ki se uporabljajo v medicini in veterinarstvu (MOMPELAT et al., 2009). Največ uporabljamo protivnetne analgetike, zdravila za popuščanje srca in zdravila za zniževanje maščob v krvi, zdravila, ki zmanjšajo izločanje želodčne kisline, antidepresive, anksiolitike, antipsihotična zdravila, protimikrobna sredstva ter kontraceptive. Večina od teh zdravil oz. metabolitov, ki so lahko tudi aktivni, se lahko nahaja v vodnem okolju (RICHARDSON & BOWRON, 1985).

V okolju najdemo ostanke zdravil, ki jih uživajo ljudje in domače živali ter zdravila, ki se uporabljajo kot promotorji rasti v živinoreji (anabolni steroidi, klenbuterol in drugi agonisti adrenergičnih receptorjev beta). Glavni vir zdravil v vodnem okolju predstavljajo urin in fekalije humanega in živalskega izvora. Preko kanalizacijskih omrežij z urinom in blatom, odstranjevanjem neuporabljenih zdravil v kanalizacijsko omrežje in s kmetijsko uporabo posredno onesnažujemo okolje s farmacevtskimi izdelki (POYNTON & VULPE, 2009). Viri onesnaževanja so tudi odlagališča odpadkov in živalske farme, kjer se uporablja velik spekter zdravil za preventivo in zdravljenje raznih infekcij. Tako pridobljen gnoj se nato uporablja za organsko gnojilo na kmetijskih površinah, iz katerih neposredno prehaja v podzemno vodo.

Zaključimo lahko, da se vodotopna zdravila oz. če so zaužita kot lipofilna, v organizmu pre-

tvorijo v vodotopne metabolite. Ker jih večino izločamo v odpadne vode, se lahko akumulirajo ter preidejo tudi v druge vodne vire. Velik razpon farmacevtskih ostankov so ugotovili tako v površinski kot tudi v podzemni vodi. Glede na pogostnost rabe ter način izločanja iz organizma v vodno okolje so raziskave potrdile ostanke naslednjih zdravil: nesteroidnih analgetikov, protiepileptičnih zdravil (karbamazepina in fenobarbitala), oralnih kontraceptivov, statinov, antidepresivnih zdravil, anksiolitikov in antihipertenzivov.

Farmacevtske izdelke v grobem razdelimo na več skupin, in sicer (povzeto po STUART et al., 2012):

- antibiotiki za ljudi in živali (ciprofloksacin, eritromicin, linkomicin, sulfametoksazol, tetraciklin);
- ostala zdravila, izdana na recept (kodein, salbutamol, karbamazepin);
- zdravila, izdana brez recepta (paracetamol, ibuprofen, salicilna kislina);
- jodirana rentgenska kontrastna sredstva (jopromid, jopamidol).

Druge potencialno ogrožajoče sestavine za površinsko vodo so tudi tamiflu in zdravila za kemoterapijo (fluorouracil, ifosfamid, ciklofosfamid) (BUERGE et al., 2006; MOLDOVAN, 2006; SINGER et al., 2007; JOHNSON et al., 2008). Poleg naštetih so ogrožajoče še prepovedane droge, kot so kokain in amfetamini (KASPRZYK-HORDERN et al., 2008; ZUCATO et al., 2008).

Najpogostejše farmacevtske komponente v podzemni vodi so:

- **Diklofenak** je eden od predstavnikov nesteroidnih protivnetnih učinkovin (NSAIDs), ki se uporablja pri zdravljenju bolečin in raznih vnetij. Topen je v vodi in polarnih organskih topilih.
- **Ibuprofen** je prav tako eden od predstavnikov nesteroidnih protivnetnih učinkovin (NSAIDs). Uporablja se pri lajšanju simptomov artritisa, povišani telesni temperaturi in kot analgetik. Topen je v vodi in polarnih organskih topilih.
- **Karbamazepin** je zdravilo, ki se že skoraj petdeset let uporablja za zdravljenje epilepsije, motenj razpoloženja in kot analgetik, predvsem za zdravljenje kroničnih bolezni. Bolj je topen v lipidih kot v vodi.
- **Klofibril** se uporablja pri zniževanju lipidov v krvi. Njegov aktivni metabolit klofibrinska kislina je znana po svoji težki biorazgradljivosti.
- **Lamotrigin** sodi v skupino zdravil imenovanih antikonvulzivi in se lahko uporablja za zdravljenje epilepsije.
- **Metil salicilat** spada med aromatske estre. Ima antiinflamatorno in analgetično delovanje, znižuje vročino in se uporablja kot antirevmatično sredstvo.
- **Nikotinamid** je koencim. Koencimi so organske ali koordinacijske spojine, ki pomagajo encimu katalizirati reakcijo. Vloga koencimov je pri katalizatorju encimskih reakcij ključnega

pomena, saj pri nekaterih encimih proteinski del ne zadostuje za popolno reaktivnost.

- **Propifenazon** je zdravilo, ki spada med analgetike in se uporablja skupaj s paracetamolom in kofeinom predvsem za zdravljenje vročinskih stanj in raznih bolečin. Topen je v vodi in polarnih organskih topilih.

Hormoni in steroli

Hormoni so snovi v organizmu, ki jih izločajo nekatere žleze. Od hormonov so odvisne posamezne naravne funkcije delovanja organizma. Izločajo se neposredno v kri, s katero se prenašajo po celim telesu in vplivajo na različne organe. Med najpogostejše hormone, ki so jih določili v okolju, štejemo: testosteron, estrogen, estron, estriol, 17α - in 17β -estradiol in progesteron (spolni hormoni) (JOHNSON et al., 2000; STANDLEY et al., 2008; VULLIET & CREN-OLIVE, 2011). Obstajajo tudi sintetični androgeni, kot so: oksandrol, nandrolon, 17α -etinilestradiol in dietilstilbestrol, ki se uporabljajo v kontracepciji.

V podobno skupino kot hormone uvrščamo tudi holesterol, njegov metabolit

5β -koprostanol in ostale rastlinske sterole (stigmastanol, stigmasterol in β -sitosterol). Steroli spadajo med lipide, zato so poleg fosfolipidov eden najpomembnejših gradnikov celičnih membran. Funkcija sterolov v celični membrani mikroorganizma je, da dajejo membrani trdnost, saj so steroli trdne in nefleksibilne molekule, ki se nahajajo v rastlinah, živalih in glivah.

Največji vir hormonov in sterolov v okolju je kanalizacijska mreža. V telo z zaužitjem zelenjave in sadja poleg hormonov vnesemo tudi sterole.

Pesticidi

Pesticidi so snovi, ki se v kmetijstvu, tudi v gošpodinjstvu, uporabljajo za zatiranje škodljivcev, plevelov in rastlinskih bolezni. Uporabljajo jih tudi v gozdarstvu, lesarstvu, ladjedelništvu itd. Po svojem nastanku so lahko naravne snovi, izolirane iz rastlin ali sintetično pridobljene s sintezo.

Po svoji naravi so te spojine biološko aktivne, nekatere so celo strupene. V podzemni vodi se pojavljajo tako primarne spojine kot njihovi razgradni produkti. Raziskave v Veliki Britaniji so pokazale, da so v podzemni vodi odkrili višje vsebnosti razgradnih produktov in metabolitov v primerjavi s vsebnostmi matičnih spojin (KOLPIN et al., 2004; LAPWORTH & GOODY, 2006). V okolje najpogostejše pridejo zaradi njihove uporabe v kmetijstvu, saj preko obdelovalnih površin prehajajo v nezasičeno cono in naprej v podzemno vodo do uporabnika.

Pesticide razdelimo na šest skupin: fungicide (kaptan, benomil, triadimefon, folpet, mankozeb), insekticide (DDT, metidation, metomil, lindan, heptaklor), herbicide (atrazin, alaklor, simazin, propazin, metaloklor, terbutilazin), akaricide (dikofol, propargit, klorfentazin), rodenticide (endrin, varfarin, cinkfosfid) in limacide (metaldehyd, metiokarb) (INTERNET 1).

Med pesticide, ki jih pogosto najdemo v podzemni vodi uvrščamo:

- **Atrazin** je organski herbicid, ki se uporablja za zatiranje plevela. V Sloveniji je njegova uporaba prepovedana od leta 2003. Je precej odporen, saj se v naravi ohrani od 3. do 12. mesecev. Razgradna produkta atrazina sta desetilatrazin in desizopropilatrazin. Zanju veljajo enaki toksikološki zaključki in enake zahteve kot za atrazin.
- **Metolaklor** je prav tako herbicid, ki se uporablja za zatiranje nekaterih plevelov v kmetijstvu, ob cestah in pri vzgoji okrasnih rastlin. Razgradnja metolaklora je odvisna od pogojev v okolju (aktivnost mikroorganizmov, temperatura, sončno sevanje, tip zemlje, prisotnost sedimentov v vodi, ...). V zemlji se razgrajuje hitreje kot v vodi.
- **Propazin** je herbicid, ki se uporablja v obliki škropila ob ali po sajenju raznih kultur. Stabilen je v nevtralnih rahlo kislih ali alkalnih medijih.
- **Simazin** uvrščamo med herbicide iz skupine triazinov. Uporablja se za odstranjevanje plevela. Podobno kot atrazin je sedaj prepovedan v EU (91/414/EGS). Stabilen je pri naravni svetlobi in visokih temperaturah. Po uporabi je v tleh aktiven še od 2. do 7. mesecev.
- **Terbutilazin** je selektivni herbicid. Po prepovedi uporabe atrazina v EU je terbutilazin njegov nadomestek. Desetilterbutilazin je razgradni produkt herbicida terbutilazina. Najdemo ga lahko v tleh, na kmetijskih obdelovalnih območjih, v sedimentih, v površinskih in podzemnih vodah.

Industrijske spojine

Med industrijska onesnaževala uvrščamo dodatke in stranske produkte, ki se uporabljajo v industriji, to so produkti dezinfekcije vode, ognje-vzdržni materiali, površinsko aktivne snovi in ionske tekočine. V okolje in podzemno vodo industrijske spojine preidejo iz blata čistilnih naprav ali preko površinske vode v podzemno vodo.

Obstaja zelo široka paleta dodatkov in stranskih produktov, ki se uporabljajo v industriji in so okolju škodljivi. Sem uvrščamo klorirana topila, alifatske ogljikovodike (družina spojin, ki prvotno prihajajo iz nafte), etre, aromatske in poliaromatske ogljikovodike, razne smole in ftalate ali mehčala.

Stranski produkti dezinfekcije vode – trihalometani (THM) so hlapni halogenirani ogljikovodiki. V pitni vodi nastajajo pri reakcijah dezinfekcijskega sredstva z naravno prisotnimi organskimi snovmi, ki so predvsem v površinskih vodah (npr. huminske in fulvinske kisline) in bromidnih ionih. Nastajanje THM je odvisno od vrste in vsebnosti organskih snovi v vodi, temperature in pH vrednosti (STUART et al., 2012). Poznamo še ostale stranske produkte dezinfekcije vode: halogenirane ocetne kisline, N-Nitrosodimetilamin, halo ketone, haloaldehide, trikloronitrometane, klorov dioksid itd. (ZAGAJŠEK et al., 2010). **N-Nitrosodi-**

metilamin (NDMA) znan tudi kot dimetilnitrosamin (DMN) je produkt reakcije med kloritizacijo ali kontaminacijo iz industrije. Zaradi relativno visokih vsebnosti rakotvornih snovi, ki nastanejo pri čiščenju vode, so čistilne naprave pomembno področje raziskav. RICHARDSON-OVA (2003) je pri svojih raziskavah odkrila, da pri dezinfekciji vode in zraka nastajajo tudi stranski produkti (bromin jodo-trihalometani; mutageni X-i, ki so zelo nevarni za okolje, vplivajo na centralni živčni sistem in so rakotvorni) (SMITH & OEHME, 1991).

Med **ognjevzdržne materiale** uvrščamo polibromirane-difenil-etere (PBDE), ki se uporabljajo v gospodinjstvu in industriji v smolah. V okolje vstopajo preko komunalnih odlagališč in sežigalnic. Ugotovljeno je bilo, da se kopičijo v organizmu in so potencialni endokrini motilci hormonov (RAHMAN et al., 2001).

V industriji **površinsko aktivnih snovi** se najpogosteje uporabljata oktil in nonil-fenol, ki se uporabljata tudi pri proizvodnji alkilfenoleksilatov. V okolju so zelo obstojni in težko razgradljivi.

Ionske tekočine so soli z nizko točko taljenja, ki se štejejo kot okolju prijazni nadomestki za industrijsko hlapljive spojine. Med njih uvrščamo dušikove heterociklične spojine in kvarterne amonijeve soli. Do sedaj še niso v široki uporabi. Njihova značilnost je, da so topne v vodi in slabo razgradljive.

Ostalo

Med ostale organske spojine, ki jih najdemo v okolju, uvrščamo kofein in nikotin, spojine iz izdelkov za osebno nego, razne mošuse, dodatke v prehrani itd. V okolje vstopajo kot vsa ostala onesnaževala preko kanalizacijskih sistemov, greznic, površinskih in odpadnih voda itd.

Kofein, nikotin in metabolit nikotina – kotinin pogosto najdemo v podzemni vodi (SEILER et al., 1999; GODFREY et al., 2007). Kofein je eno od zelo pogostih poživil, čigar raba je razširjena po vsem svetu. Je naravni alkaloid in sestavina številnih napitkov, uporablja pa se tudi v terapevtske namene. Najpomembnejši razgradni produkt kofeina so diemtilksantini, ki se nahajajo tudi v produktih splošne rabe.

V Angliji so z raziskavami v podzemni vodi ugotovili tudi visoke vsebnosti **umetnih sladil** (acesulfam, saharin, ciklamat in sukralozo) (VAN STEMPVOORT et al., 2011).

Med spojine iz **izdelkov za osebno nego** uvrščamo:

- **Bakteriociidi in antikimotiki** (protiglivična zdravila – triklosan) se pogosto uporabljajo v gospodinjskih izdelkih – zobne paste, mila, antibakterijski spreji. Triklosan in njegove metabolite (metil triklosan) so našli v površinskih vodah.
- **DEET** (N, N dietilmetatoulamid), ki je najpomembnejša sestavina pri insekticidih.
- **Parabeni** (alkilestri hidrobenzojske kisline), ki se uporabljajo v kozmetiki, živilih, zdravilih itd.

- **Policiklični mošusi** (tonalid in galaksolid) se najpogosteje uporabljajo kot dišave v pralnih praških. Raziskave so pokazale, da so lahko mutageni, toksični in molekularno nestabilni. Te spojine so našli tudi v blatu čistilnih naprav, usedlinah in živih organizmih v vodi, v metabolizmu rib itd., kar nakazuje na njihovo visoko obstojnost.
- **UV filtri/sredstva za zaščito pred soncem** vsebujejo benzofenone in metoksicinamate, ki jih najdemo v podzemni vodi.

Dodatki (tri-etilcitrati) v **prehrani (aditivi)** se uporabljajo za stabilizacijo raznih pen (jajčni beljak), farmacevtskih premazov in mehčalcev. Antioksidanta butilhidroksianizol (BHA) in butilhidroksitoulol (BHT) se uporabljata za preprečevanje škodljive maščobe v prehrani. V okolju najdemo še druge dodatke v prehrani, ki lahko vsebujejo kafe (voskaste aromatične snovi), razne evkaliptole, citronele, cis-3-heksanole, hekzanojske kisline itd. Nekateri od teh so lahko vključeni med oksidante ali endokrine motilce (hormonski motilci ali motilci delovanja endokrinega sistema) (JOBLING et al., 1995).

Izvor, pot, vpliv

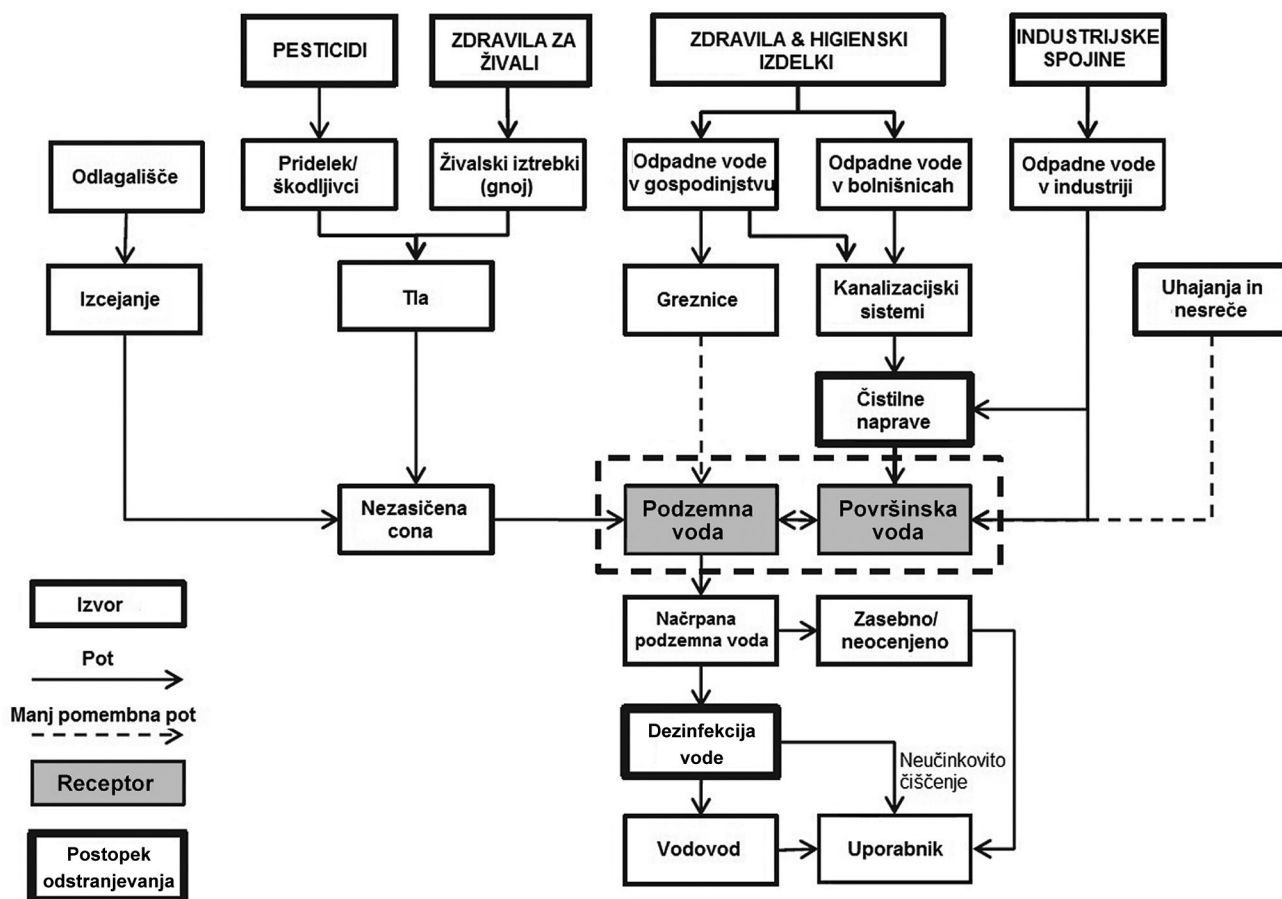
Transport onesnaževal EOC v vodnem okolju lahko opišemo kot: vir–pot–receptor (sl. 1), pri katerem je vir onesnaževala npr. blato iz čistilnih naprav, pot je npr. tok vode skozi vodonosnik, ter receptor (potrošnik, ki uporablja pitno vodo). Na sliki 1 so prikazani viri in poti EOC, ki imajo največji vpliv na vire podzemne vode.

Izvor

Spekter izvora EOC v površinski in podzemni vodi, pitni vodi in sedimentih je zelo širok, in sicer: uporaba pesticidov v kmetijstvu, parkih, vrtovih, golf igriščih, urbani infrastrukturi, transportnem omrežju, izpusti iz greznic, bolnišničnih ali industrijskih voda, izcednih vodah iz odlagališč, odlaganje blata komunalnih čistilnih naprav, uporaba živalskega gnoja v kmetijstvu (STUART et al., 2012).

Glavni vir za prisotnost zdravil v okolju je človeško in živalsko izločanje. Ostanke zdravil pridejo v okolje z urinom in blatom ter z odstranjevanjem neuporabljenih farmacevtskih in higienskih izdelkov v gospodinjstvu in bolnišnicah (razna zdravila, razkuževala, mošusi itd.) (SACHER et al., 2001; WATKINSON et al., 2009; VERLICCHI et al., 2010). Uporaba veterinarskih antibiotikov v živalski krmi je pomemben vir onesnaženja v ZDA in v nekaterih delih Evrope in Azije (BARTELT-HUNT et al., 2011). Potencialni viri so odpadne vode iz gospodinjstev, bolnišnic in odlagališč odpadkov (STANGROOM et al., 1998; HEBERER & FELDMANN, 2005; BESTER et al., 2008).

Viri onesnaženja z EOC so tako **razpršeni kot točkovni**. Točkovni vir onesnaženja izvira iz ločenega (nepovezanega) izvora, katerega vnos v vodni sistem lahko natančno določimo. Med točkovne vire onesnaženja uvrščamo razne indu-



Sl. 1. Izvori in poti novih onesnaževal ter njihovi receptorji (STUART et al., 2012)

strijske izpuste, kanalizacijske izpuste, greznice, odlagališča (komunalna, industrijska, kmetijska), objekte za izkoriščanje mineralnih surovin.

Razpršeni viri po navadi izhajajo iz težko določljivih virov in lahko obsegajo večje površine. Primeri virov razpršenega onesnaženja so izcejanje iz kmetijskih površin (pesticidi, gnojila, itd.), odtoki površinskih vod iz urbanih površin, izcejanje iz razvejanega kanalizacijskega omrežja in odprtih odlagališč (BEDDING et al., 1982; RITTER et al., 2002; SCHMID et al., 2003; NAKADA et al., 2008; TERRY et al., 2008). Glavne lastnosti razpršenih virov so, da pokrivajo večje površine, generalno dosega nižje vsebnosti kot točkovna onesnaženja, se bolj naravno redčijo v tleh in na površini, so težje določljivi, ker so manj očitno povezani z povzročiteljem onesnaženja (LAPWORTH et al., 2012).

Večina objavljenih raziskav se nanaša na preučevanje onesnaženja podzemne vode z EOC iz točkovnih virov (LAPWORTH et al., 2012). To je posledica različnih vzrokov. Točkovno onesnaženje povzroči onesnaženje večjih razsežnosti v okolju in se zaradi tega lažje zazna v okolju. Na splošno velja, da so inženirske rešitve sanacij točkovnih onesnaženj enostavnejše oz. bolj učinkovite kot sanacije razpršenih virov. Zgodovinsko je zakonodaja za regulacijo nadzora točkovnega onesnaženja zaradi lažje določljivosti bolj dodelana, lažje pa je tudi določiti, opazovati, predvideti širitev onesnaženja kot pri razpršenem onesnaženju (LAPWORTH et al., 2012).

Točkovni viri

Čistilne naprave za odpadno vodo veljajo za pomemben vir onesnaženja z EOC v vodnem okolju (GLASSMEYER et al., 2005). Veliko študij po svetu se je ukvarjalo s pojavom EOC v podzemni vodi v povezavi z infiltracijo odpadne vode (komunalne in industrijske). DIAZ-CRUZ & BARCELO (2008) sta raziskovala vir in pojav EOC v povezavi z umetnim bogatenjem vodonosnikov. Pokazala sta, da je umetno bogatenje mogoč vir EOC v podzemni vodi, ker so zadrževalni časi kratki, in ker se za bogatenje uporablja površinska voda. Ta lahko predstavlja glavni vir EOC v okolju, če ni urejenih čistilnih naprav za odpadno vodo.

Odlagališča komunalnih odpadkov so se izkazala za pomemben vir onesnaženja z EOC v vodonosnikih. Čeprav zakonodaja ureja gospodarjenje z odpadki, je vpliv odlagališč na okolje posledica preteklih praks, konstrukcije odlagališč, gospodarjenja z odpadki in v nekaterih primerih neprimerne lokacije. Tudi v nekaterih razvitih državah je učinkovitost zakonodaje na področju varovanja podzemne vode glede na delovanje odlagališč pomanjkljiva. To dejstvo v kombinaciji s povečano uporabo zdravil v zadnjih letih, posebej v domači rabi, napeljuje na to, da bodo odlagališča pomemben vir onesnaženja podzemne pitne vode tudi v prihodnje (AHEL & JELICIC, 2000; ECKEL et al., 1993; LAPWORTH et al., 2012).

Tudi greznice predstavljajo pomemben vir onesnaženja z EOC, predvsem na območju plitkih vo-

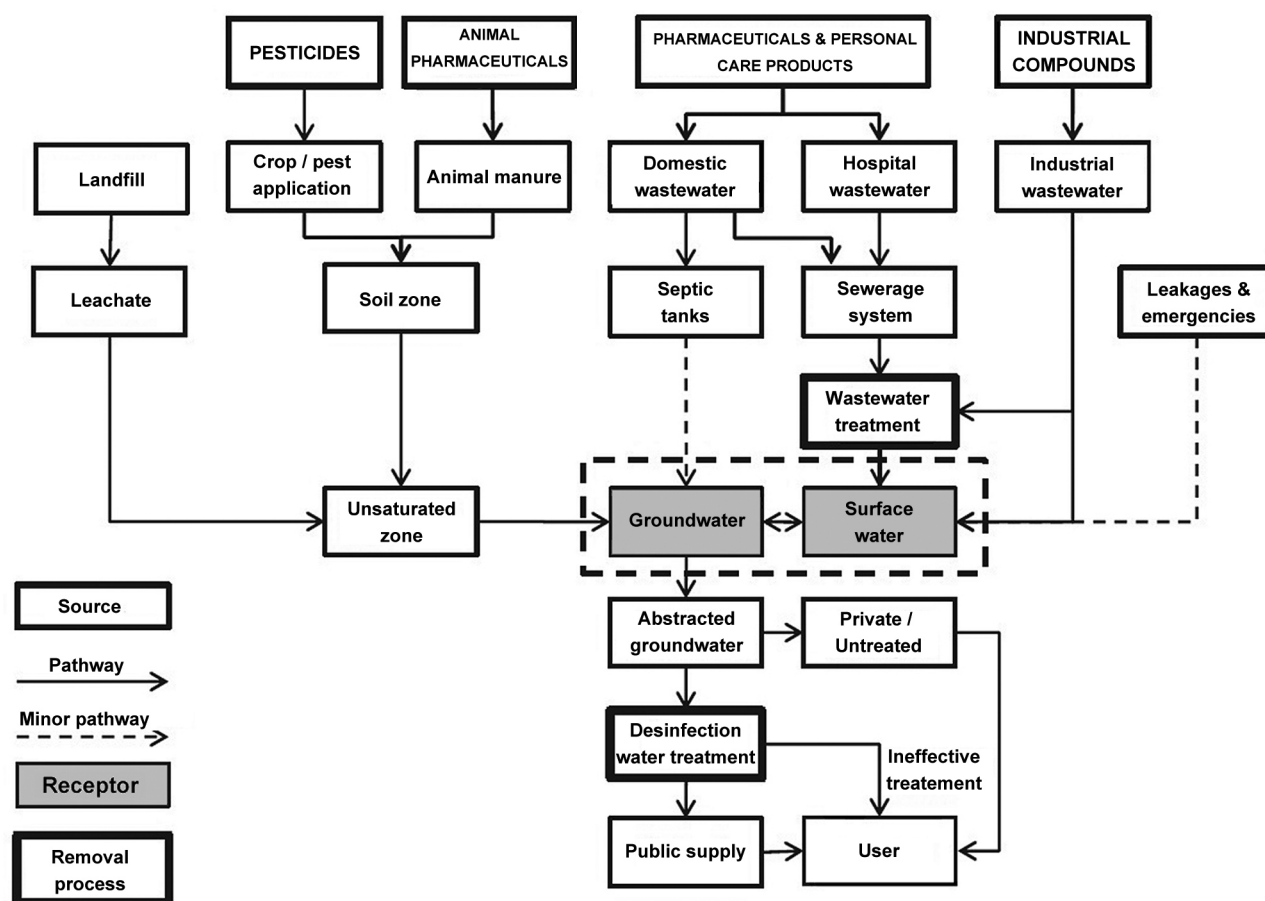


Fig. 1. Sources and pathways for emerging contaminants to reach various receptors (STUART et al., 2012)

donosnikov in vodonosnikov z visoko transmissivnostjo. Zaradi velikega števila greznic, njihove razširjene uporabe na podeželju, je učinkovit monitoring tovrstnega onesnaženja težaven celo v razvityh državah. Raziskave kažejo, da imajo greznice pomemben vpliv na pojavnost EOC v podzemni vodi (VERSTRAETEN et al., 2005), posebej na prisotnost ostankov zdravil (iboprufen, paracetamol, itd.).

V zadnjem obdobju se posebna pozornost posveča uporabi veterinarskih antibiotikov v koncentriranih živalskih krmilih kot možnemu viru okoljskega onesnaženja (BRADFORD et al., 2008; BARTELT-HUNT et al., 2011). Velik delež uporabljenih antibiotikov se iz živali izloči, kasneje pa se ga hrani na gnojiščih, zato zaradi izcejanja iz gnojišč ali gnojenja njiv predstavlja potencialno nevarnost vodnim virom.

Razpršeni viri

Poraba gnoja, gnojevke, obdelanega blata čistilnih naprav (bio-solids) je v kmetijstvu del strategije gospodarjenja z odpadki. Zato nepopolna odstranitev EOC v postopku čiščenja na komunalni čistilni napravi povzroči znatne vsebnosti v blatu, ki se ga nadalje uporabi in posledično izpira. SARMAH in sodelavci (2006) so poročali o nizkih vsebnostih veterinarskih protimikrobnih izdelkov v podzemni vodi kot posledici uporabe gnoja in gnojevke v kmetijski praksi.

Uporaba gnoja in gnojevke ter suhega blata prispeva k onesnaženju z EOC v podzemni vodi z

vertikalno migracijo skozi zemlino in nezasičeno cono. Večji vnos EOC v podzemno vodo pa predstavlja vnos z interakcijo med površinsko in podzemno vodo.

Površinske vode vsebujejo večje število EOC in v višjih vsebnostih kot podzemne vode (FOCAZIO et al., 2008), zato predstavljajo pomemben vir prenosa onesnaženja v vodonosnike. Lahko so posledica naravnih (LAPWORTH et al., 2012) ali inženirskih interakcijskih procesov podzempna-površinska voda (DREWES, 2009). Večja pojavnost EOC v površinskih vodah je posledica neposrednih izpustov odpadnih vod, kratkega zadrževalnega časa in omejene zmožnosti redčenja – razgradnje v površinskih vodah nasproti podzemnim vodam (BARNES et al., 2008). V raziskavah so EOC uporabili tudi kot sledilo za preučevanje izmenjevalnih procesov površinske in podzemne vode ter kot markerje odpadnih vod (BUERGE et al., 2009). Procesi interakcije površinske in podzemne vode so pomembni posebej v plitkih aluvialnih vodonosnikih, ki so pomemben vir pitne vode.

Med umetno bogatenje vodonosnikov lahko štejemo točkovno in tudi razpršeno onesnaženje. Zanj se uporablja površinska voda, včasih pa tudi očiščena odpadna voda. S svojim kratkim krogom razgradnje v zemljini in pod površino vodi k dolgotrajnemu onesnaženju podzemne vode.

Razpršeno izcejanje iz kanalizacijskih omrežij lahko predstavlja nevarnost za onesnaženje z EOC v urbanih okoljih, posebej tam, kjer je po-

škodovano kanalizacijsko omrežje (MORRIS et al., 2006).

Pot in sprejemniki

Poti onesnaževal od izvora do receptorjev so slabo raziskane. Transport je odvisen od fizikalno-kemijskih parametrov snovi in okolja, v katerem potuje. Neposredne poti ostankov zdravil, urbanih in industrijskih onesnaževal do podzemne vode so izcejanje iz kanalizacije, izpusti iz čistilnih naprav, izcejanje iz odlagališč komunalnih odpadkov, cistern in drugi iztoki v tla, npr. greznice.

Druga pomembna pot je interakcija med površinsko in podzemno vodo. Večina komunalnih in industrijskih izpustov je po čiščenju speljana v površinsko vodo, ki se nato infiltrira v podzemno vodo.

Zrak lahko predstavlja mehanizem prenosa tudi za nehalne snovi. Npr. prašni delci so lahko vir prenosa veterinarskih snovi v okolju (HAM-SCHER & HARTUNG, 2008).

V smislu kemijskega statusa so sprejemniki sama telesa podzemne vode, črpališča pitne vode, pridružene površinske vode in neposredno povezani ekosistemi (STUART et al., 2012). Receptorji in druga živa bitja so tako porabniki pitne vode. Jasna povezava med virom onesnaženja z EOC in sprejemnikom po navadi ni dovolj določena, da bi lahko prisotnost EOC v podzemni vodi prepoznali kot problem, zato se moramo zavedati tveganja in upoštevati prepoznavnost EOC v virih podzemne vode.

Ocena tveganja in toksičnost

Za določanje pomena in problema onesnaževal v podzemni vodi je treba obravnavati njihove toksikološke značilnosti, vendar zaradi pomanjkanja vedenja o obnašanju ter vedenja o njihovi prisotnosti v okolju za mnoge spojine ni mogoče določiti toksičnosti ter ocene tveganja. Problem predstavlja tudi pomanjkljivost podatkov o učinkih na zdravje ljudi in učinkih na vodne organizme ter drugih škodljivih učinkih na okolje. Znano pa je, da lahko tudi kratkotrajna prisotnost nekaterih spojin v okolju povzroči veliko neželenih učinkov (INTERNET 2).

Lastnosti onesnaževala, zadrževalni časi podzemne vode, redoks pogoji in celotna obremenitev so pomembni dejavniki, ki določajo prisotnost in trdovratnost onesnaževala pod površjem in v podzemni vodi. EOC, ki so bili kakor koli odloženi na površje, lahko potencialno migrirajo skozi zemljinu (OPPEL et al., 2004; SCHEYTT et al., 2004) in nezasičeno cono v nasičeno cono vodonosnika (SNYDER, 2004; ZUEHLKE et al., 2004). Glavni procesi, ki kontrolirajo EOC med podpovršinskim gibanjem, so sorbcija, v glavnem na organske snovi in glinene minerale, ionska izmenjava v zemljini in vodonosniku in mikrobiološka razgradnja (LAPWORTH et al., 2012).

Kako se spojina obnaša v okolju in podzemni vodi je odvisno od fizikalno-kemijskih lastnosti,

kot so S_w (topnost v vodi), K_{ow} (porazdelitveni koeficient oktanol/voda) in D_{ow} (koeficient odvisen od pH) ter drugih značilnosti okolja (SEDLAK & PINKSTON, 2001). Na splošno je indeks tveganja odvisen od izpostavljenosti določeni spojini, njene uporabe, frakcije in oblike, K_{ow} , DT_{50} (polovični čas razgradnje) in dnevnega vnosa. S_w in K_{ow} sta parametra, povezana z mobilnostjo spojin v vodnem okolju. Če je kazalnik $\log K_{ow}$ večji od 4, se spojina kopiči v organizmu, če pa ima K_{ow} nižje vrednosti, je spojina mobilna v okolju (STUART et al., 2012). V tabeli 1 je podana porazdelitev EOC glede na $\log K_{ow}$.

Skozi leta so se razvili različni načini ocene tveganja. COOPER s sodelavci (2008) je razvrstil ostanke zdravil v razrede tveganja glede na njihov potencial okoljske izpostavljenosti, količine predpisanih zdravil na leto, vsebnosti v površinskih vodah, vsebnosti v odpadnih vodah, okoljske razpolovne dobe za spojino, biološke razpolovne dobe, vpliva toksičnosti na ribe in rake, K_{ow} , topnost in ECOSAR (model za ocenjevanje toksičnosti industrijskih odpadkov v vodi). SANDERSON in sodelavci (2004) so razvrstili 2986 različnih farmacevtskih spojin v 51 razredov glede na nevarnost za alge, vodne bolhe in ribe. Ugotovili so, da najbolj strupen razred predstavljajo metaboliti dodatkov v prehrani. Sledijo jim zdravila za srce in ožilje, prebavila, protivirusna zdravila, uspavalna in antipsihotiki, kortikosteroidi ter zdravila za ščitnico. Na splošno so v raziskavah ugotovili, da spolni hormoni, površinsko aktivne snovi (perfluorooktan sulfonat in perfluorooktanojska kislina), diklofenak, ibuprofen, karbamazepin predstavljajo največje tveganje za površinske vode in posledično podzemno vodo (STUART et al., 2012). Za oceno tveganja v podzemni vodi je potrebno določiti povezavo med virom onesnaženja in podzemno vodo, kar pa je zelo težko, saj ne poznamo vseh lastnosti in dinamike potovanja onesnaževala od izvora do podzemne vode.

Toksičnost je lastnost neke snovi, ki povzroči škodljive učinke na organizem že v majhnih količinah. Seveda ima vsaka spojina svoje lastnosti, ki vplivajo na toksičnost. Nekatere lahko že v zelo nizkih vsebnostih povzročijo veliko škodo. Učinki in interakcije so odvisni od odmerka, zato je potrebno oceno tveganja in toksičnosti določiti z mešanicami organskih spojin in ravno izpostavljenosti v okolju (POMATI, 2008).

CARPY in sodelavci (2000) so preučevali mogoče učinke mešanic pesticidov. Raziskovalci so dokazali, da so organizmi v vodnem okolju ogroženi že ob prisotnosti nizke vsebnosti večjega števila različnih pesticidov (RELYEA, 2009). Podobno grožnjo predstavlja prisotnost ostankov mešanice zdravil v sicer nizki vsebnosti. POMATI (2008) je proučeval učinke in interakcije mešanic pogosto uporabljenih zdravil (karbamazepin, ibuprofen, sulfametoksazol). Prišel je do zaključka, da mešanice zdravil v ng/l lahko zavirajo proliferacijo (delitev) celic v telesu, saj onesnaževala prizadenejo celično fiziologijo in morfolgijo. Prav tako so ogroženi tudi tisti vodni organizmi, na katere imajo ostanki zdravil velik vpliv.

Tabela 1. Razdelitev organskih onesnaževal glede na log K_{ow} (U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2012)Table 1. Distribution of organic pollutants according to log K_{ow} (U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2012)

	log K _{ow}		
	≤ 2,5	2,5–4	≥ 4
Spojina / compound	Karbamazepin / Carbamazepine	Ibuprofen / Ibuprofen	17β-estradiol / 17β-estradiol
	Desetilatrazin / Desethyl atrazine	Naproksen / Naproxene	Diklofenak / Diclofenac
	Desizopropilatrazin / Deisopropylatrazine	Ketoprofen / Ketoprofen	
	Simazin / Simazine	Estron / Estrone	
	Propifenazon / Propifenazone	Klofibrinska kislina / Clofibric acid	
	Kofein / Coffein	Diazepam / Diazepam	
	Estriol / Estriol	Terbutilazin / Terbutylazine	
	Oksazepam / Oxazepam	Metolaklor / Metolachlor	
		17α-etinilestradiol / 17α-Ethinylestradiol	
		Atrazin / Atrazine	
		Diuron / Dioron	

Raziskave prisotnosti EOC v površinskih in podzemnih vodah v svetu

Viri podzemne vode so onesnaženi z veliko paletjo EOC spojin, ki so rezultat recentnih antropogenih aktivnosti in okoljskega onesnaženja v preteklosti. Enega izmed novejših pregledov onesnaženosti podzemne vode s produkti za osebno nego, industrijske komponente in spojine življenjskega sloga, karbamazepin, sulfametoksazol, ibuprofen, bifenol A in kofein so izvedli LAPWORTH in sodelavci (2012). Te spojine so tudi najbolj pogosto opisane v svetovni literaturi. V primerjavi s površinskimi vodami je EOC v podzemni vodi namenjeno manj pozornosti. Raziskovalci so se osredotočili na ugotavljanje vira EOC v podzemni vodi v povezavi z odpadnimi vodami, s poudarkom na točkovnih virih onesnaženja. Nedavne raziskave pa so pokazale, da se velika vsebnost onesnaževal še vedno sprosti v vodno okolje kljub procesom čiščenja vode in možnosti odstranjevanja EOC.

V evropskih študijah so določili in zaznali veliko različnih organskih onesnaževal v vodnem okolju, tako farmacevtskega, kmetijskega kot tudi industrijskega izvora. Mnoge od študij so bile povezane s preučevanjem odpadnih voda. Loos in sodelavci (2009) v svojih raziskavah opisujejo organska onesnaževala v površinskih vodah in rekah v Evropi. Odvzeli so več kot 100 vzorcev iz 27. različnih rek po Evropi ter analizirali vzorce za 35 različnih spojin. Spojine, ki so bile najpogostejše in v najvišjih vsebnostih detektirane so: benzotriazoli, kofein, karbamazepin in ocetna kislina. Le 10 % vseh vzorcev rek bi lahko uvrstili med zelo čiste v smislu kemičnega onesnaženja.

V evropski študiji EOC v podzemni vodi so odvzeli 164 vzorcev podzemne vode v 23. različnih državah. Določili so 59 izbranih organskih spojin, med katerimi so ostanki zdravil, pesticidi in njihovi metaboliti, hormoni, kofein, DEET, endokrini motilci itd. (Loos et al., 2010).

V Angliji so s pomočjo podatkov z monitoringa določili 30 najpogostejših spojin, med katere spadajo: atrazin, kofein, DEET, metaboliti pesticidov, farmacevtski izdelki, karbamazepin, triklozan, nikotin, dodatki v prehrani in alkilni fosfati (STUART et al., 2012).

Vsebnosti nekaterih onesnaževal so v površinskih vodah precej višje kot v podzemni vodi. Za primer lahko vzamemo povprečno vrednost ibuprofena, čigar vsebnost v rekah so do 100-krat višje kot v podzemni vodi. Enako velja za kofein (75-krat višje) in karbamazepin (21-krat višje). Povišane vsebnosti onesnaževal v rekah so tudi ketoprofen, sulfametoksazol in estron. Medtem ko so vsebnosti desetilatrazina, bifenola, 4-oktilfenola višje v podzemni vodi kot pa v površinski. Rezultate lahko povezujemo z različnimi izvori, različnimi potmi onesnaževal ter z različno hitrostjo razgradnje v podlagi (STUART et al., 2012).

V okviru prizadevanj za zbiranje informacij o pojavljanju ostankov zdravil in drugih organskih onesnaževal v vodi so v ZDA v letu 2000 zbrali 47 vzorcev podzemne vode v 18. zveznih državah. Raziskovalci so se osredotočili na območja, kjer je obstajal sum onesnaženja z EOC iz odpadnih vod živalskega in človeškega izvora (živalske farme, odlagališča, gospodinjstvo itd.) in industrije. Najpogostejše zaznane spojine so bile: N, N-dietiltoulamid (35 %, repelent), bisfenol A (30 %, BPA) (proizvodnja plastike in smol), tri- (2-kloroetil) fosfat (30 %, zaviralec ognja), sulfametoksazol (23 %, antibiotiki) in 4-oktilfenol monoetoksilat (19 %, detergent) (BARNES et al., 2008).

Poleti 2001 so se raziskovalci v ZDA omejili na raziskave EOC v virih pitne vode (podzemna in površinska voda) (FOCAZIO et al., 2008). Osredotočili so se na detekcijo 100. različnih spojin, ki so bile določene v vzorcih podzemne (25 vzorcev) in površinske vode (49 vzorcev). Med pet najpogostejše zaznanih spojin v površinski vodi štejemo: hoelsterol (59 %), metolaklor

(53 %), kotinin (51 %), β -sitosterol (37 %) in razgradni produkt kofeina (27 %). V podzemni vodi so se največkrat pojavili ostanki topil (24 %), karbamazepin (20 %), bisfenol A (20 %), razkrojek kofeina (16 %) in zaviralci ognja (12 %). Ugotovili so, da je glavni vir EOC v okolju živalsko in človeško izločanje, kmetijstvo, industrija in gospodinjstvo (FOCAZIO et al., 2008).

V Kanadi (Ontario) so na državni ravni (Ministrstvo za okolje) v letu 2006 odvzeli 258 vzorcev iz 17. različnih sistemov pitne vode (KLEYWEGT et al., 2011). Monitoring je potekal 16 mesecev. Raziskave so vključevale onesnaženost virov pitne vode z EOC (ostanki zdravil, hormoni in bisfenol A). Največkrat so se v vzorcih virov (reke, jezera) pitne vode pojavile sledi karbamazepina (v 50 %), gemfibrozila (33 %) (zdravilo za zdravljenje povišanih maščob v krvi), ibuprofena (21 %) in bisfenol A (22 %), medtem ko se vsebnosti nekaterih v pitni vodi niso pojavile (naproksen, sulfametazin). V pitni vodi so zaznali pojavnost karbamazepina (25 %), ibuprofena (15 %), gemfibrozila (15 %) in bisfenol A (12 %). Na podlagi rezultatov lahko zaključimo, da so vsebnosti EOC v površinskih vodah višje kot vsebnosti v podzemni vodi (KLEYWEGT et al., 2011).

Raziskave EOC v površinskih in podzemnih vodah v Sloveniji

Sistematičnih raziskav prisotnosti širšega spektra EOC v podzemnih vodah po celotni Sloveniji še ni. V okviru izvajanja različnih monitoringov se spremlja prisotnost izbranih onesnaževal. Pravilnik o imisijskem monitoringu podzemne vode določa način in obseg izvajanja imisijskega monitoringa podzemnih voda, za katere je, na podlagi uredbe o kakovosti podzemne vode (UR.L. RS, 42/2002), določeno, obvezno ugotavljanje kemijskega stanja. Državni monitoring kakovosti podzemne vode se izvaja od leta 1987. Sistematično se spremlja vrednosti različnih fizikalnih in kemijskih parametrov v podzemnih vodah v celotni Sloveniji. Analizira se okoli 150 različnih parametrov. To so parametri, merjeni ob vzorčenju, osnovni parametri, skupinski parametri onesnaženja, kovine in metaloidi, pesticidi in njihovi razgradni produkti, lahkohlapni halogenirani alifatksi ogljikovodiki in aromati ter metilirani in klorirani derivati benzena.

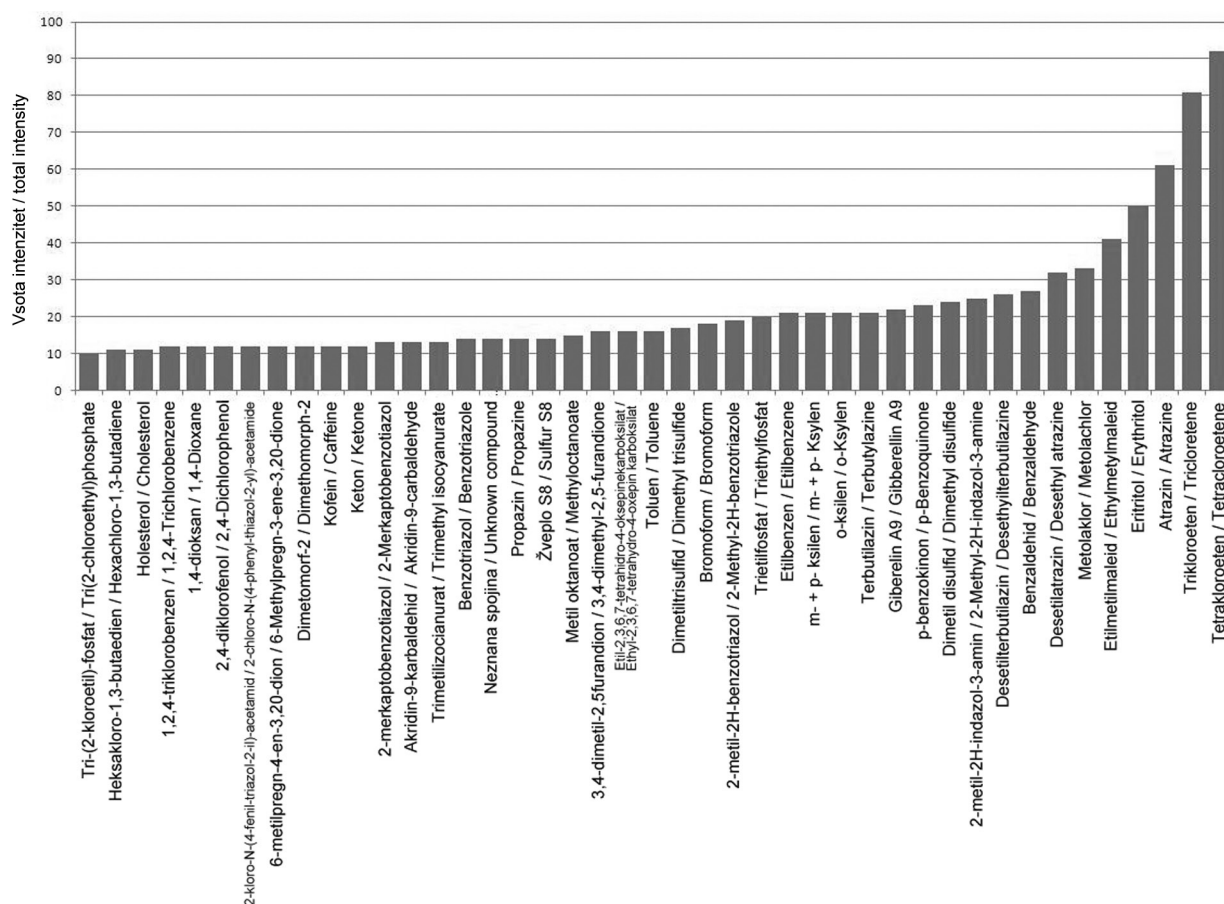
Pri pregledu raziskav EOC v Sloveniji smo se omejili na raziskave, povezane s samo identifikacijo širokega spektra EOC v podzemni vodi in na tiste, ki obravnavajo substance, ki niso zajete v predpisanih monitoringih (ostanki zdravil, hormoni ...) (tabela 2). Pregled je pokazal, da v Sloveniji ni veliko raziskav EOC v podzemni vodi. Dosedanje raziskave so omejene na večje aluvialne vodonosnike tako, da ni mogoče narediti primerjalne analize razlik pojava EOC v podzemni vodi različnih geoloških struktur. Nekaj raziskav se je ukvarjalo z vsebnostjo EOC v odpadnih vodah, ki jih lahko obravnavamo kot pomemben vir ali kot prenašalca onesnaženja podzemne vode.

Trenutno potekajo raziskave v smeri izboljšanja analitskih metod, ugotavljanja učinkov delovanja čistilnih naprav na odpadnih vodah, kvantitativne in kvalitativne identifikacije ostankov zdravil in drugih EOC na posameznih območjih. Raziskave se razvijajo tudi v eksperimentalno smer (sledilni poskusi. Itd.).

Identifikacija organskih onesnaževal

AUERSPERGER in sodelavci (2011b) so za oceno obremenjenosti vodonosnikov z organskimi onesnaževali iz različnih antropogenih virov uporabili pasivne vzorčevalnike v podzemni vodi in z njimi določili potencialno prisotne organske spojine. Pasivni vzorčevalniki so se izkazali kot primerni za kvalitativno določanje substanc za preliminarno vrednotenje stanja, ki je pomembna za zasnovno dobrega in cenovno vzdržnega monitoringa. Pasivne vzorčevalnike so testirali za določanje organskih onesnaževal na vodonosniku Vrbanjski plato in za določanje onesnaženj po globini vodonosnika na Ljubljanskem polju (LP Vodovodna) v obdobju 2010–2011. Uporabili so pasivne vzorčevalnike z granularnim aktivnim ogljem. Na sliki 2 so prikazane najpogostejše določene spojine v 27. vzorcih podzemne vode in enem vzorcu površinske vode vodonosnika na območju Maribora (ena serija pasivnih vzorčenj). V vrtni LP Vodovodna so bili pasivni vzorčevalniki nameščeni na petih globinah. Rezultati so pokazali, da so onesnaževala prisotna na različnih globinah, odvisno od njihove lastnosti (gostota in topnost) in od vira onesnaženja (točkoven, disperzen). V tabeli 3 so podane identificirane spojine v LP Vodovodna na globini 45 m, kjer je bilo znano največje onesnaženje. Analizna metoda za kvantitativno določanje organskih onesnaževal z uporabo pasivnega vzorčenja in GC-MS je pokazala zelo dobre rezultate pri oceni obremenjenosti vodonosnikov z organskimi onesnaževali (AUERSPERGER et al., 2011b). Predstavljeni rezultati so del širših raziskav določanja ostankov zdravil in drugih antropogenih onesnaževal v prodnih vodonosnikih Vrbanjskega platoja in Ljubljanskega polja (MALI et al., 2012).

AUERSPERGER in sodelavci (2009) so se ukvarjali tudi z racionalnim izborom organskih onesnaževal, ki je primeren za izvajanje monitoringa, predvsem zaradi ekonomskih vzrokov. Zaradi kompleksnosti monitoringa je smiselno najprej na kvalitativnem nivoju zasledovati čim večje število organskih spojin in si tako ustvariti sliko o stanju v vodonosniku. Pri tem se lahko poslužujejo različnih tehnik npr. različne vrste kromatografije. Rezultat preliminarne identifikacije organskih onesnaževal v vodonosniku je optimalna izvedba kvantitativnega spremljanja zgolj zbranih organskih onesnaževal z večjo natančnostjo, kar olajša kasnejšo hidrogeološko obravnavo. V obdobju od 2002 do 2007 so bili na območju vodonosnika Ljubljansko polje in Ljubljansko barje odvzeti vzorci, pri katerih so bila organska onesnaževala kvalitativno identificirana (sl. 3). Predstavljeni analizni postopek omogoča istočasno identifi-



Sl. 2. Pregled najpogostejše identificiranih spojin v 27 vzorcih podzemne vode Vrbanskega platoja in enem vzorcu površinske vode istega vodonosnika (AUERSPERGER et al, 2011b) (*vsota intenzitet je vsota vseh intenzivnosti pojavljanja določene spojine v vzorcih)

Fig. 2. Review frequently identified compounds in 27 samples of Vrbanski plato groundwater and one sample of surface water of the same aquifer (AUERSPERGER et al, 2011b) (*Total intensity is the sum of the intensity of the occurrence of certain compounds in the samples)

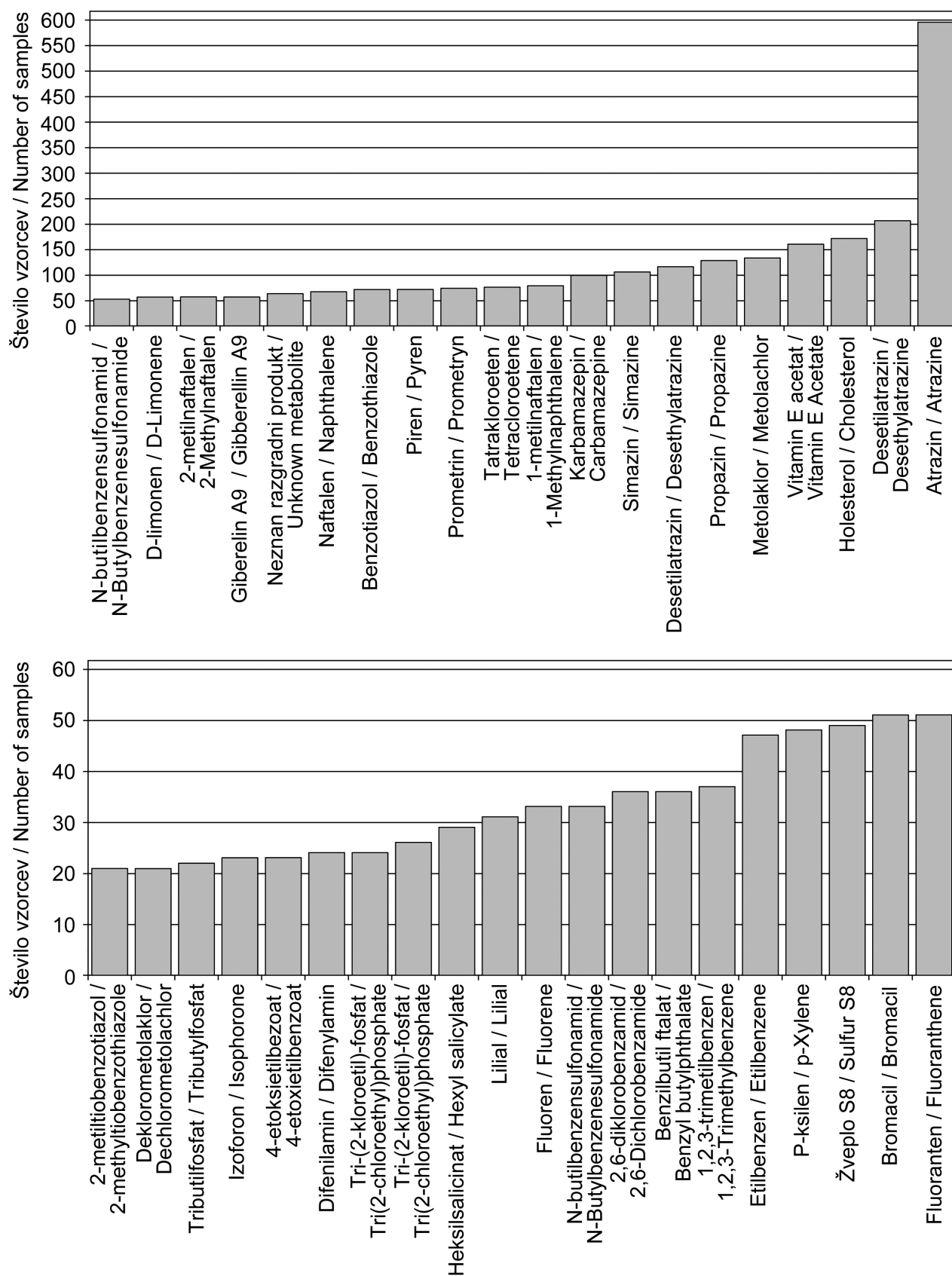
cijo zelo hlapnih in srednje hlapnih spojin, kot so: lahkohlapni aromatski in halogenirani ogljikovodiki, farmacevtske učinkovine in hormoni, zavranci ognja, pesticidi in njihovi razgradni produkti itd. (AUERSPERGER et al., 2009).

Ostanki zdravil, hormoni in kofein

JAMNIK in sodelavci (2009a) so v podzemni vodi na območju Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja preučevali prisotnost ostankov zdravil kot posledico antropogenega vpliva na okolje. Oba vodonosnika sta zaradi velikih količin vode pomembna vodna vira za oskrbo pitne vode za mesto Ljubljana in okolico. V letih 2008–2009 so v vodonosnikih preučili kofein ter njegov razgradni produkt, 1,7-dimetilksantin, ter težje razgradljiva propifenazon in karbamazepin. Karbamazepin in kofein sta bila kvantitativno določena do vsebnosti 10 ng/l, propifenazon pa do 2 ng/l. V raziskavi so ugotovili, da vodonosnika Ljubljansko polje in Ljubljansko barje nista prekomerno obremenjena s kofeinom, karbamazepinom in propifenazonom, sledi onesnaženja pa so opazne. Na črpališčih javne oskrbe s pitno vodo ni bilo zaznati vsebnosti obravnavanih onesnaževal nad mejo analitskih metod, z izjemo v vodarni Hrastje, kjer so zaznali sledi karbamazepina. Med obravnavanimi spo-

jinami je v vodi v največjih vsebnostih zaznan kofein, ki kaže na nedavno onesnaženje s komunalnimi odplakami. Avtorji poudarjajo, da je ugotavljanje antropogenih snovi v nizkih vsebnostih v vodi pomemben indikator sprememb v okolju.

V letih 2010–2011 so se v okviru širših raziskav antropogenih vplivov na podzemno vodo na prispevnem območju vodonosnika Vrbanski plato, iz katerega se oskrbuje sistem mariborskega vodovoda, določali tudi karbamazepin, propifenazon in kofein. Na prispevnem območju vodonosnika Vrbanski plato so bile določene najvišje vsebnosti karbamazepina na Limbuški Dobravi (do 61,5 ng/l), v neposrednem zaledju črpališča Mariborski otok. Drugje so bile določene vrednosti do 20 ng/l, na opuščnem industrijskem delu na Taboru pa so dosegale vrednosti okoli 40–60 ng/l. Propifenazon smo zaznali nad mejo zaznavnosti metode (2 ng/l) samo mestoma. Najvišje vrednosti za kofein smo po pričakovanjih določili v Dravi (67–108 ng/l). Kofein je bil nad mejo LOD (2 ng/l) določen na treh mestih, ki so v neposredni interakciji z Dravo in na nekaterih mestih v ožjem centru mesta. V mestu lahko sklepamo, da je kofein indikator pomanjkljivega (starega) kanalizacijskega omrežja. Sledi onesnaževal v podzemni vodi dokazujejo, da urbana raba prostora vpliva na kakovost podzemne vode (MALI et al., 2012).



Sl. 3. Število vzorcev, pri katerih je bilo identificirano organsko onesnaževalo (2002–2007) na Ljubljanskem polju in Ljubljanskem barju (AUERSPERGER et al., 2009)

Fig. 3. The number of samples in which were identified organic pollutants in Ljubljansko polje and Ljubljansko barje (2002–2007) (AUERSPERGER et al., 2009)

Tabela 2. Ostanke zdravil in druga antropogena organska onesnaževala v raziskavah vodnega okolja v Sloveniji
 Table 2. Pharmaceuticals and other anthropogenic organic pollutants in researches on water environment in Slovenia

	Vrsta	Katera snov	Reference
Odpadne in površinske vode / Wastewater and surface waters	Ostanke zdravil / Pharmaceutical residues	Ibuprofen, Ketoprofen, Naproksen, Diklofenak / Ibuprofen, Ketoprofen, Naproxene, Diclofenac	HEAT et al. (2006)
Odpadne in površinske vode	Ostanke zdravil / Pharmaceutical residues	Diazepam, Bromazepam, Oksazepam / Diazepam, Bromazepam, Oxazepam	KOSJEK et al. (2012)
Odpadne in površinske vode / Wastewater and surface waters	Hormoni / Hormones	Estron, 17β-estradiol, 17α-etinilestradiol / Estrone, 17β-estradiol, 17α-Ethinylestradiol	HEAT et al. (2010)
Odpadne vode / Wastewater	Hormoni / Hormones	Estron, 17β-estradiol, Estriol, 17α-etinilestradiol / Estrone, 17β-estradiol, Estriol, 17α-Ethinylestradiol	AVBERŠEK et al. (2011a)
Odpadne vode / Wastewater	Hormoni / Hormones	Estron, 17β-estradiol, Estriol, 17α-etinilestradiol / Estrone, 17β-estradiol, Estriol, 17α-Ethinylestradiol	AVBERŠEK et al. (2011b)
Podzemna voda / Groundwater	Kofein / Caffeine	Kofein / Caffeine	AUERSPERGER et al. (2011a)
Podzemna voda / Groundwater	Druga organska onesnaževala / Other organic pollutants	2,6-diklorobenzamid, 3,4-dikloroanilin, Ametrin, Atrazin, Bromid, Desetilatrazin, Desizopropilatrazin, Desetilterbutilazin, Karbamazepin, Klorotoluron, Linuron, Diuron, Metolaklor, Prometrin, Propazin, Simazin, Terbutilazin, Terbutrin, 17β-estradiol, 17α-etinilestradiol, Testosteron, Etinilestradiol, Progesteron, Estriol / 2,6-Dichlorobenzamide, 3,4-Dichloroaniline, Ametryn, Atrazine, Bromide, Desethylatrazine, Deisopropylatrazine, Desethylterbutilazine, Carbamazepine, Chlorotoluron, Linuron, Diuron, Metolachlor, Prometrine, Propazine, Siamazine, Terbutylazine, Terbutryn, 17β-estradiol, 17α-Ethinylestradiol, Testosterone, Ethinylestradiol, Progesterone, Estriol	JAMNIK et al. (2009b)
Podzemna voda / Groundwater	Druga organska onesnaževala / Other organic pollutants	Atrazin, Desetilatrazin, Holesterol, Vitamin E acetat, Metolaklor, Propazin, Desetilatrazin, Simazin, Karbamazepin, 1-metilnaftalen, Tetrakloroeten, Prometrin, Piren, Benzotiazol, Naftalen, Neznani razgradni produkt metolaklora, Gibberelin, 2-metilnaftalen, D-limonen, N-butilbensensulfonamid, Fluoranten, Bromacil, P-ksilen, Etilbenzen, 1,2,3-trimetilbenzen, Benzilbutil ftalat, 2,6-diklorobenzamid, N-butilbensensulfonamid, Fluoren, Lilial, Heksilsalicinat, tri-(2-kloroetil)-fosfat, Difenilamin, Izoforon, Tributilfosfat, 2-metilbenzotiazol / Atrazine, Desethylatrazine, Cholesterol, Vitamin E Acetate, metolachlor, Propazine, Desethylatrazine, Simazine, Charbamazepine, 1-Methylnaphthalene, Tetrachloroetene, Prometryn, Pyren, Benzothiazole, Naphthalene, Unknown metabolite of Metolachlor, Gibberellin, 2-Methylnaftalen, D-Limonene, N-Butylbenzenesulfonamide, Fluoranthene, Bromacil, p-Xylene, Etilbenzene, 1,2,3-Trimethylbenzene, Benzyl butylphthalate, 2,6-Dichlorobenzamide, N-Butylbenzenesulfonamide, Fluorene, Lilial, Hexyl salicylate, Tri(2-chloroethyl)phosphate, Difenylamin, Isophorone, Tributylfosfat, 2-methyltiobenzothiazole	AUERSPERGER et al. (2009)
Podzemna voda / Groundwater	Druga organska onesnaževala / Other organic pollutants	Kofein, Diuron, Desetilatrazin, Desetilterbutilazin, Atrazin, Terbutilazin, Metolaklor, Karbamazepin, Desizopropilatrazin, Simazin, Propazin, Propifenazon / Caffeine, Diuron, Desethylatrazine, Desethylterbutilazine, Atrazine, Terbutylazine, Metolachlor, Carbamazepine, Deisopropylatrazine, Simazine, Propazine, Propifenazone	MALI et al. (2012)
Podzemna voda / Groundwater	Ostanke zdravil / Pharmaceutical residues	Karbamazepin, Propifenazon, Kofein / Carbamazepine, Propifenazone, Caffeine	JAMNIK et al. (2009a)
Površinske vode / Surface waters	Ostanke zdravil / Pharmaceutical residues	Ibuprofen, Naproksen, Ketoprofen, Diklofenak / Ibuprofen, Naproxene, Ketoprofen, Diclofenac	KOSJEK et al. (2005)
Površinske vode in podzemna voda / Surface waters and groundwater	Druga organska onesnaževala – Pasivni vzorčevalniki / Other organic pollutants - passive samplers	Tri(2-kloroetil)-fosfat, Heksakloro-1,3-butadien, Holesterol, 1,2,4-triklorobenzen, 1,4-dioksan, 2,4-diklorofenol, 2-kloro-N-(4-fenil-triazol-2-il)-acetamid, 6-metilpregn-4-en-3,20-dion, Dimetomorf-2, Kofein, Keton, 2-merkaptopbenzotiazol, Akridin-9-karbaldehid, Trimetilzocianurat, Benzotiazol, Propazin, Metil oktanoat, 3,4-dimetil-2,5-furandion, Etil-2,3,6,7-tetrahidro-4-oksepinekarboksilat, Toluene, Dimetiltrisulfid, Bromoform, 2-metil-2H-benzotiazol, Trietilfosfat, Etilbenzen, m- + p-ksilen, o-ksilen, Terbutilazin, Gibberelin, p-benzokinon, Dimetil disulfid, 2-metil-2H-indazol-3-amin, Desetilterbutilazin, Benzaldehid, Desetilatrazin, Metolaklor, Etilmetilmaleid, Eritritol, Atrazin, Trikloroeten, Tetrakloroeten / Tri(2-chloroethyl)phosphate, Hexachloro-1,3-butadiene, Cholesterol, 1,2,4-Trichlorobenzene, 1,4-Dioxane, 2,4-Dichlorophenol, 2-chloro-N-(4-phenyl-thiazol-2-yl)-acetamide, 6-Methylpregn-3-ene-3,20-dione, Dimethomorph-2, Caffeine, Ketone, 2-Merkaptobenzotiazol, Akridin-9-carbaldehyde, Trimethyl isocyanurate, Benzothiazole, Propazine, Methyl octanoate, 3,4-dimethyl-2,5-furandione, Ethyl-2,3,6,7-tetrahydro-4-oxepin karboksilat, Toluene, Dimethyl trisulfide, Bromoform, 2-Methyl-2H-benzotriazole, Triethylfosfat, Etilbenzene, m- + p- Ksilen, o-Ksilen, Terbutylazine, Gibberellin, p-Benzoquinone, Dimethyl disulfide, 2-Methyl-2H-indazol-3-amine, Desethylterbutilazine, Benzaldehyde, Desethyl atrazine, Metolachlor, Ethylmethylmaleid, Erythritol, Atrazine, Tricloroetene, Tetrachloroetene	AUERSPERGER et al. (2011b), MALI et al. (2012)

Tabela 3. Identificirane spojine v vodnjaku LP Vodovodna na globini 45 m, kjer je bilo zaznано največje onesnaženje (AUERSPEGER et al, 2011b) (*št. CAS je številčni identifikator kemijskih elementov, spojin, polimerov, bioloških sekvenc, itd.; t_r = retenzijski čas)
 Table 3. Compounds identified in well LP Vodovodna at a depth of 45 m, where the maximum contamination was detected (AUERSPEGER et al, 2011b) (* CAS no. is numeric identifier for chemical elements, compounds, polymers, biological sequences, etc.; t_r = retention time)

t_r , min	Ime spojine / Name of compound	CAS št. / CAS no.	Intenziteta / Intensity, 1–5	Vir, razlaga / Source, explanation
3,0	Trikloroeten / Triclorethene	79-01-6	3	Kemično čiščenje, razmaščevanje, industrijsko topilo / Dry cleaning, degreasing, industrial solvent
3,1	1,4-dioksan / 1,4-Dioxane	123-91-1	1	Stabilizator v halogeniranih topilih, topilo, čistila / Stabilizer in halogenated solvents, detergents
3,1	3-metilbutanal / 3-Methylbutanal	590-86-3	2	Farmacija, kozmetika, arome / Pharmaceuticals, cosmetics, flavour
3,2	2-metilbutanal / 2-Methylbutanal	96-17-3	2	Arome, naravna spojina / Flavour, natural compound
4,4	Tetrakloroeten / Tetracloroethene	127-18-4	4	Topilo, razmaščevanje kovin, kemično čiščenje / Solvent, metal degreasing, dry cleaning
5,6	Beta iononon / Beta-Ionone	14901-07-6	2	Terpenoidna spojina / Terpenoid compound
7,8	Trietilfosfat / Triethylfosfat	78-40-0	1	Plastifikator / Plasticiser
13,1	Desetilatrazin / Desethyl atrazine	6190-65-4	3	Razgradni produkt atrazina / Metabolite of atrazine
13,2	2,6-diklorobenzamid / 2,6-Dichlorobenzamide	2008-58-4	1	Razgradni produkt diklobenila / Metabolite of dichlobenil
13,4	Desetilterbutilazin / Desethyl terbuthylazine	30125-63-4	1	Razgradni produkt terbutilazina / Metabolite of terbuthylazine
14,1	Simazin / Simazine	122-34-9	1	Herbicid / Herbicide
14,3	Atrazin / Atrazine	1912-24-9	5	Herbicid / Herbicide
14,4	Propazin / Propazine	139-40-2	2	Herbicid / Herbicide
14,7	Terbutilazin / Terbutylazine	5915-41-3	1	Herbicid / Herbicide
15,8	Kofein / coffein	58-08-2	1	Urbane odpadne vode / Urban wastewater
16,6	Pirimetanil / Pyrimethanil	53112-28-0	1	Fungicid / Fungicide
17,7	Bromacil / Bromacil	314-40-9	2	Herbicid / Herbicide
18,2	Metolaklor / Metolachlor	51218-45-2	2	Herbicid / Herbicide
19,4	Žveplo S8 / Sulfur S8	10544-50-0	3	Nafta, gume, redukcija sulfata / Oil, rubber, sulfate reduction
21,1	Giberelin A9 / Gibberellin A9	427-77-0	1	Naravni fungicid / Natural fungicide
25,5	Razgradni produkt m/z 162, 282 / Metabolite 162, 282	-	2	Razgradni produkt metolaklora / Metabolite of metolachlor
26,2	Karbamazepin / Carbamazepine	298-46-4	2	Zdravilo / Medicine drug
43,1	Holesterol / Cholesterol	57-88-5	1	Hormon, gnojevka, greznice, kanalizacija / Hormone, manure, septic tanks, sewage

AUERSPERGER s sodelavci (2011a) je razvil metodo določanja kofeina v podzemni vodi z ekstrakcije na trdno fazo (SPE) in plinsko kromatografijo z masno spektrometrijo (GC-MS) z uporabo internega standarda. Za določanje kofeina se največkrat uporabljajo metode tekočinske kromatografije, mogoče pa ga je določati tudi z GC-MS. V slednjem primeru je za doseganje večje natančnosti in točnosti smiselno uporabiti metodo internega standarda. Razvoj analize metode za določanje kofeina je potekal po akreditirani metodi z delno fleksibilnim obsegom po prilogi akreditacijske listine LP-023. Kofein je zaradi dobre mobilnosti v vodonosniku in hkrati dobre biorazgradljivosti lahko dober indikator »hitrih« potih za onesnaženje urbanega izvora.

V sklopu raziskav prisotnosti ostankov zdravilnih učinkovin v odpadnih vodah so na Institutu Jožef Stefan (IJS) ugotavljali, kako so čistilne naprave pri čiščenju odpadnih vod učinkovite. Preučevali so predstavnike nesteroidnih protivnetnih učinkovin (ibuprofen, naproksen, diklofenak in ketoprofen) (NSAID) ter določili, da je odstranitev zdravilnih učinkovin v čistilni napravi več kot 78 % (KOSJEK et al., 2005; HEATH et al., 2006). Svoje ugotovitve so dopolnili z mednarodnimi raziskavami (Španija, Belgija, Nemčija in Slovenija) (HERNANDO et al., 2006), ki so potrdile njihove rezultate.

KOSJEK in sodelavci (2012) so raziskovali tudi zdravilne učinkovine s psihoaktivnim delovanjem in njihove razgradne produkte v postop-

kih čiščenja vod. Preučevali so benzodiazepine (diazepam, oksazepam in bromazepam) v vodnem okolju in postopkih čiščenja. S primerjavo različnih vzorcev (reke, odpadne vode čistilnih naprav pred in po čiščenju, bolnišnične odplake, vode v okolici farmacevtske industrije) so ugotovili, da so najvišje vsebnosti benzodiazepinov prisotne v bolnišničnih odplakah (diazepam (111 ng/l), bromazepam (158 ng/l) in oksazepam (72 ng/l)). Odstranjevanje zdravilnih učinkovin je različno, glede na tehniko. Vsebnosti diazepama se iz okolja na čistilni napravi odstranijo v 16–83 %, oksazepama pa od 20–24 %. Z rezultati so prišli do zaključka, da je za najboljše odstranjevanje potrebno uporabiti več tehnik in načinov čiščenja odpadne vode.

V raziskavah steroidnih estrogenov so slovenski raziskovalci (AVBERŠEK et al., 2011b) razvili postopek s prilagoditvijo ER-Calux testa, ki omogoča zaznavanje estrogenega potenciala brez predhodne ekstrakcije vzorcev. Optimizacija (izboljšanje) ER-Calux testa omogoča testiranje večjega števila vzorcev z nižjimi materialnimi stroški in krajšim časom analize. V medlaboratorijski primerjavi 11. različnih laboratorijev v Evropi določanja treh steroidnih estrogenov (17 α -etinilestradiol, 17 β -estradiol in estron) v različnih vodnih vzorcih (voda iz pipe, rečna voda, voda čistilnih naprav) se je pokazala visoka raven usposobljenosti sodelujočih laboratorijev, ki merijo steroidne estrogene v vodnih vzorcih (HEATH et al., 2010). Med njimi je bil tudi slovenski laboratorij Instituta Jožef Stefan.

AVBERŠEK in sodelavci (2011a) so v svojih raziskavah določali steroidne estrogene (17 α -etinilestradiol, 17 β -estradiol, estron in estriol) v bolnišničnih odplakah in povezanih čistilnih napravah. Vzorčenje je potekalo dnevno od ponedeljka do sobote (6 dni), januarja 2007. Ugotovili so, da vsebnosti steroidnih estrogenov v bolnišničnih odpadnih vodah dnevno nihajo, na kar vpliva delovni čas bolnišnic. Rezultati kažejo, da so bili estron (14,0–31,3 ng/l), 17 β -estradiol (<LOQ do 2,8 ng/l) in estriol (152 do 385,5 ng/l) prisotni v vseh vzorcih, medtem ko so 17 α -etinilestradiol zaznali samo v enem. Sobotni vzorci so pokazali nižje vsebnosti vseh treh spojin, predvsem estriol (6,4 ng/l). Z raziskavami na čistilni napravi so ugotovili, da je odstranjevanje steroidnih estrogenov v odpadnih vodah učinkovito od 50 do 90 %, na kar vpliva njihova visoka biološka aktivnost. Raziskovalci poudarjajo pomen estriola, ker je pomembno onesnaževalo odpadnih bolnišničnih vod in čistilnih naprav.

V zadnjem letu lahko v Sloveniji zasledimo porast raziskav pojava in vpliva ostankov zdravil v okolju. V januarju 2011 se je začel evropski projekt EU CytoThreat, ki se osredotoča na oceno nevarnosti za okolje in zdravje ljudi zaradi ostankov citostatikov v različnih vodnih vzorcih (INTERNET 3). V okviru ARRS projekta, »Uporaba zdravil in pesticidov pri zdravstvenem varstvu živali z vidika varovanja okolja«, ki se je začel oktobra 2011, bodo kvalitativno in kvantitativno ovrednotili uporabo nekaterih protimikrobnih in

protiparazitnih zdravil ter pesticidov in proučili vplive, ki jih te učinkovine lahko imajo na okolje in zdravje ljudi (INTERNET 4).

Kako naprej?

Vprašanja, ki se nam postavljajo v zvezi s pojavom EOC v podzemni vodi, so od detekcije snovi, razvoja analitskih metod, ugotavljanja izvora, študija transportnih procesov, ugotavljanja učinkov novih substanc pa do postavitev smernic za monitoring in določitev mejnih vrednosti v podzemni vodi.

Transport in dinamika EOC v vodonosniku, tako v nasičeni kot nezasičeni coni, je slabo raziskana. Do sedaj je bilo malo raziskav usmerjenih v razumevanje pomena in obsega hidrogeoloških procesov kot so zadrževalni časi v vodonosniku ali vpliv redoks potenciala na obnašanje EOC spojin v podzemni vodi (WORRALL & KOLPIN, 2004; WORRALL & BESIEN, 2005). Prav tako je slabo raziskano dogajanje z EOC spojinami v interakciji površinske in podzemne vode, zato je to področje zelo pomembno za prihodnje raziskave (LEWANDOWSKI ET AL., 2011; BANZHAF et al., 2011).

Pri pregledu raziskav EOC v podzemni vodi (LAPWORTH et al., 2012) so raziskovalci ugotovili, da se razgradni produkti lahko pojavljajo pogostejše in v večjih vsebnostih v primerjavi s prvotno spojino (npr. kotinin, estron, klofibrična kislina in nonilfenoli). Enako velja za nekatere pesticide, zato je nadzor razgradnih produktov pomemben v enaki meri kot nadzor primarnih spojin. Monitoring in določanje novih onesnaževal v podzemni vodi lahko izboljšamo tudi z biološkimi testi, ki so učinkoviti pri ocenjevanju toksikološke dejavnosti, z uporabo pasivnih vzorčevalnikov in biosenzorjev.

Prav tako je pomembno vprašanje učinkov nizkih vsebnosti in vsebnosti, ki so pod mejo detekcije. DAUGHTON (2004) se je ukvarjal z raziskavami, kako vsebnosti EOC v okolju vplivajo na ljudi in v kolikšni meri, kakšne so posledice ponovne uporabe in čiščenje odpadnih voda. Reševanje vprašanja dovoljenih vsebnosti EOS in njihovih dolgoročnih učinkov postavlja velik izziv za znanost in družbo nasploh, predvsem s stališča ocene tveganja in upravljanja z onesnaževanjem ter določitvijo mejnih vrednosti posameznih onesnaževal.

Standardi podzemne vode so določeni glede na Vodno direktivo (UR. L. RS 67/2002, 110/2002, 2/2004, 41/2004, 57/2008, 57/2012), ki določa mejne vrednosti za posamezna onesnaževala, med katerimi pa ni vseh EOC. Določitev mejnih vrednosti EOC je eden od izzivov v prihodnosti.

Prvi korak pri preprečevanju onesnaženosti je zmanjševanje vnosa EOC v podzemno vodo, kar lahko kontroliramo s pravilnim čiščenjem odpadne vode, boljšo evidenco glede uporabe EOC, zmanjšanje izpustov in površinske in podzemne vode itd. Glavni izziv pri čiščenju odpadne vode je izboljšanje obstoječih procesov, oblikovati nove boljše procese, da bi lahko iz odpadnih voda od-

stranili večji odstotek in več različnih onesnaževal (STUART et al., 2012). Zelo pomembno vlogo igra tudi ozaveščenost ljudi glede posledic in učinkov nepravilnega ravnanja z odpadki, potrebna pa so bolj jasna navodila za odstranitev zdravil in drugih EOC iz okolja, zmanjšanje dostopnosti zdravil »brez recepta«, ločevanje odpadkov, zmanjšanje vnosa v dotrajan kanalizacijski sistem itd.

Če povzamemo, se bodo raziskave EOC v podzemni vodi odvijale v naslednji smeri:

- ugotavljanje/identificiranje novih onesnaževal v podzemni vodi;
- določanje virov in študij transportnih procesov onesnaževal;
- razvoj in optimizacija analitskih metod za določanje EOC;
- ugotavljanje stopnje obremenjenosti v vodonosnikih za EOC;
- ugotavljanje možnih novih poti za izpostavljenost ljudi;
- raziskave vpliva na ljudi in mikroorganizme;
- razvoj cenovno in časovno učinkovitega monitoringa.

Zaključki

Onesnaženost podzemnih voda z različnimi EOC je posledica antropogenih dejavnosti v sedanjosti in posledica bremen onesnaženj v preteklosti. V vodnem okolju odkrivamo široko paleto organskih onesnaževal (nanomateriali, pesticidi, ostanki zdravil, industrijske spojine, stranski proizvodi čistilnih naprav, spojine osebne nege in mošusi, ognjevzdržni materiali, površinsko aktivne snovi, kofein, nikotin ter hormoni). Najpogostejše najdene spojine v podzemni vodi v Evropi so: bifenol A, kofein, karbamazepin, DEET, galaksolid, ibuprofen, iopamidol, ftalati, fenil etoksilati in sulfametaksazoli. Poleg tega je precej metabolitov pesticidov, ostankov zdravil, nikotina, kofeina in dodatkov v prehrani.

V podzemnih vodah so EOC spojine lahko prisotne dlje kot pa v površinskih vodah, na kar vpliva dinamika vode, nizke populacije mikroorganizmov v vodi in redoks potencial v nasičenem območju. Vsebnosti nekaterih spojin so višje v površinskih vodah kot v podzemni (ibuprofen, kofein), medtem ko so nekatere vsebnosti višje v podzemni vodi glede na površinske vode (desetil atrazin). Na vrednost vsebnosti vplivajo vir in transport, razgradljivost onesnaževala ter geološki pogoji.

Raziskave EOC so pomembne za oceno pomembnosti različnih virov onesnaženja, transportnih procesov in določanje fizikalno-kemijskih lastnosti onesnaževal. S poznavanjem teh parametrov bomo lahko nadzorovali pojavnost EOC v podzemni vodi. Za vsako spojino je potrebno določiti povezavo med izvorom onesnaževal in podzemno vodo. Za ocene tveganj uporabljamo znanje o toksikoloških učinkih, čeprav učinkov mešanic različnih spojin ne poznamo. Pomanjkljivo znanje je tudi na področju sorpcijskih pro-

cesov v različnih podlagah ter interakcijah med nezasičeno in nasičeno cono. Prav tako je slabo poznana dinamika onesnaževal iz razpršenih virov (kmetijstvo, kanalizacija), zato so v prihodnosti potrebne podrobne raziskave za celovito oceno prostorskega in časovnega pojavljanja EOC v podzemni vodi.

Za zmanjšanje, v določeni meri še nepoznane tveganja, je potrebno določiti mejne vrednosti EOC v okolju in njihov vpliv. Posvetiti se je potrebno preprečevanju njihovega pojavljanja v okolju in podzemni vodi. Potreben bi bil tudi tehnološki razvoj v smeri novih, manj nevarnih (toksičnih) materialov. Pomembna pa je seveda tudi ozaveščenost ljudi, saj najbolj vplivamo na vnos EOC v okolje, zato lahko sami v določeni meri preprečimo tovrstno onesnaževanje.

Zahvala

Pregled raziskav je bil narejen v okviru projekta Urbana hidrogeologija – študij transportnih procesov ostankov zdravil v prodnih vodonosnikih (L1-2261) in v okviru raziskovalnega programa Podzemne vode in geokemija (P1-0020), ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS).

Literatura in viri

- AHEL, M. & JELICIC, I. 2000: Occurrence of phenazone analgetics in landfill-leachate polluted groundwater. Preprints of Extended Abstracts. Symposia Papers Presented Before the Division of Environmental Chemistry, 40: 109-111.
- AUERSPERGER, P., LAH, K., JAMNIK, B. & NARTNIK, M. 2009: Določitev racionalnega nabora organskih onesnaževal v podzemni vodi. Geološki zbornik, 19. Posvetovanje slovenskih geologov. Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, oddelek za geologijo: 12-15.
- AUERSPERGER, P., LAH, K. & KRAMARIČ ZIDAR, V. 2011a: Določanje kofeina v podzemni vodi z uporabo ekstrakcije na trdno fazo in plinske kromatografije z masno spektrometrijo = Determination of caffeine in groundwater by solid phase-extraction and gas chromatography mass spectrometry. V: KRAVANJA, Z. et al., (ur.): Slovenski kemijski dnevi 2011.
- AUERSPERGER, P., LAH, K., KRAMARIČ ZIDAR, V. & MALI, N. 2011b: Kvalitativni monitoring organskih onesnaževal v podzemni vodi z uporabo pasivnega vzorčenja in plinske kromatografije z masno spektrometrijo = Qualitative monitoring of organic pollutants in groundwater by passive sampling and gas chromatography mass spectrometry. V: KRAVANJA, Z. et al. (ur.): Slovenski kemijski dnevi 2011.
- AVBERŠEK, M., SÖMEN, J. & HEATH, E. 2011a: Dynamics of steroid estrogen daily concentrations in hospital effluent and connected waste water treatment plant. Journal of Environmental Monitoring, 13: 2221-2226, doi:10.1039/c1em10147a.
- AVBERŠEK, M., ŽERUGA, B., FILIPIČ, M. & HEATH, E. 2011b: Določanje vsebnosti steroidnih estro-

- genov v odpadnih vodah brez predhodne ekstrakcije vzorcev. 3. študentska konferenca Mednarodne podiplomske šole Jožefa Stefana = 3rd Jožef Stefan International Postgraduate School Students Conference, 25. maj 2011, Ljubljana, Slovenija. Internet: <http://ipssc.mps.si/2011/papers/Avbersek-1-paper.pdf>.
- BANZHAF, S., KREIN, A. & SCHEYTT, T. 2011: Investigative approaches to determine exchange processes in the hyporheic zone of a low permeability riverbank. *Hydrogeology Journal*, 19/3: 591-601, doi:10.1007/s10040-011-0707-4.
- BARNES, K. K., KOLPIN, D. W., FURLONG, E. T., ZAUGG, S. D., MEYER, M. T. & BARBER, L. B. 2008: A national reconnaissance of pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants in the United States – I) Groundwater. *Science of the Total Environment*, 402/2-3: 192-200, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.04.028.
- BARTELT-HUNT, S., SNOW, D. D., DAMON-POWELL, T. & MIESBACH, D. 2011: Occurrence of steroid hormones and antibiotics in shallow groundwater impacted by livestock waste control facilities. *Journal of Contaminant Hydrology*, 123/3-4: 94-103, doi:10.1016/j.jconhyd.2010.12.010.
- BEDDING, N. D., MCINTYRE, A. E., PERRY, R. & LESTER, J. N. 1982: Organic contaminants in the aquatic environment I. Sources and occurrence. *Science of the Total Environment*, 25/2: 143-167, doi:10.1016/0048-9697(82)90083-3.
- BESTER, K., SCHOLES, L., WAHLBERG, C. & MCARDLE, C. 2008: Sources and Mass Flows of Xenobiotics in Urban Water Cycles – an Overview on Current Knowledge and Data Gaps. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 8/5-6: 407-423, doi:10.1007/s11267-008-9189-3.
- BRADFORD, S. A., SEGAL, E., ZHENG, W., WANG, Q. & HUTCHINS, S. R. 2008: Reuse of concentrated animal feeding operation wastewater on agricultural lands. *J. Environ. Qual. Journal of Environmental Quality*, 37/5: S97-S115, doi:10.2134/jeq2007.0393.
- BUERGE, I. J., BUSER, H. R., KAHLE, M., MULLER, M. D. & POIGER, T. 2009: Ubiquitous occurrence of the artificial sweetener acesulfame in the aquatic environment: An ideal chemical marker of domestic wastewater in groundwater. *Environ. Sci. Technol. Environmental Science and Technology*, 43/12: 4381-4385, doi:10.1021/es900126x.
- BUERGE, I. J., BUSER, H. R., POIGER, T. & MULLER, M. D. 2006: Occurrence and fate of the cytostatic drugs cyclophosphamide and ifosfamide in wastewater and surface waters. *Environmental Science & Technology*, 40/23: 7242-50, doi:10.1021/es0609405.
- CARPY, S. A., KOBEL, W. & DOE, J. 2000: Health risk of low-dose pesticides mixtures: a review of the 1985-1998 literature on combination toxicology and health risk assessment. *Journal of toxicology and environmental health. Part B, Critical reviews*, 3, doi:10.1080/109374000281122.
- COOPER, E. R., SIEWICKI, T. C. & PHILLIPS, K. 2008: Preliminary risk assessment database and risk ranking of pharmaceuticals in the environment. *Science of the Total Environment*, 398/1-3: 26-33, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.02.061.
- DAUGHTON, C. G. 2004: Non-regulated water contaminants: emerging research. *Environmental impact assessment review*, 24/7-8: 711-732, doi:10.1016/j.eiar.2004.06.003.
- DIAZ-CRUZ, M. S. & BARCELO, D. 2008: Trace organic chemicals contamination in ground water recharge. *Chemosphere*, 72/3: 333-342, doi:10.1016/j.chemosphere.2008.02.031.
- DREWES, J. E. 2009: Ground water replenishment with recycled water – Water quality improvements during managed aquifer recharge. *Ground Water*, 47/4: 502-505, doi:10.1111/j.1745-6584.2009.00587_5.x.
- ECKEL, W. P., ROSS, B. & ISENSEE, R. K. 1993: Pentobarbital Found in Ground Water. *Ground Water*, 31/5: 801-804, doi:10.1111/j.1745-6584.1993.tb00853.x.
- EVROPSKI PARLAMENT IN SVET. 1998: Direktiva sveta 98/83/ES z dne 3. novembra 1998 o kakovosti vode, namenjene za prehrano ljudi. UL L 330, 5. 12. 1998, str. 32-54.
- EVROPSKI PARLAMENT IN SVET. 2006: Direktiva 2006/118/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 12. decembra 2006 o varstvu podzemne vode pred onesnaževanjem in poslabšanjem. UL L 372, 27. 12. 2006: 19-31.
- EVROPSKI PARLAMENT IN SVET. 2008: Direktiva 2008/105/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 16. decembra 2008 o okoljskih standardih kakovosti na področju vodne politike, spremembi in poznejši razveljavitvi direktiv Sveta 82/176/EGS, 83/513/EGS, 84/156/EGS, 84/491/EGS, 86/280/EGS ter spremembi Direktive 2000/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta. UL L 348, 24. 12. 2008: 84-97.
- EVROPSKI PARLAMENT IN SVET. 2000: Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. Oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike. UL L 327, 22.12.2000: 1-73.
- EVROPSKI PARLAMENT IN SVET. 1998: Direktiva 98/8/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 16. februarja 1998 o dajanju biocidnih pripravkov v promet. UL L 123, 24. 4. 1998: 1-63.
- EVROPSKI SVET. 1991: Direktiva 91/414/EGS Sveta z dne 15. Julija 1991 o dajanju fitofarmaceutskih sredstev v promet. UL L 230, 19. 8. 1991, 32 str.
- FOCAZIO, M. J., KOLPIN, D. W., BARNES, K. K., FURLONG, E. T., MEYER, M. T., ZAUGG, S. D., BARBER, L. B. & THURMAN, M. E. 2008: A national reconnaissance for pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants in the United States – II) Untreated drinking water sources. *Science of the Total Environment*, 402/2-3: 201-216, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.02.021.
- GLASSMEYER, S. T., FURLONG, E. T., KOLPIN, D. W., CAHILL, J. D., ZAUGG, S. D., WERNER, S. L., MEYER, M. T. & KRYAK, D. D. 2005: Transport of chemical and microbial compounds from known wastewater discharges: potential for

- use as indicators of human fecal contamination. *Environmental Science & Technology*, 39/14: 5157-69, doi:10.1021/es048120k.
- GODFREY, E., WOESSNER, W. W. & BENOTTI, M. J. 2007: Pharmaceuticals in On-Site Sewage Effluent and Ground Water, Western Montana. *Ground Water*, 45/3: 263-271, doi:10.1111/j.1745-6584.2006.00288.x.
- HAMSCHER, G. & HARTUNG, J. 2008: Veterinary Antibiotics in Dust: Sources, Environmental Concentrations, and Possible Health Hazards. In: KÜMMERER, K. (ed.): *Pharmaceuticals in the Environment*, Springer Berlin Heidelberg, 95-102, doi:10.1007/978-3-540-74664-5_7.
- HEATH, E., KOSJEK, T., ANDERSEN, H. R., HOLTEN LÜTZHOFT, H. C., ADOLFSON ERIC, M., COQUE-RY, M., DÜRING, R. A., GANS, O., GUIGNARD, C., KARLSSON, P., MANCIOT, F., MOLDOVAN, Z., PATUREAU, D., CRUCERU, L., SACHER, F. & LEDIN, A. 2010: Inter-laboratory exercise on steroid estrogens in aqueous samples. *Environmental Pollution*, 158/3: 658-662, doi:10.1016/j.envpol.2009.10.029.
- HEATH, E., KOSJEK, T., KOMPARE, B. 2006: Raziskave prisotnosti ostankov zdravilnih učinkovin v odpadnih in površinskih vodah. Internet: http://www.norman-network.net/public/library/docs/ijs_dp_94588pharmaceutical_residues.pdf (6. 11. 2012)
- HEBERER, T. & FELDMANN, D. 2005: Contribution of effluents from hospitals and private households to the total loads of diclofenac and carbamazepine in municipal sewage effluents-modeling versus measurements. *Journal of Hazardous Materials*, 122/5: 211-218, doi:10.1016/j.jhazmat.2005.03.007.
- HERNANDO, M., HEATH, E., PETROVIC, M. & BARCELÓ, D. 2006: Trace-level determination of pharmaceutical residues by LC-MS/MS in natural and treated waters. A pilot-survey study. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 385/6: 985-991, doi:10.1007/s00216-006-0394-5.
- JAMNIK, B., AUERSPERGER, P., URBANC, J., LAH, K. & PRESTOR, J. 2009a: Ostanki zdravil kot pokazatelj antropogenih vplivov na podzemno vodo Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja. *Geologija*, 52/2: 241-248, doi:10.5474/geologija.2009.024
- JAMNIK, B., URBANC, J., MALI, N., JANŽA, M., AUERSPERGER, P., LAH, K., NARTNIK, M., SCHWARZBARTL, T., STANOVNIK, L., KRŽAN, M., LIPNIK-ŠTANGELJ, M. & ČERNE, K. 2009b: Ostanki zdravil in hormonskih sredstev v podzemni vodi Ljubljanskega polja: končno poročilo. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.
- JOBLING, S., REYNOLDS, T., WHITE, R., PARKER, M. G. & SUMPTER, J. P. 1995: A Variety of Environmentally Persistent Chemicals, Including Some Phthalate Plasticizers, Are Weakly Estrogenic. *Environmental Health Perspectives*, 103: 582-587.
- JOHNSON, A. C., BELFROID, A. & DI CORCIA, A. 2000: Estimating steroid oestrogen inputs into activated sludge treatment works and observations on their removal from the effluent. *Science of the Total Environment*, 256/2-3: 163-173, doi:10.1016/S0048-9697(00)00481-2.
- JOHNSON, A. C., JÜRGENS, M. D., WILLIAMS, R. J., KÜMMERER, K., KORTENKAMP, A. & SUMPTER, J. P. 2008: Do cytotoxic chemotherapy drugs discharged into rivers pose a risk to the environment and human health? An overview and UK case study. *Journal of Hydrology*, 348/1-2: 167-175, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.054.
- KASPRZYK-HORDERN, B., DINSDALE, R. M. & GUWY, A. J. 2008: The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in surface water in South Wales, UK. *Water Research*, 42/13: 3498-3518, doi:10.1016/j.watres.2008.04.026.
- KAVANAUGH, M. C. 2003: Unregulated and emerging chemical contaminants: technical and institutional challenges. *Proceedings of the Water Environment Federation*: 19 p., doi:10.2175/193864703784755445.
- KLEYWEGT, S., PILEGGI, V., YANG, P., HAO, C., ZHAO, X., ROCKS, C., THACH, S., CHEUNG, P. & WHITEHEAD, B. 2011: Pharmaceuticals, hormones and bisphenol A in untreated source and finished drinking water in Ontario, Canada – Occurrence and treatment efficiency. *Science of the Total Environment*, 409/9: 1481-1488, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.01.010.
- KOLPIN, D. W., SCHNOEBELEN, D. J. & THURMAN, E. M. 2004: Degradates Provide Insight to Spatial and Temporal Trends of Herbicides in Ground Water. *Ground Water*, 42/4: 601-608, doi:10.1111/j.1745-6584.2004.tb02628.x.
- KOSJEK, T., HEATH, E. & KRBAVČIČ, A. 2005: Determination of non-steroidal anti-inflammatory drug (NSAIDs) residues in water samples. *Environment International*, 31: 679-685, doi:10.1016/j.envint.2004.12.001.
- KOSJEK, T., PERKO, S., ZUPANC, M., ZANOŠKI HREN, M., LANDEKA DRAGIČEVIĆ, T., ŽIGON, D., KOMPARE, B. & HEATH, E. 2012: Environmental occurrence, fate and transformation of benzodiazepines in water treatment. *Water Research*, 46/2: 355-368, doi:10.1016/j.watres.2011.10.056.
- LAPWORTH, D. J., BARAN, N., STUART, M. E. & WARD, R. S. 2012: Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*, 163: 287-303, doi:10.1016/j.envpol.2011.12.034.
- LAPWORTH, D. J. & GOODY, D. C. 2006: Source and persistence of pesticides in a semi-confined chalk aquifer of southeast England. *Environmental Pollution*, 144/3: 1031-1044, doi:10.1016/j.envpol.2005.12.055.
- LEWANDOWSKI, J., PUTSCHEW, A., SCHWESIG, D., NEUMANN, C. & RADKE, M. 2011: Fate of organic micropollutants in the hyporheic zone of a eutrophic lowland stream: Results of a preliminary field study. *Science of the Total Environment*, 409/10: 1824-1835, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.01.028.
- LOOS, R., GAWLIK, B. M., LOCORO, G., RIMAVICIUTE, E., CONTINI, S. & BIDOGLIO, G. 2009:

- EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters. *Environmental Pollution*, 157/2: 561-568, doi:10.1016/j.envpol.2008.09.020.
- LOOS, R., LOCORO, G., COMERO, S., CONTINI, S., SCHWESIG, D., WERRES, F., BALSAA, P., GANS, O., WEISS, S., BLAHA, L., BOLCHI, M. & GAWLIK, B. M. 2010: Pan-European survey on the occurrence of selected polar organic persistent pollutants in ground water. *Water Research*, 44/14: 4115-4126, doi:10.1016/j.watres.2010.05.032.
- MALI, N., KOROŠA, A., CERAR, S., JAMNIK, B., AUERSPERGER, P. & KRŽAN, M. 2012: Urbana hidrogeologija – študij transportnih procesov ostankov zdravil v prodnih vodonosnikih: končno poročilo. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.
- MOLDOVAN, Z. 2006: Occurrences of pharmaceutical and personal care products as micropollutants in rivers from Romania. *Chemosphere*, 64/11: 1808-1817, doi:10.1016/j.chemosphere.2006.02.003.
- MOMPELAT, S., LE BOT, B. & THOMAS, O. 2009: Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water. *Environment International*, 35/5: 803-814, doi:10.1016/j.envint.2008.10.008.
- MORRIS, B. L., GEORGE DARLING, W., GOODDY, D. C., LITVAK, R. G., NEUMANN, I., NEMALTSEVA, E. J. & PODDUBNAIA, I. 2006: Assessing the extent of induced leakage to an urban aquifer using environmental tracers: an example from Bishkek, capital of Kyrgyzstan, Central Asia. *Hydrogeology journal*, 14/1-2: 225, doi:10.1007/s10040-005-0441-x.
- NAKADA, N., KIRI, K., SHINOHARA, H., TAKADA, H., HARADA, A., KURODA, K. & TAKIZAWA, S. 2008: Evaluation of pharmaceuticals and personal care products as water-soluble molecular markers of sewage. *Environ. Sci. Technol. Environmental Science and Technology*, 42/17: 6347-6353, doi:10.1021/es7030856.
- OPPEL, J., BROLL, G., LÖFFLER, D., MELLER, M., RÖMBKE, J. & TERNES, T. 2004: Leaching behaviour of pharmaceuticals in soil-testing-systems: a part of an environmental risk assessment for groundwater protection. *Science of the Total Environment*, 328/1-3: 265-273, doi:10.1016/j.scitotenv.2004.02.004.
- POMATI, F. 2008: Effects and Interactions in an Environmentally Relevant Mixture of Pharmaceuticals. *Toxicological Sciences*, 102/1, doi:10.1093/toxsci/kfm291.
- POYNTON, H. C. & VULPE, C. D. 2009: Ecotoxicogenomics: Emerging Technologies for Emerging Contaminants. *Journal of the American Water Resources Association*, 45/1: 83-96, doi:10.1111/j.1752-1688.2008.00291.x.
- RAHMAN, F., LANGFORD, K. H., SCRIMSHAW, M. D. & LESTER, J. N. 2001: Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants. *Science of the Total Environment*, 275/1-3: 1-17, doi:10.1016/s0048-9697(01)00852-x.
- RELYEA, R. A. 2009: A cocktail of contaminants: how mixtures of pesticides at low concentrations affect aquatic communities. *Oecologia*, 159/2: 363-376, doi:10.1007/s00442-008-1213-9.
- RICHARDSON, M. L. & BOWRON, J. M. 1985: The fate of pharmaceutical chemicals in the aquatic environment. *The Journal of pharmacy and pharmacology*, 37: 1-12.
- RICHARDSON, S. D. 2003: Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 22/10: 666-684, doi:10.1016/s0165-9936(03)01003-3.
- RITTER, L., SOLOMON, K., SIBLEY, P., HALL, K., KEEN, P., MATTU, G. & LINTON, B. 2002: Sources, pathways and relative risks of contaminants in surface water and groundwater: a perspective prepared for the Walkerton Inquiry. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, 65/1: 1-142, doi:10.1080/152873902753338572.
- ROBERTS, P. V. & VALOCCHI, A. J. 1981: Principles of organic contaminant behavior during artificial recharge. *Science of the Total Environment*, 21: 161-172, doi:10.1016/0048-9697(81)90149-2.
- SACHER, F., LANGE, F. T., BRAUCH, H.-J. & BLANKENHORN, I. 2001: Pharmaceuticals in groundwaters: Analytical methods and results of a monitoring program in Baden-Württemberg, Germany. *Journal of Chromatography A*, 938/1-2: 199-210, doi:10.1016/s0021-9673(01)01266-3.
- SANDERSON, H., BRAIN, R. A., JOHNSON, D. J., WILSON, C. J. & SOLOMON, K. R. 2004: Toxicity classification and evaluation of four pharmaceuticals classes: antibiotics, antineoplastics, cardiovascular, and sex hormones. *Toxicology*, 203/1-3: 27-40, doi:10.1016/j.tox.2004.05.015.
- SARMAH, A. K., MEYER, M. T. & BOXALL, A. B. A. 2006: A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere*, 65/5: 725-759, doi:10.1016/j.chemosphere.2006.03.026.
- SCHEYTT, T., MERSMANN, P., LEIDIG, M., PEKDEGER, A. & HEBERER, T. 2004: Transport of Pharmaceutically Active Compounds in Saturated Laboratory Columns. *Ground Water*, 42/5: 767-773, doi:10.1111/j.1745-6584.2004.tb02730.x.
- SCHMID, P., KOHLER, M., GERECKE, A. C., GUJER, E., ZENNEGG, M. & WOLFENBERGER, M. 2003: Old Sins Throw Long Shadows - Old and Emerging Persistent Organic Pollutants in the Swiss Environment. *CHIMIA*, 57: 509-513.
- SEDLAK, D. & PINKSTON, K. 2001: Factors affecting the concentrations of pharmaceuticals released to the aquatic environment. *Water Research*, 120: 56-64.
- SEILER, R. L., ZAUGG, S. D., THOMAS, J. M. & HOWCROFT, D. L. 1999: Caffeine and Pharmaceuticals as Indicators of Waste Water Contamination in Wells. *Ground Water*, 37: 405-410.
- SINGER AC, NUNN MA & AC, G. 2007: Potential Risks Associated with the Proposed Wide-

- spread Use of Tamiflu. Internet: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1797841/>
- SMITH, E. A. & OEHRM, F. W. 1991: Acrylamide and polyacrylamide: a review of production, use, environmental fate and neurotoxicity. *Reviews on environmental health*, 9/4: 215-228.
- SNYDER, S. A. 2004: Biological and physical attenuation of endocrine disruptors and pharmaceuticals: implications for water reuse. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 24/2, doi:10.1111/j.1745-6592.2004.tb00719.x.
- STANDLEY, L. J., RUDEL, R. A., ATTFIELD, K. R., BRODY, J. G., SWARTZ, C. H., CHRISTIAN, J. & ERICKSON, M. 2008: Wastewater-contaminated groundwater as a source of endogenous hormones and pharmaceuticals to surface water ecosystems. *Environ. Toxicol. Chem. Environmental Toxicology and Chemistry*, 27/12: 2457-2468, doi:10.1897/07-604.1.
- STANGROOM, S. J., COLLINS, C. D. & LESTER, J. N. 1998: Sources of Organic Micropollutants to Lowland Rivers. *Environmental technology*, 19/7: 643-666, doi:10.1080/09593331908616722.
- STUART, M., LAPWORTH, D., CRANE, E. & HART, A. 2012: Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. *Science of the Total Environment*, 416/1: 1-21, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.11.072.
- TERRY, A. S., CARTER, A. D., HUMPHREY, R. L., CAPRI, E., GRUA, B., PANAGOPOULOS, A. C., PULIDO-BOSCH, A. & KENNEDY, S. H. 2008: A monitoring programme for 1,3-dichloropropene and metabolites in groundwater in five EU countries. *Pest Manage. Sci. Pest Management Science*, 64/9: 923-932, doi:10.1002/ps.1585.
- URADNI LIST REPUBLIKE SLOVENIJE: Zakon o vodah (ZV-1). Št. 67/2002, 110/2002, 2/2004, 41/2004, 57/2008, 57/2012, Ljubljana.
- URADNI LIST REPUBLIKE SLOVENIJE: Pravilnik o pitni vodi. Št. 19/2004, 35/2004, 26/2006, 92/2006, 25/2009, Ljubljana.
- URADNI LIST REPUBLIKE SLOVENIJE: Pravilnik o imisijskem monitoringu podzemne vode. Št. 42/2002, Ljubljana.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2012: Revisions to the Unregulated Contaminant Monitoring Regulation (UCMR 3) for Public Water Systems. Internet: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2012-05-02/pdf/2012-9978.pdf>.
- U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. 2012: Chemical information. Internet: <http://sis.nlm.nih.gov/chemical.html>.
- VAN STEMPOVOORT, D. R., ROY, J. W., BROWN, S. J. & BICKERTON, G. 2011: Artificial sweeteners as potential tracers in groundwater in urban environments. *Journal of Hydrology*, 401/1-2: 126-133, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.013.
- VERLICCHI, P., GALLETTI, A., PETROVIC, M. & BARCELO, D. 2010: Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options. *Journal of Hydrology*, 389/3-4: 416-428, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.06.005.
- VERSTRAETEN, I. M., FETTERMAN, G. S., MEYER, M. T., BULLEN, T. & SEBREE, S. K. 2005: Use of tracers and isotopes to evaluate vulnerability of water in domestic wells to septic waste. Internet: http://www.geol.lsu.edu/blanford/NA-TORBF/2%20Stream%20Hydraulic%20Tracer%20Tests/Verstraeten_Groundwater%20Monitoring%20and%20Remediation_2005.PDF
- VRANA, B., ALLAN, I. J., GREENWOOD, R., MILLS, G. A., DOMINIAK, E., SVENSSON, K., KNUTSSON, J. & MORRISON, G. 2005: Passive sampling techniques for monitoring pollutants in water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 24/10: 845-868, doi:10.1016/j.trac.2005.06.006.
- VULIET, E. & CREN-OLIVÉ, C. 2011: Screening of pharmaceuticals and hormones at the regional scale, in surface and groundwaters intended to human consumption. *Environmental Pollution*, 159/10: 2929-2934, doi:10.1016/j.envpol.2011.04.033.
- WATKINSON, A. J., MURBY, E. J., KOLPIN, D. W. & COSTANZO, S. D. 2009: The occurrence of antibiotics in an urban watershed: From wastewater to drinking water. *Science of the Total Environment*, 407/8: 2711-2723, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.11.059.
- WORRALL, F. & BESSEN, T. 2005: The vulnerability of groundwater to pesticide contamination estimated directly from observations of presence or absence in wells. *Journal of Hydrology*, 303/1-4: 92-107, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.019.
- WORRALL, F. & KOLPIN, D. W. 2004: Aquifer vulnerability to pesticide pollution-combining soil, land – use and aquifer properties with molecular descriptors. *Journal of Hydrology*, 293/1-4: 191-204, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.01.013.
- ZAGAJŠEK, A., PLANINŠEK, A., PANJAN, J., KOMPARE, B., DREV, D. 2010: Problemi onesnaženja bazenskih voda s trihalometani na območju Celjske regije. *Vodni dnevi 2010*. Internet: <http://www.sdzv-drustvo.si/si/VD%2010%20Referati/12%20Zagajsek.pdf>.
- ZUCCATO, E., CASTIGLIONI, S., BAGNATI, R., CHIABRANDO, C., GRASSI, P. & FANELLI, R. 2008: Illicit drugs, a novel group of environmental contaminants. *Water Research*, 42/4-5: 961-968, doi:10.1016/j.watres.2007.09.010.
- ZUEHLKE, S., DUENNBIE, U., HEBERER, T. & FRITZ, B. 2004: Analysis of Endocrine Disrupting Steroids: Investigation of Their Release into the Environment and Their Behavior During Bank Filtration. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 24/2: 78-85, doi:10.1111/j.1745-6592.2004.tb00715.x.
- INTERNETNI VIRI (DOSTOPNI 6. 10. 2012):
 INTERNET 1: [HTTP://WWW.PESTICIDI.NET/](http://www.pesticidi.net/)
 INTERNET 2: [HTTP://WWW.EUGRIS.INFO/](http://www.eugris.info/)
 INTERNET 3: [HTTP://WWW.DELO.SI/CLANEK/139858](http://www.del.si/clanek/139858)
 INTERNET 4: [HTTP://SICRIS.IZUM.SI/](http://sicris.izum.si/)

A new cephalopod find in the Eocene beds near Grdoselo in Istria, Croatia

Nova najdba glavonožca v eocenskih plasteh pri Grdoselu v Istri

Vasja MIKUŽ¹ & Miloš BARTOL²

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

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

Prejeto / Received 4. 10. 2012; Sprejeto / Accepted 24. 10. 2012

Key words: nautiloids, cephalopods, nannoplankton, Middle Eocene, Middle Lutetian, Grdoselo, Istria, Croatia
Ključne besede: navtilidi, glavonožci, srednji eocen, srednji lutetij, Grdoselo, Istra, Hrvaška

Abstract

The article presents a cast fossil of a cephalopod found in sandy limestones (packstones) of Eocene age near Grdoselo in Central Istria. The phragmocone remains most probably belong to the nautilid species *Eutrephoceras* (*Simplicioceras*) *centrale* (Sowerby, 1812). We have determined the age of the fossil with calcareous nannoplankton. The nannofossil assemblage is typical of the Middle Eocene and allows the assignment to the biozone NP15 (*Nannotethrina fulgens*) of the Middle Eocene.

Izvleček

V prispevku je predstavljeno kameno jedro glavonožca iz eocenskih peščenih apnencev pri Grdoselu v osrednji Istri. Ostanek fragmokona najverjetneje pripada navtilidu vrste *Eutrephoceras* (*Simplicioceras*) *centrale* (Sowerby, 1812). Ugotavljali smo tudi starost plasti s pomočjo kalcitnega nanoplanktona. Nanoplanktonska združba je značilna za srednji eocen, prisotnost biostratigrafsko relevantnih vrst omogoča opredelitev starosti na biocono NP15 (*Nannotethrina fulgens*) v srednjem eocenu.

Introduction

Grdoselo is situated approximately 10 km north of Pazin (Fig. 1). The outcrop extends along a cart track leading through the forest. We visited this locality several times and made another thorough inspection of the surface layer of the outcrop in September 2010. The time of the field work was selected with respect to the fact that a certain period of time had passed since our last visit and that there had been some substantial rainfall after which interesting macrofossils are commonly found. This time as well we found some cast fossils of molluscs and sea urchins. Finally, we detected a smooth surface of a few square centimetres and after carefully removing the overlying weathered rocks it became clear that this was not another fossil sea urchin. After its excavation we realised that this was a relatively well preserved cast fossil of a cephalopod (Fig. 2), which was not similar to the *Aturia* specimen found a few years earlier and described in MIKUŽ (2009). Well preserved nautilid fossils are rare in the Eocene of Istria.

The Middle to Late Lutetian age of the rocks outcropping in Grdoselo has been determined by MIKŠA et al. (2005: 101) on the basis of ortho-phragmid foraminifera. They determined assemblages that correspond to biozones SBZ 14/15 or P11-P12. A bit further towards the south, in the vicinity of Pićan, BABIĆ et al. (2007: 96) studied the flysch beds and established that the sediments of the Pazin Basin in that locality can be assigned to P12 to P13 planktonic foraminiferal biozones, while nannoplankton assemblages were consistent with the age of NP16 to NP17. These biozones in fact correspond better to the Late Lutetian and Early Bartonian.

To pinpoint the age of the beds outcropping in the Grdoselo locality we studied them for calcareous nannoplankton. We collected samples from the umbilici of the two nautilid cast fossils from this site (a specimen presented in Plate 1 and another, poorly preserved specimen which is not documented) and another sample from the umbilicus of a fossil gastropod belonging to the genus *Pleurotomaria*, a relatively rare find in this site.

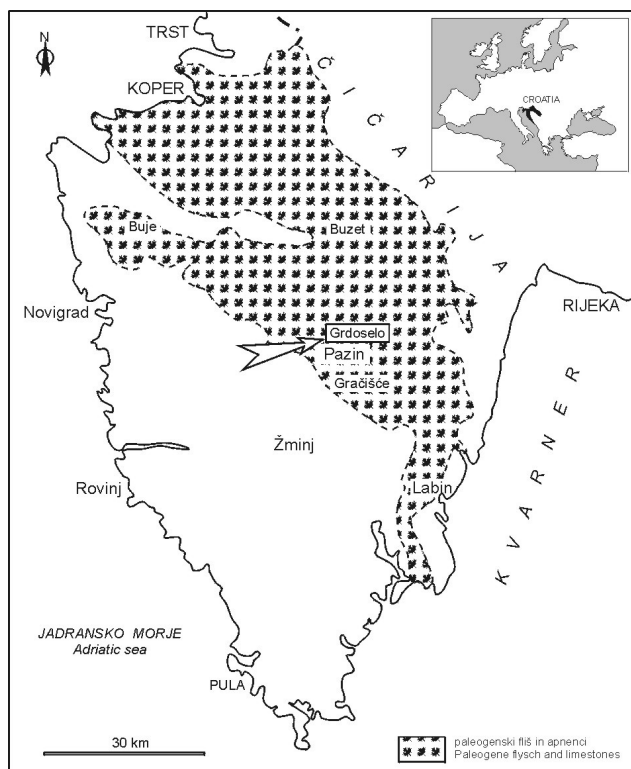


Fig. 1. Geographical location of the site Grdoselo.



Fig. 2. The cast of nautilid »in situ« in the outcrop of site Grdoselo. Size of specimen: 145 x 104 x 90 mm.

Photo: V. Mikuž

The study of Eocene nautilids of Istria

The earliest records of fossil nautilids of Istria are those of HACQUET (1789: 42), the author mentions that in the vicinity of Pícan it is possible to find nautilid remains as well. Almost a century later several researchers mention or present individual nautilid finds in the Istrian peninsula: (1864a; 1864b; 1889), PARONA (1898), SCHUBERT (1905), MANEK (1905), TONIOLO (1909), TOULA (1918), SACCO (1924), ŠIKIĆ (1963), POLŠAK & ŠIKIĆ (1973), ABATE et al. (1988), TARLAO, TUNIS & VENTURINI (1995), MOOSLEITNER (1996), MIKŠA, MEZGA & ČOSVIĆ (2005) and MIKUŽ (2009), the latter includes a survey of older data and some new findings concerning the species *Aturia* cf.

ziczac (Sowerby) found in the same outcrop near Grdoselo. STACHE (1889: 64) mentions that among other macrofossils some nautilid fossils were found in the Kanuš hill near Pazin, he mentions the species *Nautilus* (*Aturia*) *lingulatus* Buch and *Nautilus umbilicaris* Deshayes.

The list of fossil species of nautilids mentioned in the sources listed above includes "*Nautilus*" sp., *Eutrephoceras imperialis* (Sowerby), *E. disculus* (Deshayes), *Hercoglossa* aff. *harrisi* Miller & Thompson, *Aturia ziczac* (Sowerby), *Aturia* sp. and *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby), all found in proximity of Grdoselo.

Systematic palaeontology

Taxonomy in accordance with: KUMMEL 1964 and SCHULTZ 1976

Classis Cephalopoda Cuvier, 1795
Subclassis Nautiloidea Agassiz, 1847
Ordo Nautilida Agassiz, 1847
Superfamilia Nautilaceae Blainville, 1825
Familia Nautilidae Blainville, 1825
Genus *Eutrephoceras* Hyatt, 1894
Subgenus *Simplicioceras* Schultz, 1976

According to KUMMEL (1964: K448) the genus *Nautilus* Linné, 1758 is known only from the Oligocene onwards. This means that the nautilid fossil from Grdoselo cannot be assigned to this genus. The genus *Eutrephoceras* ranges from the Upper Cretaceous to the Eocene (SCHULTZ, 1976: 48), while the subgenus *Simplicioceras* ranges from the Paleocene to the Miocene (SCHULTZ, 1976: 49).

Eutrephoceras (*Simplicioceras*) *centrale*
(Sowerby, 1812)
Pl. 1, Figs. 1a-1d

- 1812 *Nautilus centralis*. – SOWERBY, 11, Left hand figure
- 1840 *Nautilus centralis* – SOWERBY, Pl. 627, Fig. 6
- 1849 *Nautilus Sowerbyi*. Wetherell. – EDWARDS, 48, Pl. 6, Pl. 8, Fig. 3
- p.1863 *Nautilus ellipticus* Schafhäütl – SCHAFHÄÜTL, Taf. 57-58
- 1976 *Eutrephoceras* (*Simplicioceras* nov. subgen.) *centrale* (Sowerby, 1812) – SCHULTZ, 51, Abb. 1C
- 1992 *Nautilus centralis* Sowerby – HAGN, DARGA & SCHMID, 178-179, Taf. 50
- 1993 *Eutrephoceras* (*Simplicioceras*) cf. *centrale* (Sowerby, 1812) – LLOMPART, 46, Lám. 3, Figs. 5, 6
- 2004 *Angulithes* (*Cimomia*) *imperialis* (Sowerby) – MOOSLEITNER, 39, Taf. 3, Fig. 5

Material: A relatively well preserved cast fossil with the basic morphological characteristics of a nautilid (Pl. 1, figs. 1a-1d). The fossil was found on 3 September 2010 by the first author of this paper.

Locality: The Eocene sandy limestones within the megasequence in proximity of Grdoselo (Fig. 2). The beds contain an abundance of various macrofossils. The larger specimens include echinoids, mostly belonging to the *Echinolampas* genus, less commonly to the largest Eocene species *Conoclypus conoideus*.

Description: A relatively large cast fossil represents a phragmocone of a nautilid shell (Pl. 1, figs. 1a–1d). The remains of the living chamber are not preserved. The cast fossil displays the characteristic involute coiling and growth with younger and wider chambers overgrowing the older and narrower parts of the shell. The left hand side of the phragmocone is in a better state of preservation than the right (Pl. 1, fig. 1b), the older part of which is rather heavily corroded (Pl. 1, fig. 1c). 15 to 16 chambers can be distinguished on the surface of the phragmocone, which are separated by relatively simple suture lines. The exact number of the chambers is impossible to determine. The visible older part of the phragmocone consists of short (~10 mm) living chambers, while in the younger part they become progressively longer (~30 mm). The siphuncle is round and somewhat deepened, it lies in the middle of the concave oval septal wall (Pl. 1, fig. 1d) of the last preserved septum, which is relatively wide and low and slightly narrowed in its lower or ventral part.

Note: SOWERBY (1812: 11–12) mentions that the species is named after the position of the siphuncle in the middle of the septa dividing the living chambers in the phragmocone.

Size of the nautilid cast – phragmocone:

Size of specimen = 145 x 104 x 90 mm
 Maximum radius of phragmocone = 93 mm
 Length of septa = 10 to 30 mm
 Radius = 50 mm
 Width of cast fossil = 90 mm
 Height of last whorl = 74 mm
 Distance from outer edge to the center of siphuncle = 40 mm
 Diameter of siphuncle = 6 mm
 Diameter of umbilicus = 9 mm

Remarks: HAGN et al. (1992: Taf. 50) report of a specimen of *Nautilus centralis* Sowerby from the Lutetian strata of the Kressenberg locality in Germany. The size and the form of the suture line are comparable to the specimen from Grdoselo. Certain similarities are also observable with the specimens described by SCHAFHÄUTL (1863). Plate 54, fig. 2a–c illustrates a specimen of *Nautilus macrocephalus* Schafhäutl, the differences between the specimens include size, shape of the last turn of the coil and position of the siphuncle. The specimen from Istria is more comparable to the *Nautilus ellipticus* illustrated by SCHAFHÄUTL (1863) in Plates 57 and 58. They are similar in size, shape of the shell and the suture line but not in the position of the siphuncle as this is not shown in the illustrations of SCHAFHÄUTL (1863).

EDWARDS (1849) describes seven different nautilids from the Eocene of England. Plate 8 illustrates five species with the shape of the last turn of the coil and the position of the siphuncle. The shape of the last turn in the coil of the specimen from Istria is most similar to that of *Nautilus sowerbyi* Wetherell figured by EDWARDS (Pl. 8, fig. 3), while the position of the siphuncle is most similar to *N. centralis* (EDWARDS, 1849: Pl. 8, fig. 2).

CALZADA in VIADER (1983: 406–407) present two Illeridian nautilids from northeastern Spain. The first is a specimen of *Deltoidnautilus rollandi* (Leymerie, 1845) and the other of *Aturoidea parkinsoni* (Edwards, 1849). These specimens are not comparable to the one found in Istria.

The shape of the phragmocone and the suture line of the Istrian specimen is similar to the specimen of *Angulithes (Cimomia) imperialis* (Sowerby) from the Cuisian beds in Austria, figured by SCHULTZ (1998: 36–37, Taf. 10, Fig. 10–11). The shape and width of the septa, size and depth of the umbilicus bear some resemblance to the species *Euciphoceras regale* (Sowerby) and *Cimomia elliptica* (Schafhäutl), figured by GALÁČZ (2004: Text-figs. 2 and 4). The position of the siphuncle and partially the shape of the coil section are rather similar to *Euciphoceras regale* from the London clay and *Euciphoceras* sp. from Fayum in Egypt, figured in DZIK & GAŹDZICKI (2001: 304, fig. 6).

Stratigraphic and geographic range: The presence of the species *Nautilus centralis* in the Eocene London clay is mentioned by SOWERBY (1834: 248). According to SCHULTZ (1976: 51), the specimens of the species *Eutrechoceras (Simplioceras) centrale* (Sowerby, 1812) are characteristic of Lutetian beds. LLOMPART (1993: 46) asserts that in Spain this species is present in the Lower Eocene from Illeridian to Cuisian. The same author writes that the specimens of the species have been found in the Thanetian of Austria, Ypresian of England, Switzerland, Germany and Italy, and in the Upper Eocene of Romania, Austria and Hungary. MOOSLEITNER (2004: 34) presents the nautilid species *Angulithes (Cimomia) imperialis* from the Eocene beds of Helveticum, that is, from the St. Pankraz locality in the area of Salzburg in Austria.

Biostratigraphic dating of the fossil with calcareous nannoplankton

We have sampled the sediment matrix in the umbilici of two cast fossils of nautilids and a cast fossil of a gastropod belonging to the genus *Pleurotomaria*, all from Grdoselo. We studied the samples for calcareous nannoplankton. The nannofossil assemblage is consistent with the biozone NP15 (*Nannotethrina fulgens*) of the Middle Lutetian.

The nannofossils in samples Nautilid 1 and 2 and *Pleurotomaria* are moderately to well preserved. The assemblages are diverse: in total 43

species of nannoplankton were determined with an average of 28 species per sample. The assemblages are characteristic of the Middle Eocene with species like *Chiasmolithus solitus*, *C. grandis*, *Sphenolithus spiniger*, *S. furcatholithioides*, *Helicosphaera heezenii*, *H. seminulum*, *Discoaster wemmelenensis*, *Pseudotriquetrorhabdulus inversus*. In the sample Nautilid-2 a broken, but easily recognisable specimen of *Chiasmolithus gigas* was found (Pl. 2, fig. 9). This stratigraphic range of this species is very short – it occurs only in the CP13b biozone of OKADA & BUKRY, 1980, which can be correlated with the middle part of NP15 of MARTINI, 1971. No zonal markers of the biozone NP16 (*Reticulofenestra umbilicus*, *R. reticulata*, *Discoaster bifax*) were found in any of the three samples. The above allows the assignment of the age of all three samples to the NP15 Nannotherrina fulgens zone of MARTINI, 1971. Some of the biostratigraphically significant species of calcareous nannoplankton are shown in Plate 2.

Conclusions

The cast of a nautilid phragmocone from Istria has been found on the 3rd of September 2010 in Middle Eocene – Lutetian sandy limestone in Grdoselo. The same fossil bearing beds contain abundant echinoid remains, among them several specimens of the species *Conoclypus conoideus*. The fossils of these large sea urchins generally occur in their living position. The cast fossil of the nautilid species *Aturia* cf. *ziczac* (Sowbery, 1812) (MIKUŽ 2009) has also been found in the same locality. The nautilid phragmocone presented here (Pl. 1, fig. 1a–1d) has been determined as *Eutrep hoceras* (*Simplicioceras*) *centrale* (Sowerby, 1812) on the grounds of its relatively simple suture, the position of the siphuncle and some other relevant characteristics.

Several similar forms are mentioned in relevant literature, but they are very difficult to compare, mostly due to the poor state of preservation they are usually in. Furthermore, the reference figures in literature display the nautilid fossils in various ways: their shells, shells combined with cast fossils or cast fossils exclusively, median longitudinal sections of the phragmocone, usually without living chambers etc. It is impossible to observe all the characteristics of an individual Eocene species in deficiently preserved specimens presented in a variety of different ways.

The calcareous nannoplankton assemblages found in the matrix attached to some macrofossil finds allow the assignment of the age of these beds to the NP15 Nannotherrina fulgens zone of MARTINI, 1971 in the Middle Lutetian.

Acknowledgements

We thank Marijan Grm for support in terms of photography and computer work and for appropriate documentation.

References

- ABATE, A., BAGLIONI, R. A., BIMBATTI, C. & PICCOLI, G. 1988: Rasegna di molluschi marini bentonici e nectonici del Cenozoico triveneto. Mem. Sci. Geol., Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 40: 135–171, Tav. 1–4.
- BABIĆ, L., M. HERNITZ KUČENJAK, S. ČORIĆ & ZUPANIĆ, J. 2007: The Middle Eocene age of the supposed Late Oligocene sediments in the flysch of the Pazin Basin (Istria, Outer Dinarides). Nat. Croat., 16/2: 83–103.
- CALZADA, S. & VIADER, J. 1983: Dos Nautilidos del Eocene de Huesca. Estudios geol., 39: 405–408.
- DZIK, J. & GAŹDZICKI, A. 2001: The Eocene expansion of nautilids to high latitudes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 172: 297–312.
- EDWARDS, F. E. 1849: A monograph of the Eocene Mollusca or descriptions of shells from the older Tertiaries of England. Part 1. Cephalopoda. Palaeontographical Society, London: 56 p., Pl. 1–9.
- GALÁČZ, A. 2004: Nautiloid cephalopods from the Middle Eocene of Iszkaszetgyörgy, Transdanubian Hungary. Annales Univ. Scient. Budapestensis, Sect. Geologica, 34: 1–7.
- HACQUET, B. 1778–1789: Oryctographia Carniolica, oder Physikalische Erdbeschreibung des Herzogthums Krain, Istrien und zum Theil der benachbarten Länder. I–IV. J. G. I. Breitkopf, Leipzig.
- HAGN, H., R. DARGA & SCHMID, R. 1992: Erdgeschichte und Umwelt im Raum Siegsdorf. Fossilien als Zeugen der geologischen Vergangenheit. Gemeinde Siegsdorf, München: 1–241 p., (Taf. 1–80).
- KUMMEL, B. 1964: Nautiloidea – Nautilida. In: MOORE, R. C. (ed.): Treatise on Invertebrate Paleontology, Part K, Mollusca 3. The Geological Society of America and The University of Kansas Press, Lawrence: K383–K457.
- LLOMPART, C. 1993: Nautiloideos del Eocene del Prepirineo. Batalleria 1989, Barcelona, 3: 37–60, (Lám. 1–4).
- MANEK, F. 1905: Neue Fundorte von Eocänfossilien bei Rozzo (Istrien). Verh. Geol. R. A., Wien, 351–352.
- 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.
- MIKŠA, G., MEZGA, A. & ČOSVIĆ, V. 2005: An Example of Mixed Echinoid Fauna from the Lutetian of Grdoselo, Central Istria. Knjiga sažetaka – Abstract Book, 3. Hrvatski geološki kongres – 3rd Croatian Geological Congress, Opatija 2005. Hrvatski geološki institut – Croatian Geological Survey, Zagreb: 101–102.
- MIKUŽ, V. 2009: Nautilid iz srednjeeocenskih plasti pri Grdoselu v Istri na Hrvaškem. (A nautiloid from Middle Eocene beds at Grdoselo in Istria, Croatia). Geologija, 52/1: 33–43, (Tab. 1), doi:10.5474/geologija.2009.005.

PLATE 1



1a *Eutrephoceras (Simplicioceras) centrale* (Sowerby, 1812); posterior side, Grdoselo, reduced. Natural size of specimen: 145 x 104 x 90 mm.

1b The right side of the same specimen, Grdoselo, reduced.

1c The left side of the same specimen, Grdoselo, reduced.

1d Anterior side, position of siphuncle on the same specimen, Grdoselo, reduced.

Photo: Marijan Grm

PLATE 2

Calcareous nannoplankton in the samples of groundmass from the umbilici of two nautilids and a *Pleurotomaria* sp. from Grdoselo.

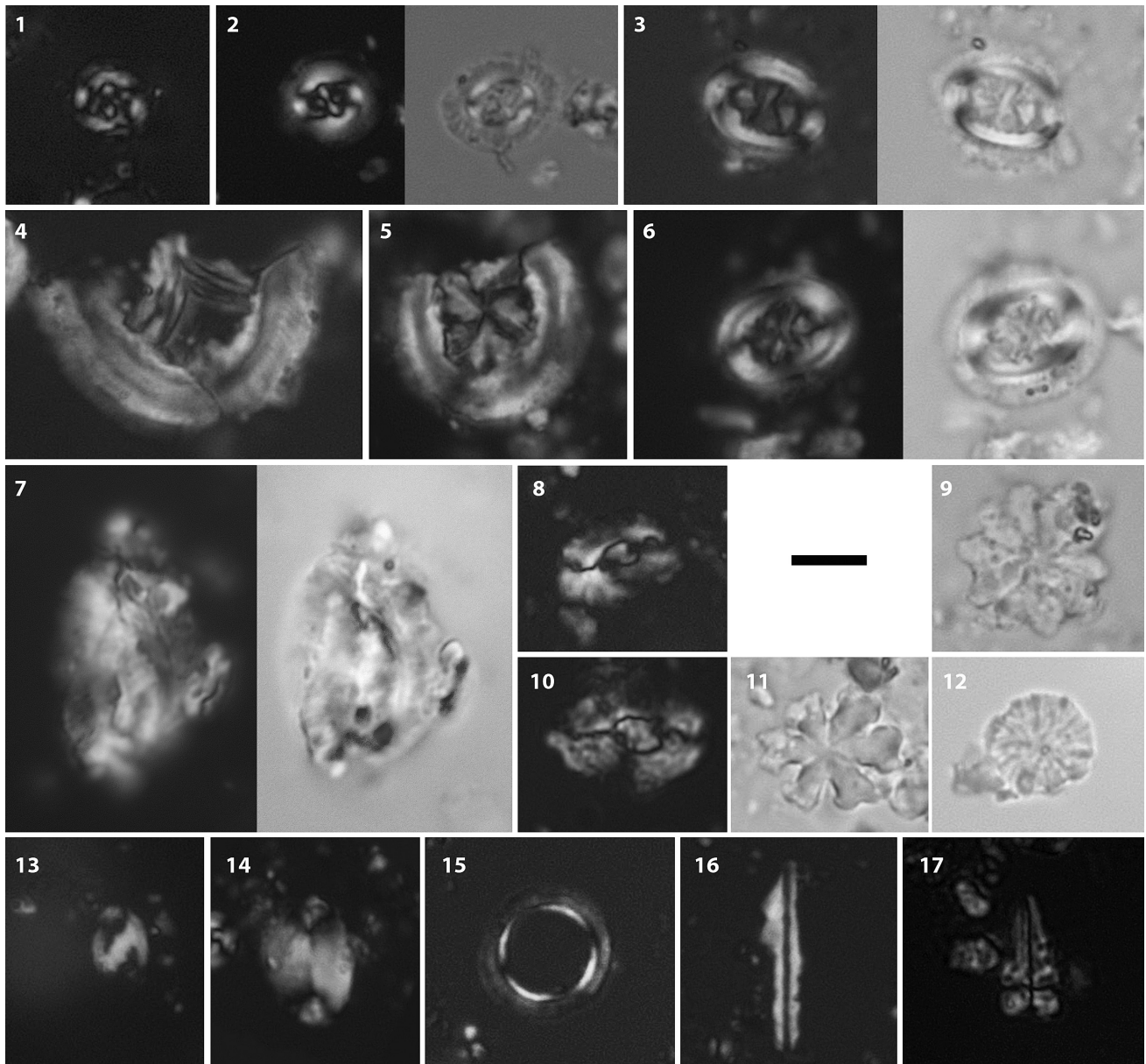
- 1 *Chiasmolithus nitidus* Perch-Nielsen, 1971; Nautilid 1, XPL.
- 2 *Chiasmolithus nitidus* Perch-Nielsen, 1971; *Pleurotomaria*, a- XPL, B-PPL.
- 3 *Chiasmolithus solitus* (Bramlette & Sullivan, 1961) Locker, 1968; Nautilid 2, a-XPL, b-PPL.
- 4 *Chiasmolithus grandis* (Bramlette & Riedel, 1954) Radomski, 1968; fragment, Nautilid 2, XPL.
- 5 *Chiasmolithus gigas* (Bramlette & Sullivan, 1961) Radomski, 1968; fragment, Nautilid 2, XPL.
- 6 *Chiasmolithus solitus* (Bramlette & Sullivan, 1961) Locker, 1968; Nautilid 2, a-XPL, b-PPL.
- 7 *Helicosphaera heezenii* (Bukry, 1971) Jafar & Martini, 1975; Nautilid 2, a-XPL, b-PPL.
- 8 *Helicosphaera bramlettei* (Müller, 1970) Jafar & Martini, 1975; *Pleurotomaria*, XPL.
- 9 *Discoaster barbadiensis* Tan, 1927, emend. Bramlette and Riedel, 1954; PPL.
- 10 *Helicosphaera bramlettei* (Müller, 1970) Jafar & Martini, 1975; Nautilid 1, XPL.
- 11 *Discoaster deflandrei* Bramlette & Riedel, 1954; sample Nautilid 2, PPL.
- 12 *Discoaster wemmeliensis* Achuthan & Stradner, 1969; sample Nautilid 2, PPL.
- 13 *Pontosphaera sigmoidalis* (Locker, 1967), Aubry, 1986; sample Nautilid 2, XPL.
- 14 *Pontosphaera plana* (Bramlette & Sullivan, 1961) Haq, 1971; sample Nautilid 2, XPL.
- 15 *Coronocyclus bramlettei* (Hay & Towe, 1962) Bown, 2005; Nautilid 2, XPL.
- 16 *Pseudotriquetrorhabdulus inversus* (Bukry & Bramlette, 1969) Wise in Wise & Constans, 1976; Nautilid 2, PPL.
- 17 *Sphenolithus radians* Deflandre in Grasse, 1952; Nautilid 1, XPL.

Scale bar – 5 nm

MOOSLEITNER, G. 1996: Fossilien aus dem Mittel-Eozän von Istrien. Fossilien, 2: 105-110.
 MOOSLEITNER, G. 2004: Fossilien sammeln im Salzburger Land. Ein Führer zu klassischen und neuen Fundstellen. Goldsneck im Quelle & Meyer Verlag GmbH & Co., Wiebelsheim: 223 p., (Taf. 1-107).
 OKADA, H. & BUKRY, D. 1980: Supplementary modification and introduction of code numbers to the low-latitude coccolith biostratigraphic zonation. Marine Micropaleontology, 5: 321-325.

PARONA, C. F. 1898: Note sui cefalopodi terziari del Piemonte. Palaeontographia Italica, 4: 155-168, Tav. 12-13 (1-2).
 POLŠAK, A. & ŠIKIĆ, D. 1973: Tumač za list Rovinj. Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000. Savezni geološki zavod Beograd, Beograd: 51 p.
 SACCO, F. 1924: L'Istria. Cenni geologici generali. Memorie descrittive della Carta geologica d'Italia, Mondovi, 19: 105 p.
 SCHAFHÄUTL, K. E. 1863: Süd-Bayerns Lethaea Geognostica. Der Kressenberg und die südlich

PLATE 2



von ihm gelegenen Hochalpen geognostisch betrachtet in ihren Petrefacten. Leipzig: 487 p., Taf. 1-86.

SCHUBERT, R. J. 1905: Zur Stratigraphie des istrisch-norddalmatinischen Mitteleocän. Jb. Geol. R. A., 55: 153-188.

SCHULTZ, O. 1976: Zur Systematik der Nautilidae. Anzeiger Österr. Akad. Wiss., mathem.-naturwiss. Kl., 1976/H.6: 43-51.

SCHULTZ, O. 1998: Tertiärfossilien Österreichs. Wirbellose, niedere Wirbeltiere und marine

Säugetiere. Goldschneck-Verlag, Korb: 159 p., (Taf. 1-65).

SOWERBY, J. 1812: The Mineral Conchology of Great Britain; or coloured figures and descriptions of those remains of Testaceous Animals or Shells, which have been preserved at various times and depths in the Earth. Printed by Benjamin Meredith, London 1: VII, 9-234 p.

SOWERBY, J. D. C. 1834: Systematical, stratigraphical and alphabetical indexes to the first six

- volumes of the Mineral Conchology of Great Britain. London: 242-250: 1-11.
- SOWERBY, J. D. C. 1840: No. 106. of the Mineral Conchology of Great Britain; coloured figures and descriptions of those remains of testaceous animals or Shells, which have been preserved at various times and depths in the Earth. London 7: 80 p., Pl. 610-648.
- STACHE, G. 1864a: Die Eocengebiete in Inner-Krain und Istrien. Jb. Geol. R. A., 14: 11-115.
- STACHE, G. 1864b: Geologisches Landschaftsbild des istrischen Küstenlandes. Österr. Revue, 5: 209-222.
- STACHE, G. 1889: Uebersicht der geologischen Verhältnisse der Küstenländer von Österreich-Ungarn. Alfred Hölder, Wien: 84 p.
- ŠIKIĆ, D. 1963: Eine Vergleichende Darstellung der Entwicklung des jüngeren klastischen Paläogens in Istrien, dem Kroatischen Küstenland und Dalmatien. Geol. vjesnik, 15/2: 329-336.
- TARLAO, A., TUNIS, G. & VENTURINI, S. 1995: Lutetian Transgression in Central Istria: Rogovići-Mečari Section Case. 1. Hrvatski geol. kongres Opatija, Zbornik radova, 2: 613-618, Pl. 1-2.
- TONIOLO, A. R. 1909: L'Eocene dei dintorni di Rozzo in Istria e la sua fauna. Palaeontographia Italica, Mem. Paleont., 15: 237-295, Tav. 24-26.
- TOULA, F. 1918: Lehrbuch der Geologie. Ein Leitfaden für studierende. Alfred Hölder, Wien und Leipzig: XI, 556 p., Taf. 1-30.

Ramenonožec *Lingula* iz srednjemiocenskih – badenijskih plasti Slovenije

The brachiopod *Lingula* from the Middle Miocene – Badenian beds of Slovenia

Vasja MIKUŽ¹, Miloš BARTOL² & Špela ULAGA³

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

²Paleontološki inštitut Ivana Rakovca ZRC SAZU, Novi trg 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija; mbartol@zrc-sazu.si

³Log 15 a, 1430 Hrastnik, Slovenija; spela.ulaga@gmail.com

Prejeto / Received 3. 10. 2012; Sprejeto / Accepted 19. 10. 2012

Ključne besede: *Lingula*, ramenonožec, srednji miocen, badenij, kamnolom Plesko, Centralna Paratetida, Slovenija

Key words: *Lingula*, brachiopod, Middle Miocene, Badenian, Plesko quarry, Central Paratethys, Slovenia

Izvleček

V prispevku je obravnavana prva najdba miocenskega inartikulatnega ramenonožca v Sloveniji. Najden je v badenijskih peščenih, laporastih apnencih kamnoloma Plesko nad Trbovljami. Ostanek ramenonožca pripada vrsti *Lingula dregeri* Andreae, 1893.

Abstract

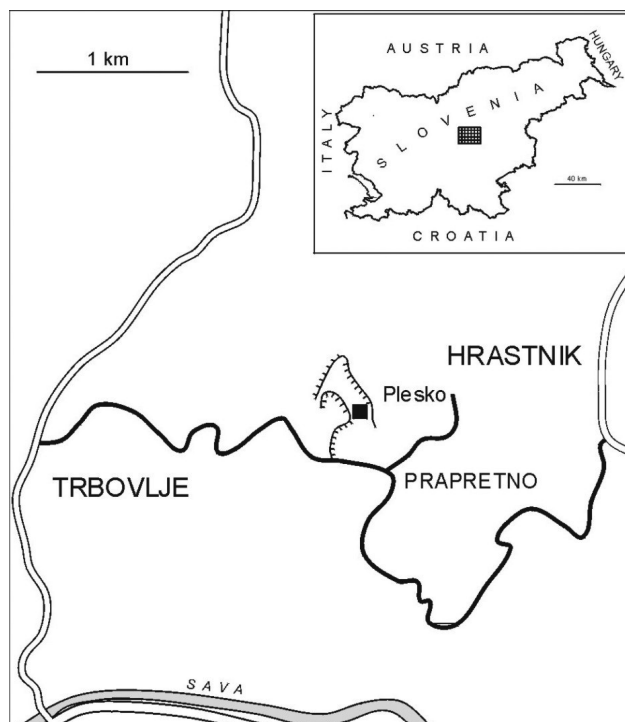
The article discusses the first find of an inarticulate brachiopod in Slovenia. The fossil was discovered in Miocene beds in Badenian sandy and marly limestones outcropping in the Plesko quarry near Trbovlje. It belongs to the species *Lingula dregeri* Andreae, 1893.

Uvod

Kamnolome v sklopu večjega območja med zaselkoma Plesko in Retje nad Trbovljami obiskujemo občasno že nekaj desetletij. V tamkajšnjih miocenskih kamninah smo našli veliko različnih skeletnih delov in odtisov številnih fosilnih organizmov. Med njimi je najdenih več redkih in pomembnejših najdb za slovenski prostor, ostanki rakovice *Tasadia carniolica* (Bittner, 1884) (KRIŽNAR 2009; MIKUŽ 2010) ter prvikrat najdena sipina kost glavonožca *Sepia* (sensu lato) sp. (MIKUŽ & BARTOL 2011).

V maju letošnjega leta smo si ogledali veliko fosilnih ostankov, najdenih v razkopih kamnoloma Plesko nad Trbovljami (sl. 1), z namenom njihove taksonomske določitve. Po določitvi in ugotovitvi njihove okvirne taksonomske pripadnosti, so bili 24. maja 2012 predstavljeni na razstavi »Na obalah Hrastnika« soavtorice članka Špele Ulaga. Med miocenskimi ostanki so bili ugotovljeni in predstavljeni: koralinaceje, rastline, školjke, polži, briozoji, rakovice, morski ježki in ribji zobje.

Pri pregledovanju in določevanju prinešenega materiala je pozornost zbudil manjši fosilni ostanek, za katerega nismo takoj vedeli, kam naj bi



Sl. 1. Geografski položaj kamnoloma Plesko

Fig. 1. Geographical position of Plesko quarry

ga uvrstili. Po krajšem razmisleku smo ugotovili, da smo nekaj podobnega v literaturi že videli. S podrobno študijo morfoloških značilnosti smo spoznali, da gre za ostanek ramenonožca rodu *Lingula*. Ker je to prva najdba takšnega ramenonožca v miocenskih kamninah pri nas, ga želimo predstaviti v pričujočem prispevku.

Laporasti apnenec z lingulo in korbolidni laporovec iz Pleska smo preiskali tudi na nanoplankton. M. Bartol je v laporastem apnencu z lingulo in v korbolidnem laporovcu našel samo dve obliki kalcitnega nanoplanktona. Vrsto *Coccolithus pelagicus*, ki pove da smo v kenozojskih kamninah in vrsto *Cyclicargolithus floridanus*, ki je pogosta v badeniju. Ta vrsta izgine blizu meje NN5/NN6.

Dosedanji podatki o najdbah inartikulatnih ramenonožcev v Sloveniji

Podatki o najdbah primerkov iz skupine brezsklepni ramenonožci (Inarticulata) pri nas, so zelo skromni. RAMOVŠ (1974, 154-155) v učbeniku Paleontologija omenja med ramenonožci, ki so brez sklepa, rodove *Lingula*, *Obolus*, *Broeggeria* in *Discina*. Od naštetih so bili pri nas najdeni samo primerki rodu *Discina*, in sicer v idrijski »koralni« rudi, ki je langobardske starosti. PAVŠIČ (2009, 349-350) omenja rodove *Lingula*, *Obolus*, *Discina* in *Crania*. Tudi v temu učbeniku je podatek, da so v Sloveniji najdeni samo primerki rodu *Discina* v srednjetriasni koralni rudi v Idriji in dodaja, da je določitev teh najdb še vedno problematična.

Paleontološki del

Sistematika po: ROWELL 1965 in EMIG 2008

Phylum Brachiopoda Duméril, 1806
Classis Inarticulata Huxley, 1869
Ordo Lingulida Waagen, 1885
Superfamilia Lingulacea Menke, 1828
Familia Lingulidae Menke, 1828

ROWELL (1965, H262-H263) piše, da so se ramenonožci iz družine Lingulidae in prav tako tudi rod *Lingula* pojavili v silurju, morda že v ordoviciju. Recentne lingule živijo zakopane v morsko dno, njihove lupine so iz kalcijevega fosfata. Tudi STANLEY (2005, 72) predstavlja ramenonožce rodu *Lingula*, zakopane v rove muljastega peščenega dna, v katerih so zasidrani z mehkiimi in gibljivimi tulci.

MÜLLER (1963, 326-327) navaja drugačne letnice in piše, da je razred Inarticulata postavil Huxley leta 1864, naddružino Lingulacea Waagen leta 1895 in rod *Lingula* Bruguière leta 1792. MÜLLER (1992, 443) piše, da sodi ramenonožec rodu *Lingula* med recentne relikte nekdanjih tedidnih elementov iz južnovzhodnoazijskega in avstralskega prostora.

EMIG (2008, 5-6) je zapisal, da so letnice prvega opisa rodu *Lingula* iz leta 1797 in vse ostale dose-

daj uporabljane napačne in da se moramo posluževati korektnih letnic 1791. Torej sledi, da je rod *Lingula* prvi opisal Bruguière leta 1791.

Genus *Lingula* Bruguière, 1791

EMIG (1982, 338-342) navaja, da današnje lingule živijo v evrihalinem okolju s slanostjo od 42 do 18 ‰, v globinah do 160 m (infralitoral-intertidal) in v sedimentu z zrnatostjo od 60 do 200 µm ter v temperaturnem intervalu od 18 do 12 °C. V geografskem smislu jih najdemo v tropskih in subtropskih conah Indijskega oceana in v zahodnem delu Tihega oceana. V morjih ob ameriški celini lingule ne prebivajo. Njihove lupine so iz anorganskih in organskih komponent. Anorgansko sestavino predstavlja kalcijev fosfat, ki ga je od 75 do 94 %, organske komponente pa so iz hitina (do okrog 20 %) in proteinov (do 22 %). EMIG (1982, 352-362) predstavlja še sedem recentnih lingul: *Lingula anatina* Lamarck 1801, *L. rostrum* (Shaw 1798), *L. reevi* Davidson 1880, *L. translucida* Dall 1921, *L. parva* Smith 1871, *L. tumida* Reeve 1841 in *L. adamsi* Dall 1873.

Lingula dregeri Andreae, 1893 Sl. 3

- 1921 *Lingula* aff. *Dumontieri* Nyst. – FRIEDBERG, 5, Tabl. 1, Fig. 1
1977 *Lingula dumortieri* Nyst, 1843 – BARCZYK & POPIEL-BARCZYK, 159, Pl. 1, Figs. 8-9
1990 *Lingula dregeri* Andreae, 1893 – POPIEL-BARCZYK & BARCZYK, 161, Pl. 1, Figs. 9-10
2005 *Lingula dregeri* Andreae, 1893 – EMIG & BITNER, 181-183, Fig. 2

Material in najdišče: Ohranjeno je kameno jedro s posameznimi deli izredno tanke lupine. *Lingula* je v peščenem laporastem apnencu s koralinacejami iz kamnoloma Plesko nad Trbovljami (sl. 2).

Opis: Kameno jedro je ozko, podaljšano in izbočeno. Ostanke lupine so zelo tanki. Vrh je prekrit, stranska robova sta rahlo konveksna in subparalelna. Ornamentacija lupine sestoji iz zelo drobnih prirastnic, ki se začnejo blizu vrha, nekaj časa so usmerjene vzdolž obeh lateralnih robov, nato se obrnejo k osrednjemu izbočenemu delu lupine. Sprednji ali anteriorni rob je rahlo polkrožen.

Velikost v mm (Size in mm):

Dolžina Length	Širina Width	Debelina Thickness
12	6	?

Primerjava: *Lingula*, ki jo predstavlja FRIEDBERG (1921, Tabl. 1, Fig. 1) je dolga 15 in široka 5,5 mm. Po zunanosti je poljski primerek nekoliko daljši in ožji od naše lingule iz kamnoloma Plesko. Lingule, ki jih prikazujeta BARCZYK & POPIEL-BARCZYK (1977, Pl. 1, Figs. 8-9) so v marsičem podobne tudi našemu primerku iz kamnoloma



Sl. 2. Srednjemiocenske – badenijske sedimentne kamnine v kamnolomu Plesko nad Trbovljami

Fig. 2. The Middle Miocene – Badenian sedimentary rocks in the Plesko quarry above Trbovlje

Foto (Photo): Vasja Mikuž



Sl. 3. Ostanke ramenonožca *Lingula dregeri* v srednjemiocenskem peščenem laporastem apnencu iz kamnoloma Plesko nad Trbovljami. Vzorec je iz paleontološke zbirke Špela Ulaga iz Hrastnika, x 10

Fig. 3. The remains of brachiopod *Lingula dregeri* in the Middle Miocene sandy and marly limestone from Plesko quarry above Trbovlje. The sample is from the paleontological collection of Špela Ulaga from Hrastnik, x 10

Foto (Photo): Marijan Grm

Plesko in najverjetneje pripadajo isti miocenski vrsti *Lingula dregeri*.

Pripombe: Ostanek iz Pleska je na prvi pogled oziroma po velikosti in deloma po obliki podo-

ben školjčni vrsti *Gastrochaena dubia* (Pennant, 1777) (cf. HÖRNES 1870, Taf. 1, Figs. 4a-4d) in (cf. SCHULTZ 2005, 1003, Taf. 146, Figs. 1a-1b, 2a-2b). FRIEDBERG (1921) je vrstno ime zapisal napačno *Lingula dumontieri*, pravilno je *L. dumortieri* Nyst, 1843.

Stratigrafska in geografska razširjenost: DAVIDSON (1874, 153) poroča, da so bili primerki vrste *Lingula dumortieri* Nyst najdeni v pliocenskih plasteh Belgije. Tudi VINCENT (1893, 41-42) vrsto *Lingula dumortieri* opisuje iz terciarnih skladov Belgije. FRIEDBERG (1921, 5) je lingulo opisal in predstavil kot *Lingula* aff. *dumontieri* iz miocenskih litotamnijskih apnencev na Poljskem. BARCZYK & POPIEL-BARCZYK (1977, 159, Pl. 1, Figs. 8a, 9a-9b) predstavljata najdbe vrste *Lingula dumortieri* Nyst, 1843 iz badenijskih skladov Korytniške kotline na Poljskem. POPIEL-BARCZYK (1980, 111) omenja najdbe rodu *Lingula* tudi iz južnovzhodnega predela Poljske (Huta Lubycka, regija Roztocze, višavje Lublin). RADWAŃSKA in RADWAŃSKI (1984, 265) iz miocenskih-badenijskih plasti Korytnice na Poljskem omenjata tudi inartikulatna ramenonožca *Lingula dumortieri* Nyst in *L. cf. dregeri* Andreae. GUTOWSKI (1984, 331) iz istega območja Poljske omenja med lingulami samo vrsto *Lingula dumortieri*. POPIEL-BARCZYK in BARCZYK (1990, 161) vrsto *Lingula dregeri* opisujeta iz badenijskih plasti najdišča Kików na Poljskem. EMIG in BITNER (2005, 183) vrsto *Lingula dregeri* omenjata iz miocenskih skladov Avstrije, Poljske, Ukrajine in Romunije.

Zaključki

Predstavljena je prva najdba ramenonožca iz rodu *Lingula* z ozemlja Slovenije. Primerek je najden v kamnolomu Plesko nad Trbovljami v srednjemiocenskem – badenijskem peščenem, laporastem apnencu s številnimi odlomki školjčnih lupin in posameznimi manjšimi rodoidi. Fosilna lingula je majhna, ohranjeno je predvsem kame-no jedro z nekaj ostanki njene zelo tanke lupine. Celotna oblika fosilnega ostanka in značilnosti na lupini narekujejo uvrstitev k miocenski vrsti *Lingula dregeri* Andreae, 1893.

Vzorčili smo tudi laporast apnenec na kalcitni nanoplankton. Na podlagi predhodnih raziskav je lingula zanesljivo najdena v badenijskih kamninah. Tega z analizo nanoplanktona nismo mogli potrditi, saj so vzorci skoraj brez nanofosilov. Ugotovljenih je le nekaj primerkov vrste *Coccolithus pelagicus* in vrste *Cyclicargolithus floridanus*, slednja izgine pri meji biocon NN5/NN6.

Conclusions

The brachiopod *Lingula* from the Middle Miocene – Badenian beds of Slovenia

In the article we present the first find of a brachiopod of the *Lingula* genus in Slovenia. The

specimen was found in the Plesko quarry near Trbovlje in sandy and marly limestone of the Middle Miocene – Badenian age. The limestone contains abundant fragments of bivalve shells and individual small rhodoids. The lingula fossil is small, it consists of a cast fossil with some remains of the very thin shell. The form of the fossil and the characteristics of the shell allow the determination of the Miocene species *Lingula dregeri* Andreae, 1893.

The marly limestone from the bed containing the fossil was studied for calcareous nannoplankton. The beds are known to be of Badenian age on the basis of previous studies, but we were unable to confirm this by means of nannoplankton biostratigraphy as the samples were nearly barren of nannofossils. Only a few specimens of *Coccolithus pelagicus* and *Cyclacargolithus floridanus* were found, the latter species has its last occurrence near the NN5/NN6 biozone boundary.

Zahvala

Sodelavcu Marijanu Grmu se zahvaljujemo za fotografsko in računalniško podporo.

References

- BARCZYK, W. & POPIEL-BARCZYK, E. 1977: Brachiopods from the Korytnica basin (Middle Miocene; Holy Cross Mountains, Poland). *Acta Geol. Polonica*, 27/2: 157-167, Pl. 1-2.
- DAVIDSON, T. 1874: On the Tertiary Brachiopoda of Belgium, etc. *Geological Magazine*, N. ser., D. 2/1: 150-159.
- EMIG, C. C. 1982: Taxonomie du genre *Lingula* (Brachiopodes, Inarticulés). *Bull. Mus. natn. Hist. nat. Paris*, sér. 4, section A, 4/3-4: 337-367.
- EMIG, C. C. 2008: On the history of the names *Lingula*, *anatina*, and on the confusion of the forms assigned them among the Brachiopoda. *Carnets de Géologie, Notebooks on Geology*, Brest: Article 2008/08 (CG2008_A08): 1-13.
- EMIG, C. C. & BITNER, M. A. 2005: The brachiopod *Lingula* in the Middle Miocene of the Central Paratethys. *Acta Palaeont. Polonica*, 50/1: 181-184.
- FRIEDBERG, W. 1921: Ramienionogi miocénskie zachodniego Podola = Les brachiopodes miocènes de la Podolie occidentale. *Prace Naukowe Uniwersytetu Poznańskiego, sekc. matem.-przyrod.*, 2: 1-20, Tabl. 1-3.
- GUTOWSKI, J. 1984: Sedimentary environment and synecology of macrobenthic assemblages of the marly sands and red-algal limestones in the Korytnica Basin (Middle Miocene; Holy Cross Mountains, Central Poland). *Acta Geol. Polonica*, 34: 323-340, Pl. 1-3.
- HÖRNES, M. 1870: Die Fossilien Mollusken des Tertiär-Beckens von Wien. Bd. II, Bivalven. *Abh. Geol. R. A.*, 4: 479 p., Taf. 1-85.
- KRIŽNAR, M. 2009: Kranjska rakovica (*Tasadia carniolica*) ponovno odkrita pri Trbovljah. *Proteus*, (2008/2009), 71/9-10: 427-438.
- MIKUŽ, V. 2010: Rakovice iz srednjemiocenskih plasti kamnolomov nad Trbovljami. (Crabs from Middle Miocene beds of quarries above Trbovlje, Slovenia). *Folia biologica et geologica*, 51/1: 13-20, (Tab. 1).
- MIKUŽ, V. & BARTOL, M. 2011: Prva najdba sipine kosti (Sepiidae) v miocenskih skladih Slovenije = The first find of cuttlefish shell (Sepiidae) in Miocene beds of Slovenia. *Folia biologica et geologica*, 52/3: 5-22, (Tab. 1-5).
- MÜLLER, A. H. 1963: *Lehrbuch der Paläozoologie*. Band 2, Invertebraten, Teil 1, Protozoa-Mollusca 1. Gustav Fischer Verlag, XV: 574 p.
- MÜLLER, A. H. 1992: *Lehrbuch der Paläozoologie*. Band 1. Allgemeine Grundlagen. 5. Auflage. Gustav Fischer Verlag Jena: 514 p.
- PAVŠIČ, J. 2009: *Paleontologija. Paleobotanika in nevretenčarji*. 2. dopolnjena in popravljena izdaja. Univerza v Ljubljani, Naravoslovno-tehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Ljubljana: 460 p., (Tab. A-K).
- POPIEL-BARCZYK, E. 1980: Brachiopod genus *Cryptopora* Jeffreys from the Miocene deposits of the Lublin Upland. *Acta Geol. Polonica*, 30/1: 111-120, Pl. 1-2.
- POPIEL-BARCZYK, E. & BARCZYK, W. 1990: Middle Miocene (Badenian) brachiopods from the southern slopes of the Holy Cross Mountains, Central Poland. *Acta Geol. Polonica*, 40/3-4: 159-181, Pl. 1-7.
- RADWAŃSKA, U. & RADWAŃSKI, A. 1984: A new species of inarticulate brachiopods, *Disciniscia polonica* sp. n., from the Korytnica Basin (Middle Miocene; Holy Cross Mountains, Central Poland). *Acta Geol. Polonica*, 34/3-4: 253-269, Pl. 1-2.
- RAMOVŠ, A. 1974: *Paleontologija*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo. Ljubljana: XIII, 304 p., ilustr. 1-155.
- ROWELL, A. J. 1965: Inarticulata. In: Moore, R. C. (ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology*. Part H, Brachiopoda, 1. The Geological Society of America, Inc. and The University of Kansas Press, Lawrence: H260-H296.
- SCHULTZ, O. 2005: *Bivalvia neogenica* (Solenioidea – Clavagelloidea). In: PILLER, W. E. (ed.), *Catalogus Fossilium Austriae*. Band 1/Teil 3. Ein systematisches Verzeichnis aller auf österreichischem Gebiet festgestellten Fossilien. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, V: 691-1067, Taf. 96-152.
- STANLEY, S. M. 2005: *Earth System History*. Second Edition. W. H. Freeman and Company, New York: XXI: 567 p.
- VINCENT, É. 1893: Contribution à la paléontologie des terrains tertiaires de la Belgique. Brachiopodes. *Ann. Soc. Roy. Malacologique Belge*, 28: 38-64, Pl. 3-4.

Ferromangan – izvrstna imitacija kovinskega meteorita

Ferromanganese – an excellent imitation of metallic meteorite

Miha JERŠEK¹ & Zoran MILIĆ²

¹Prirodoslovni muzej Slovenije, Prešernova 20, 1000 Ljubljana, mjersek@pms-lj.si

²Narodni muzej Slovenije, Prešernova 20, 1000 Ljubljana, zoran.milic@nms.si

Prejeto / Received 31. 5. 2012; Sprejeto / Accepted 30. 9. 2012

Ključne besede: ferromangan, meteorit, Kropa

Key words: ferromanganese, meteorite, Kropa

Izvleček

Po stoti obletnici padca železovega meteorita v dolino Soče (meteorit Avče, padel leta 1908) se je zanimanje za meteorite med Slovenci precej povečalo. Posledično se je povečalo tudi število najdb domnevnih meteoritov. Med številnimi zamenjavami so predvsem različne žindre in železovi minerali. V prispevku je opisan za slovenski prostor nov material, ki ga lahko zamenjamo z meteoritom, zlitina iz mangana in železa, ki je bila najdena v okolici Kroke na Gorenjskem in ima veliko večino morfoloških značilnosti in nekatere fizikalne lastnosti zelo podobne železovo nikljevim meteoritom.

Abstract

Since the 100 anniversary of the fall of an iron meteorite in the Soča Valley (meteorite Avče, fell in 1908) the interest in meteorites has increased substantially in Slovenia. The number of presumed meteorite finds increased accordingly. Among the numerous swaps, different slag and iron minerals prevail. This paper presents a new material which can be mistaken for iron meteorite, a ferromanganese alloy, which was found in the vicinity of Kropa. The vast majority of morphological characteristics and some physical properties of this alloy are very similar to iron nickel meteorite.

Uvod

Meteoriti so predmeti iz veselja, ki venomer vzbujajo posebno pozornost – tako pri najditeljih, kot pri strokovnjakih in tudi širši javnosti. Toda ker so padci, predvsem pa najdbe, pravih meteoritov sorazmerno redki, so med najdbami domnevnih meteoritov tudi številni minerali in artefakti, ki po videzu morda spominjajo na meteorite in so zato pri najditelju vzbudili določeno pozornost (JERŠEK, 2008). Vse od obuditve avškega meteorita, ki je padel v dolino Soče leta 1908 (Božič, 2008), padca in najdbe meteorita Jesenice leta 2009 (BISCHOFF et al., 2011) in najdbe meteorita Javorje prav tako leta 2009 (MILER & GOSAR, 2011), pa se je zanimanje za meteorite v Sloveniji še bolj povečalo. Skoraj vsak mesec najditelji sporočajo svoje domnevne najdbe Prirodoslovnemu muzeju Slovenije in Geološkemu zavodu Slovenije.

Običajno se izkaže, da so najdeni kosi različni fragmenti žindre, limonit, bobovec ali piritno in/ali markazitna konkrecija s kalcitom (MILER et al., 2011). Na odprtju razstave o geoloških značilnostih Šentanske doline v Trzinu meseca

maja 2012, pa nam je dolgoletni zbiratelj in član Društva prijateljev mineralov in fosilov Slovenije, Sandi Stopar, prinesel nadvse zanimiv primer, ki je močno odstopal od prejšnjih domnevnih najdb tako po videzu kot po gostoti. Brez oklevanja smo se odločili, da primerek raziščemo in ugotovimo poreklo.

Material in metode

Kos domnevnega meteorita je najditelj našel na cesti 2. etaže v kamnolomu Brezovica v Pečeh pri Kropi na Gorenjskem. Celoten vzorec smo stehali s precizno tehniko Sartorius L420P, izmerili gostoto na osnovi mase izpodrinjene vode in ga pregledali makroskopsko, pri čemer smo združili opazovanja s prostim očesom ter pregled vzorca z lupo 10 x povečave, magnetom in kompasom. S kvantitativno rentgensko fluorescenčno analizo (EDS XRFA, z analizatorjem model PEDUZO 01/Am/Sip-250) smo določili tudi kemijsko sestavo vzorca. Analize smo opravili v laboratoriju Narodnega muzeja Slovenije.



Sl. 1. Neobičajno težek kos domnevnega meteorita je našel zbiratelj Sandi Stopar in vzorec predal v raziskave Prirodoslovnemu muzeju Slovenije. Dimenzije primerka so 9 x 7 x 7 cm in masa 1608,78 g.

Fig. 1. Abnormally heavy piece of suspected meteorite was found by collector Sandi Stopar who brought the piece for investigation to the Slovenian Museum of Natural History. Dimensions of the sample are 9 x 7 x 7 cm and weight of 1608.78 g.

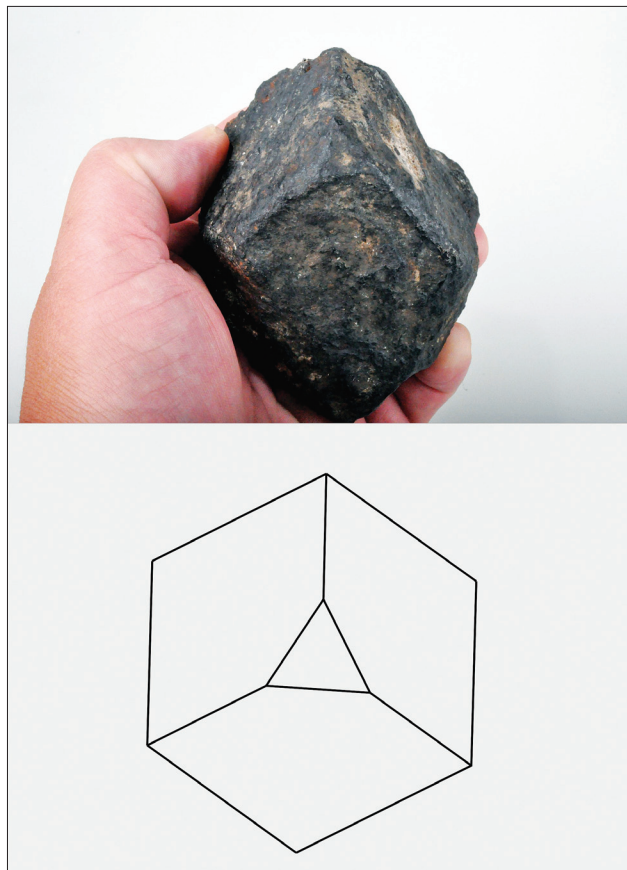
Rezultati

Makroskopski pregled

Dimenzije primerka so 9 x 7 x 7 cm, njegova masa pa znaša 1608,78 gramov (sl. 1). Zunanja površina vzorca je rjava, kot je to sicer značilno za meteorite z ohranjeno žgalno skorjo. Ima sorazmerno gladke ploskve z nekaj zajedami. Na vrhnjem delu vzorca so dobro ohranjeni robovi, ki se stekajo v skupno ploskev trikotne oblike, medtem ko je nasprotna stran oblikovno slabše ohranjena (sl. 2). Na manjšem odlomljenem delu je dobro vidna srebrnkasto bela površina s kovinskim sijajem (sl. 3). Na tem delu je opazna do 0,2 mm debela rjava skorja kot je sicer značilna žgalna skorja meteoritov. Z lupo 10 x povečave smo pregledali površino vzorca in na enem mestu našli približno 1 cm² veliko svetlo polje, ki ima na površini drobna temna zrna okrogle oblike, ki so imeli na svojem obodu obroč iz temno rjavih mineralov, verjetno limonita (sl. 4). Magnet se na vzorcu ni obdržal, medtem ko je vzorec pri premikanju ob kompasu rahlo zanihal iglo.

Gostota domnevnega meteorita

Gostoto primerka smo izračunali na podlagi njegove mase (1608,78 g), izmerjene s precizno tehtnico, in njegovega volumna (237 cm³), ki je bil določen z volumnom izpodrinjene vode po potapljanju v vodo. Tako izračunana gostota vzorca znaša 6,8 g/cm³.



Sl. 2. Vzorec domnevnega meteorita izkazuje podobne morfološke značilnosti, kot jih imajo nekateri orientirani železovi meteoriti. Na spodnji sliki je idealizirana oblika s ploskvami kocke, ki so presežane s ploskvami oktaedra.

Fig. 2. Sample of the presumed meteorite shows similar morphological characteristics as those of some oriented iron meteorites. The figure below plots the idealized hexahedron, which is truncated by the plane of the octahedron.



Sl. 3. Na odlomljenem delu je prepoznavna sveža srebrnkasto bela površina s kovinskim sijajem, kar je značilno tudi za železovo nikljeve meteorite, obenem pa je opazna tanka skorja čokoladne rjave barve, ki je pri meteoritih posledica žarenja pri padanju skozi atmosfero, detajl meri 3 x 2 cm.

Fig. 3. On the broken part, fresh silvery white surface with a metallic luster, which is also characteristic of iron nickel meteorites, is recognizable while the visible thin crust is chocolate brown, which is usually a result of melting and ablation of meteorites during their passage through the atmosphere, detail 3 x 2 cm.



Sl. 4. Drobni kroglasti fragmenti so mestoma obdani z limonitom, kar spominja na hondrule, ki so sicer značilne za kamnite meteorite hondrite. Na tem kosu feromangana so zelo verjetno sekundarnega nastanka, saj so opazni samo na površini, detajl meri 1 x 1 cm.

Fig. 4. Small spherical fragments are sometimes surrounded by secondary iron minerals that resemble chondrules, which are otherwise characteristic of stony meteorites chondrites. In this piece of ferromanganese, these spherical fragments are probably of secondary origin, since they are only visible on the surface, detail 1 x 1 cm.

Kemijska sestava domnevnega meteorita določena z metodo EDS XRFA

Z rentgensko fluorescenčno analizo smo določili kemijsko sestavo kovin na površini domnevnega meteorita na treh mestih in rezultate strnili v tabeli 1. Vsebnosti mangana in železa se razlikujeta predvsem zaradi geometrije merjenega vzorca ter zaradi verjetne nehomogenosti kovinske sestave na površini predmeta.

Diskusija

Morfološke značilnosti površine vzorca zelo spominjajo na videz kovinskih železovo nikljevih meteoritov, saj ima rjavo »žgalno« skorjo, ki je tanka, morda debela le 0,2 mm, na odlomljeni srebrnkasto beli površini pa opazimo značilen kovinski sijaj, ki je značilen za železovo nikljeve meteorite (JERŠEK & VIDRIH, 2007). Zelo nenava-

Tabela 1. Meritve kemične sestave vzorca domnevnega meteorita z rentgensko fluorescenčno analizo

Table 1. Measurements of the chemical composition of the sample of presumed meteorite using X-ray fluorescence analysis

	Mn (mas. %)	Napaka (mas. %)	Fe (mas. %)	Napaka (mas. %)
Mesto 1	69,5	± 2,1	30,5	± 1,0
Mesto 2	73,8	± 2,7	26,3	± 1,2
Mesto 3	78,9	± 2,5	21,1	± 0,8

den in zavajajoč je predel v velikosti 1 x 1 cm, z zrni, ki spominjajo na hondrule, kakršne so tudi v meteoritu Jesenice. Eden izmed fragmentov meteorita Jesenice ima na videz zelo podobno razgaljeno polje, kjer so vidne hondrule in kamnito jedro meteorita (ATANACKOV et al, 2010). Nenavadna pa je zunanja oblikovanost domnevnega meteorita, saj je v osnovi kocka, presekana s ploskvami oktaedra. Na prvi pogled spominja na videz orientiranih meteoritov še posebno zato, ker je na nasprotni strani ta morfologija manj izrazita in bi lahko sklepali, da del s slabše ohranjeno morfologijo kaže na smer letenja, medtem ko je nasprotni del bolj ohranjen. Tudi gostota domnevnega meteorita je podobna gostoti kovinskih meteoritov oziroma pallasitov, v vsakem primeru pa je bistveno višja od kamnin, ki so v okolici najdbe (JERŠEK & VIDRIH, 2007). Šele določitev kemične sestave je pokazala, da gre v resnici za feromangan.

Kos feromangana je najditelj Sandi Stopar našel na cesti 2. etaže kamnoloma. Za tovrstne »cestne« vzorce je seveda vedno vprašanje od kod so jih pripeljali, čeprav na splošno velja, da ne prav od daleč. Okolica Kroke je sicer znana po nahajališčih bobovca, limonitiziranega pirita in nekaterih drugih pojavih železovih mineralov. Zato je najditelj pokazal dobršno mero poznavanja mineralov in kamnin, saj je ugotovil, da je najdeni kos feromangana bistveno težji od drugih pretežno železovih mineralov v okolici Kroke. Najdeni feromangan zelo verjetno izvir iz Železarne Jesenice. Ta in podobni pojavi, kot na primer najdba meteorita Javorje (MILER & GOSAR, 2011) nas navajajo, da bomo v prihodnje še priča najdbam novih domnevnih meteoritov in morda bo med njimi spet tudi kakšen, ki je svojo pot začel nekje med Jupitrom in Marsom.

Zaključek

Feromangan najdemo na Internetu kot eno izmed možnih zamenjav za meteorite. Nekaj zadnjih let se vse bolj intenzivno pojavlja tudi na prodajnih razstavah ali na spletnih oglasih. Trgovanje z meteoriti je namreč vse bolj živahno in vse več je tudi njihovih imitacij. Ker je feromangan po številnih, predvsem makroskopskih, značilnostih na videz zelo podoben železovo nikljevim meteoritom, ga lahko brez zadržkov imenujemo kot zelo dobra imitacija meteorita. Vsi, ki se z meteoriti ukvarjajo profesionalno ali ljubiteljsko, morajo biti na pojavljanje te zlitine zelo pozorni. Morda je edina prepoznavna lastnost, ki ne zahteva ustrezne laboratorijske analize, pregled vzorca z magnetom oziroma kompasom, saj je feromangan zelo šibko magneten medtem ko so železovo nikljevi meteoriti močno magnetni.

Zahvala

Avtorja prispevka se zahvaljujeta najditelju Sandiju Stoparju za primerek feromangana, ki ga je posredoval Prirodoslovnemu muzeju Slovenije.

Literatura

- ATANACKOV, J., JERŠEK, M., KAC, J., Kladnik, G. & MIRTič, B. 2010: Meteorite from Mežakla. V: KONOBLJ, T. et al. (ur.): Meteorit z Mežakle. Občini Jesenice in Gorje: 54 str.
- 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. *Meteorites & 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, Avče: Športno-kulturno-turistično društvo: 17-19.
- JERŠEK, M. & VIDRIH, R. 2007: Meteoriti: sto let od padca meteorita pri Avčah v dolini Soče. *Življenje in tehnika*, 9/58: 16 str.
- JERŠEK, M. 2008: Meteoriti v Sloveniji. V: Božič, D. (ur.), Meteorit iz Avč v dolini Soče: 1908-2008. Prirodoslovni muzej Slovenije, Avče: Športno-kulturno-turistično društvo: 30-32.
- MILER, M., GOSAR, M. & MARKIČ, M. 2011: Opredelevitev domnevnega meteorita iz Trbovelj. *Geologija*, 54/2, 161-168, doi:10.5474/geologija.2011.012
- 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.

Nova knjiga

Trajan DIMKOVSKI, 2012: Nahajališča nekovinskih mineralnih surovin v Sloveniji – Površinski kopi II. del, Mineralne surovine za potrebe gradbeništva. Geološki zavod Slovenije in RGP Velenje, 206 str.

Avtor monografije Trajan Dimkovski, univ. dipl. inž. geologije, je bil v letih 1967 in 2000 raziskovalec, dolgoletni vodja Oddelka za ekonomsko geologijo, vodja Sektorja za geologijo in kasneje direktor Inštituta za geologijo, geotehniko in geofiziko. Tako je dolga leta podrobno spremljal stanje v ekonomski geologiji in na področju mineralnih surovin slovenskega prostora.

Knjiga predstavlja nadaljevanje prvega dela monografije z naslovom »Nahajališča mineralnih surovin v Sloveniji – Površinski kopi, I. del«, ki jo je Dimkovski v soavtorstvu z D. Rokavec objavil leta 2001, tiskana pa je bila v izdaji Geološkega zavoda Slovenije. Ta prikazuje nahajališča kremenovih surovin, mineralnih surovin za kemično, cementno, keramično in opekarsko industrijo.

Monografija je prvi sistematični in podrobni prerez o površinskem izkoriščanju mineralnih surovin za potrebe gradbeništva pri nas, prikazuje pa zatečeno stanje izkoriščanja teh mineralnih surovin, kot tudi površinsko rudarjenje v polpreteklosti. V njej so predstavljeni in podrobno opisani tako aktivni površinski kopi, kot tudi nekateri opuščeni kamnolomi in posamezna perspektivna nahajališča.

V predstavljenem drugem delu monografije so prikazane mineralne surovine in njihova nahajališča **tehničnega kamna – apnenca, dolomita in silikatnih kamnin ter proda in peska**, in sicer od geologije širšega območja in geoloških razmer v nahajališču, kvalitete in uporabnosti surovine do njene predelave na obstoječih industrijskih obra-

tih. Knjiga ima angleški povzetek ter je opremljena z bogatim fotografskim gradivom in grafičnimi prilogi. K opisu 158 nahajališč je dodan seznam strokovnih poročil, kot vira uporabljene literature. Knjiga je nastajala daljše obdobje avtorjeve strokovne kariere. Namenjena je tako pridobivalcem mineralnih surovin in vsem, katerih dejavnost je povezana z rudarstvom, geologijo in gradbeništvom, zelo koristna pa bo tudi za upravne organe, ki nadzorujejo izkoriščanje mineralnih surovin. Nenazadnje služi kot študijski priročnik za študente različnih smeri montanistike.

Knjiga je glede na vrste predstavljenih mineralnih surovin razdeljena na štiri poglavja. Obsega 206 strani, vključuje 72 barvnih fotografij in grafik ter 4 preglednice nahajališč posameznih vrst mineralnih surovin za gradbeništvo.

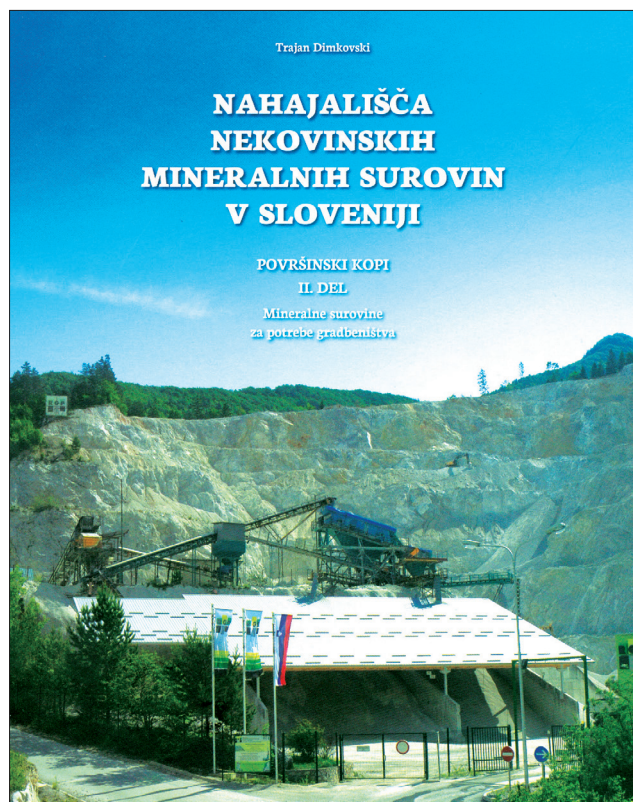
V nizu naravnih virov so mineralne surovine pomemben dejavnik nacionalnega bogastva in družbenega razvoja države in njene ekonomske, politične in socialne neodvisnosti in so zato po slovenski Ustavi v lasti Države. Ekonomska vrednost in neobnovljivost ter neenakomernost pojavljanja v regionalnem in lokalnem smislu so osnovne in specifične značilnosti mineralnih surovin. Njihovo trajnostno izkoriščanje kot gospodarska panoga je gonilo razvoja drugih panog in procesov gospodarskega in tehnološkega razvoja vsake družbe in civilizacije. Pri mineralnih surovinah za gradbeno industrijo pa gre še za eno specifiko – te stroškovno namreč ne prenesejo dolgega transporta, kar pomeni, da imajo pomemben lokalni pomen.

Na majhnem prostoru Slovenije najdemo kamnine različnega nastanka, starosti in sestave, v katerih so mineralne surovine nastale z različnimi kemičnimi (apnenec, dolomit) in mehanskimi procesi (prod, pesek). Po obdobju zapiranja številnih premogovnikov in rudnikov kovin ostaja površinsko pridobivanje nekovinskih mineralnih surovin tista dejavnost, ki še ohranja dolgoletno rudarsko tradicijo na Slovenskem.

Trenutna svetovna gospodarska kriza se odraža tudi na znatnem padcu proizvodnje kamenih agregatov. Tako ohromitev gradbenih del čutimo tudi v Sloveniji. Nedvomno pa lahko pričakujemo, da bo v prihodnjih obdobjih gospodarske konsolidacije ponovno oživitev gradbene dejavnosti spremljal tudi razmah rudarske dejavnosti. Tako bodo mineralne surovine za gradbeništvo tudi v prihodnje ostale nujen dejavnik gospodarskega razvoja Slovenije.

Avtor s svojo monografijo o površinskih kopih tehničnega kamna ter proda, njihovem pridobivanju, kvaliteti in uporabnosti prispeva svoj delček v mozaik vedenja o slovenskih neobnovljivih naravnih virih. Dolgo pričakovano delo, ki nam na enem mestu daje celovit pregled v stanje aktivnih, opuščenih in potencialnih nahajališč in kamnolomov mineralnih surovin za potrebe gradbeništva v naši državi.

Duška Rokavec



Poročila

34. Mednarodni geološki kongres Brisban, Avstralija, 5.–12. avgust 2012

Marko KOMAC

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-Ljubljana, e-mail: marko.komac@geo-zs.si

Štiri leta po Oslu so hitro minila in letos poleti je med 5. in 12. avgustom 2012 v Brisbanu, v Avstraliji, potekal 34. mednarodni geološki kongres (34th *International Geological Congress*). Udeležilo se ga je 6012 udeležencev iz 112 držav. V petih dneh se je zvrstilo 3712 predstavitev rezultatov znanstvenih raziskav, 1439 posterjev in 24 strokovnih delavnic. Pred in po kongresu je bilo organiziranih tudi 29 terenskih ekskurzij po Avstraliji, Novi Zelandiji in Pacifiku. Poleg strokovnega dela se je na razstavnih prostorih GeoExpa predstavilo 283 razstavljalcev, vzporedno z glavnim kongresom pa je potekal tudi 2. svetovni kongres mladih geoznanstvenikov (2nd *World Young Earth Scientist (YES) Congress* – <http://www.networkyes.org/>). Organizirana so bila številna poslovna srečanja geologov iz javnega sektorja, akademskih krogov in industrije.

Rezultate svojega dela so udeleženci predstavili v 37 različnih tematskih sklopih, bilo je tudi več plenarnih predavanj. Trenutno prevladujoča tema v svetovni geologiji so mineralne surovine in energenti, bodoča oskrba z njimi, paleo podnebne spremembe, geologija okolja ter upravljanje s skoraj nepregledno množico digitalnih geoloških

podatkov. Plenarna predavanja so dostopna na spletni strani kongresa (www.34igc.org).

Forum predstavnikov nacionalnih odborov IUGS in IGCP ter predstavnikov pridruženih članic IUGS je tokrat izvolil novo vodstvo in izvršni odbor. Za enega od podpredsednikov IUGS je bil izvoljen doc. dr. Marko Komac iz Slovenije. Med dvema kandidatom za prireditelja 36. mednarodnega geološkega kongresa, ki bo čez osem let, New Delhijem in Vancouvrom, je bil izbran za gostitelja kongresa indijski New Delhi. Informacije o tem, 36. kongresu so na voljo na spletni strani le-tega (<http://igc2020delhi.com/>).

Naslednji, 35. mednarodni geološki kongres se bo odvijal čez štiri leta, med 27. avgustom in 5. septembrom 2016 v Cape Townu v Južnoafriški republiki (JAR). Lokalni organizacijski odbor se že zdaj aktivno pripravlja na dogodek, ki ga bodo zagotovo obogatile številne terenske ekskurzije po JAR in drugih geološko zanimivih lokacijah v Afriki. Informacije o tem kongresu so na voljo na <http://www.35igc.org> in pri g. Dannie Barnardu, generalnemu sekretarju 35. IGC (barnardo@geoscience.org.za).

Nasvidenje čez štiri leta v Cape Townu!

39. Mednarodni hidrogeološki kongres Niagara Falls, Kanada 16. – 21. september 2012

Mihael BRENČIČ^{1,2}

¹Oddelek za geologijo, NTF, UL, Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana; e-mail: mihael.brencic@ntf.uni-lj.si

²Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana

Z nacionalnega vidika je kanadska hidrogeologija med najbolj razvitimi na svetu. Tu so delovala ali pa še delujejo takšna imena kot so John Cherry, Allan Freeze in Josef Tóth ter številni drugi pomembni hidrogeologi, ki so premikali meje hidrogeološke vede. Zaradi tega je bilo pred 39. kongresom Mednarodnega združenja hidrogeologov veliko pričakovanj. Kljub temu, da je bil kongres zelo dobro organiziran in da so bila številna zanimiva predavanja, pa ni ponudil presežkov. V celoti ga lahko opredelimo kot kongres, ki je podal korekten pregled hidrogeoloških raziskav v zadnjih letih, brez pomembnejših novih smernic in bistvenih novih dognanj.

Na kongresu je bilo skoraj tisoč udeležencev iz nekaj deset držav, to ga uvršča tudi med najbolj obiskane kongrese do sedaj. Poleg domačinov in hidrogeologov iz Združenih držav Amerike so močno prevladovali udeleženci s Kitajske. Toda tokrat njihova prevlada ni bila le številčna, predstavili so tudi zelo zanimive rezultate in raziskave in vedno bolj in bolj prevzemajo pomemben delež

v dosežkih tudi na področju hidrogeologije, saj angleški jezik postaja čedalje manjša ovira.

Delo na kongresu je potekalo v številnih sekcijah, od kraške hidrogeologije, do hidrogeologije onesnaževal. Nekatere sekcije so imele le po nekaj predavanj, druge so bile številčnejše in so obsegale skoraj vse kongresne dni. Med takšne je sodila sekcija Regionalni tok podzemne vode, ki je bila posvečena osemdeseti obletnici profesorja Josefa Tótha, ki je koncept regionalnega toka podzemne vode velikega merila tudi vpejal v hidrogeologijo. V okviru teh predstavitev so bili predstavljeni novejši koncepti, predvsem temelječi na numeričnih modelih regionalnega toka. Med kvalitetnejše sekcije so sodile tiste, ki so bile posvečene kraški hidrogeologiji, poleg predstavitev praktičnih raziskav je bil velik del predstavitev posvečen teoretičnim razmislekom o dinamiki podzemne vode v krasu in nastanku krasa. Predavanja s tega področja so bila zanimiva tudi zaradi tega, ker so svoje prispevke predstavile tudi nekatere avtoritete s tega področja.

Najpomembnejši in najbolj zanimiv del kongresa so bila plenarna in vabljen predavanja. Kongres je postregel s predavanji eminentnih hidrogeologov. Pri nekaterih o teh predavanjih so organizatorji ubrali nenavadno pot, predavanja so potekala med kosilom, kar je evropskim ušesom zvenelo nekoliko čudno. Ker je šlo za zelo zanimive predstavitve, si jih velja nekoliko podrobneje ogledati. Prvo plenarno predavanje z naslovom »Kdaj in kako se je hidrogeologija v Kanadi pričela?« je predstavil Joseph Tóth, ki poleg Petra Meyboma velja tudi za začetnika kanadske hidrogeološke šole. Predavanje je bilo zanimivo, ker je v njem preko zgodovinskega orisa predstavil razvoj idej o regionalnem toku podzemne vode, hkrati s tem pa je orisal, kako so ti koncepti omogočili povsem praktično izkoriščanje podzemne vode. Naslednji predavatelj, Frank Schwartz je predstavil predavanje z naslovom »Odziv jezer v preriji na ekstremno spremenljivost klime; integrirano opazovanje in analize na osnovi modelov«. Ker gre za glavnega urednika ene od osrednjih hidrogeoloških revij *Ground Water*, je bilo predavanje bolj kot znanstvenega vidika, zanimivo v tistem delu, ko je predstavil pogled urednika na članke, ki jih objavljajo znanstvene revije. Razložil je pojavljanje časovnih ciklov ponavljanja različnih idej, ki se vedno znova in znova pojavljajo v revijalnih objavah, kar je poimenoval z izrazom »zombie znanost«. Izbira predavanja Johna A. Cherryja je bila nekoliko nenavadna. Navkljub temu, da je širši javnosti znan predvsem kot soavtor enega najpomembnejših hidrogeoloških učbenikov s preprostim naslovom »Groundwater« in številnih študij s področja transporta onesnaževal v podzemni vodi, se je dotaknil zelo praktične problematike odlaganja odpadkov. V svojem predavanju z naslovom »Odlaganje radioaktivnih odpadkov v Kanadi; historični pregled in kritika« je podal pregled razvoja metod in razumevanja širjenja radioaktivnih snovi v podzemni vodi, hkrati pa se je lotil tudi kritike razumevanja kamnin primernih za odlaganje radioaktivnih odpadkov, predvsem s tega vidika da se je potrebno pri tej presoji usmeriti širše in ne le na posamezne kamnine. Hkrati je podal zelo resno kritiko neustreznega pristopa

k recenzijam in revizijam teh študij, ki so pogosto zelo pristranske. Allan R. Freeze drugi soavtor prej omenjenega učbenika se je lotil predavanja z zelo nenavadnim naslovom »Zakaj piščanec prečka cesto? Dvanajst predpostavk, ki opredeljujejo vpliv tehničnih podatkov na odločanje v realnem svetu«. Čeprav gre za predavatelja, ki je avtor številnih klasičnih hidrogeoloških študij predvsem s področja numeričnega modeliranja toka podzemne vode, je predavanje predstavljalo odstopanje od glavnega toka hidrogeologije, kljub temu vsebina za slednjo ni bila neaktualna. Predstavil je koncepte analize tveganja in kako jih uporabiti v hidrogeološki praksi. Zaključno plenarno predavanje je predstavil Garth van der Kamp. Že naslov »Kako daleč smo prišli in kam potujemo?« je napeljeval na to, da se bo v predavanju lotil pregleda preteklih dosežkov, ki jih bo primerjal s sedanjim stanjem stroke.

Poleg teh predavanj sta bili predstavljeni še dve izredno zanimivi predavanji, ki ju je sponzorirala ameriška National Groundwater Association – NGWA. Prvo, tako imenovano McElhineyev predavanje, z naslovom »Ekonomska analiza življenjskega cikla vodnjakov – obravnava načrtovanja in izvedba« je predstavil Marvin F. Glotfelty. Predavatelj je najprej predstavil izhodišča za dimenzioniranje vodnjakov, nato je sledil prikaz analize življenjskega cikla vodnjakov, vse to pa je združil v ekonomsko analizo. Sklep predavanja je bil povsem pričakovan, gradnja premalo domišljenih in slabo izvedenih vodnjakov je gledano z daljšega časovnega vidika povsem neekonomična. Drugo, tako imenovano Dracyev predavanje, z naslovom »Transport virusov v delno nasičenih tleh in v podzemni vodi« je predstavil Majid Hassanizadeh. Čeprav je bilo predavanje po naslovu sodeč namenjeno predvsem virusom, pa je šlo preko tega, avtor je predstavil transport koloidov in ostalih delcev skozi porozni medij, kar je verjetno eno najbolj aktualnih področij raziskav v hidrogeologiji.

V okviru kongresa so bili izdani tudi povzetki in daljši članki, ki so prosto dostopni tudi na domači strani kongresa (<http://www.xcdtech.com/iah2012/iah2012/index.html>).

6. Hidrogeološki kolokvij

Ljubljana, 22. 11. 2012

Mihael BRENČIČ^{1,2}

¹Oddelek za geologijo, NTF, UL, Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana; e-mail: mihael.brencic@ntf.uni-lj.si

²Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana

Tako kot že nekaj let zapored, je bil tudi v letu 2012 organiziran Hidrogeološki kolokvij. Oddelek za geologijo na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani je skupaj s Slovenskim komitejem mednarodnega združenja hidrogeologov – SKIAH povabil predavatelje, ki se pri svojem znanstveno raziskovalnem delu doma in v tujini ukvarjajo s problematiko hidrogeologije. Dogodka se je udeležilo okoli šestdeset poslušalcev, med

katerimi so bili z udeležbo lepo zastopani študentje različnih letnikov študija geologije.

V prvem predavanju z naslovom »Hidrogeološka analiza odnosa med plitvim in globokim vodonosnikom na območju Radencev« je **Janja Verzel** predstavila rezultate svojega diplomskega dela. Svoje delo je utemeljila na analizi arhivskih podatkov družbe Radenska, ki na širšem območju Radencev že dolgo vrsto let izkorišča

mineralne vode. Predavateljica se je v svoji analizi osredotočila predvsem na kemijsko stanje podzemnih vod iz vrtin, ki zajemajo vodo na različnih globinah. Na podlagi pregleda in primerjave teh analiz je potrdila nekatera dosedanja dognanja o hidrogeoloških razmerah na tem območju. Prav tako pa se je dokopala do novih spoznanj. Pokazala je, da imamo opraviti z dvema tipoma globljih vod in da pri dvigu teh voda na površino igrajo pomembno vlogo prelomi. Hkrati s tem je dokazala obstoj plitvega in globokega vodonosnika, ki se med seboj mešata ter potrdila obstoj Radenskega preloma.

Drugo predavanje z naslovom »Prilagoditev oskrbe s pitno vodo v Ljubljani podnebnim spremembam in rabi prostora« so pripravile soavtorice **Branka Bračič Železnik, Barbara Čenčur Curk in Petra Souvent**. V predavanju so avtorice predstavile rezultate evropskega projekta, ki je potekal v okviru transnacionalnega regionalnega sodelovanja za Jugovzhodno Evropo, v projektu pa je sodelovalo 18 partnerjev iz 9 držav. Projekt je bil posvečen vplivu sprememb klime na vire pitne vode, potekal pa je tako, da so projektni partnerji obdelali primere relevantnih vodnih virov na območju držav iz katerih prihajajo. Predavateljice so predstavile raziskave vpliva morebitnih klimatskih sprememb na vire pitne vode Ljubljanskega vodovoda. V prvem delu predavanja so nanizale rezultate klimatskih analiz in napovedi obnašanja klime na območju Slovenije v prihodnosti. Te napovedi so bile izhodišče za modelne napovedi vplivov na vodni krog, katerih robni pogoj predstavlja klima. Tako so prikazale analizo vplivov klime na pretoke in režim reke Save, ki predstavlja glavni hidravlični robni pogoj vodonosnika Ljubljanskega polja ter vpliv sprememb klime na dinamiko in zaloge podzemne vode. Rezultati hidravličnih modelov so bili izhodišče za napovedi vplivov na količine pitne vode in oceno vplivov na kemijsko stanje podzemne vode. Podane analize so prikazale, da bodo napovedane klimatske spremembe vplivale na količino vode

tako v površinskih vodotokih, kot tudi v podzemni vodi, vendar pa zaradi izjemnih lastnosti vodonosnika Ljubljanskega polja ti vplivi ne bodo izraziti. Tako se Ljubljani ni bati za usodo svojega najpomembnejšega vodnega vira, vendar le, če ga bo znala obvarovati pred škodljivimi vplivi, vsaj tako uspešno, kot do sedaj.

Tako kot je že uveljavljena tradicija, je zadnje predavanje predstavil gost iz tujine. **Ladislav Holko**, ki deluje na Hidrološkem inštitutu Slovaške akademije znanosti, je predstavil predavanje z naslovom »Vpliv snega na vodni krog – primeri iz Slovaške«. V visokogorju in sredogorju sneg predstavlja pomembno komponento vodnega kroga, še zlasti je njegova prisotnost pomembna za napajane podzemne vode, saj zaradi svoje narave zadrži večje količine vode in podaljša infiltracijsko obdobje. V slovenski hidrogeološki praksi imamo, navkljub velikemu pomenu snega za napajanje naših vodonosnikov, na tem področju relativno pomanjkljive izkušnje, zato je bilo predavanje izkušenega raziskovalca s tega področja še kako dobrodošlo. V prvem delu svojega predavanja je predstavil pregled zgodovine raziskav snega na Slovaškem, pri tem pa ni šlo zgolj za nizanje zgodovinskih dejstev, temveč je vzporedno nanizal tudi značilnosti nekaterih metod za določitev značilnosti snega in njegovih vplivov na odtok in napajanje podzemne vode. Sledil je prikaz hidrologije snega z ilustracijo rezultatov v eksperimentalnem povodju. Za konec so bili predstavljeni še rezultati modeliranja snežne odeje s poudarkom na modeliranju deleža uskladiščene vode v snežni odeji.

Tudi tokrat so bila na hidrogeološkem kolokviju predstavljena zanimiva predavanja. Prav tako kot v preteklih letih je vsakemu od predavanj sledila intenzivna razprava, ki je še dodatno osvetlila podane informacije, hkrati s tem pa so se odprla še druga vprašanja, ki odpirajo nove poti raziskav. Čeprav udeležba na teh dogodkih ni slaba, pa na predavanjih še naprej pogrešamo večje število hidrogeologov, ki delujejo v praksi.



Predstavitve Društva študentov geologije

Eva MENCIN

Gotska 4, SI-1000 Ljubljana; e-mail: emencin@gmail.com

Društvo študentov geologije je samostojno, prostovoljno, nepridobitno združenje, ki je bilo ustanovljeno marca 2012 s sedežem na Privozu 11, 1000 Ljubljana. Društvo nadaljuje s poslanstvom in dejavnostmi *Organizacije študentov geologije*, ki je delovala v preteklih letih. Z nadaljevanjem izvajanja obštudijskih dejavnosti želimo dvigniti raven znanja študentov, vzpostaviti vezi med njimi in geološkimi strokovnjaki ter strokovnjaki drugih znanosti, ki so pomembne za geologijo. Poleg upravnega odbora (predsednica in blagajničarka Eva Mencin, podpredsednik Andrej Novak, tajnik Erazem Dolžan) v društvu aktivno sodelujejo tudi ostali študentje geologije.

Društvo študentov geologije je bilo ustanovljeno z namenom:

- medgeneracijskega povezovanja študentov ter ljubiteljev geologije;
- povezovanja in sodelovanja s strokovnjaki geologije in sorodnih strok;
- organizacije geološkega tabora Geotabor, ki je namenjen vsem, ki jih zanima geologija;
- sodelovanja pri organizaciji Geološko-geografsko-krajinarskega tabora, ki povezuje stroke treh različnih fakultet;
- organizacije strokovnih ekskurzij v Sloveniji in tujini;

- organizacije izobraževalnih delavnic, okroglih miz in predavanj;
- sodelovanja z javnimi in zasebnimi ustanovami, organizacijami ter društvi.

V društvo se lahko včlanijo študentje geologije in sorodnih strok, strokovnjaki, raziskovalci ter ljubitelji stroke ob predložitvi pristopne izjave in plačane članarine, ki znaša 10 EUR na leto. Društvo obvešča člane prek sestankov, elektronske pošte, plakatov in objav v sredstvih javnega obveščanja, na spletni strani in prek poročil ter zapisnikov organov društva.

Od ustanovitve so bile izvedene sledeče dejavnosti:

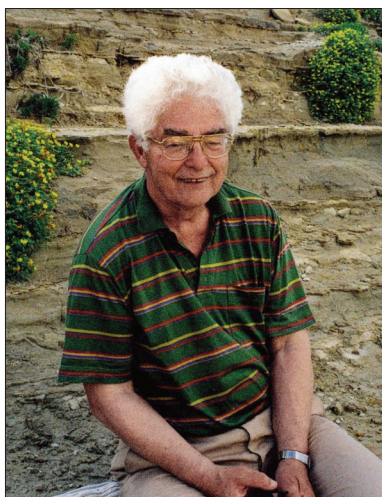
1. Ekskurzija na Kras dne 30. 3. 2012, pod vodstvom dr. Bogdana Jurkovška in dr. Tee Kolar-Jurkovšek.
2. Geološko-geografsko-krajinarski tabor od 26. do 29. 4. 2012, v Kočevju pod vodstvom dr. Franceta Šuštaršiča, dr. Blaža Repeta, dr. Andreja Bončine ter dr. Marka Dobričloviča.
3. Poučna geo-delavnica za otroke, Skačem po kamnih, čofotam po lužah dne 15. 5. 2012 v Črni na Koroškem, v okviru tedna Geoparka Karavanke.
4. 16. Geotabor od 9. 7. do 15. 7. 2012, v slovenski Istri pod vodstvom Dejana Puterleta, mag. Andreja Lapanja, dr. Bojana Otoničarja, Andreja Štimulaka, Tomislava Popita, dr. Ladislava Placerja, dr. Luke Galeta in mag. Matije Križnarja.
5. Ekskurzija v Severno-Apneniške Alpe od 20. 7. do 22. 7. 2012, pod vodstvom dr. Luke Galeta in dr. Hans-Jürgen Gawlicka.
6. Ekskurzija v Idrijo od 19. 10. do 20. 10. 2012 pod vodstvom dr. Jožeta Čarja.
7. Organiziran prevoz na sejem fosilov in mineralov v Münchnu dne 28. 10. 2012.

Za leto 2013 so predvidene sledeče dejavnosti:

1. Spoznavna ekskurzija za prve letnike geologije na izvir mineralne vode Vrčica, in kamnolom Brezovica (organizator: Erazem Dolžan)
2. Delavnica pisanja strokovnih člankov (organizator: dr. Luka Gale)
3. Geoavantura v Podzemlje Pece (organizatorja: Špela Kozole in Jan Udovč)
4. Geološko-geografsko-krajinarski tabor (organizator: Rok Brajkovič)
5. Geotabor na Goričkem (organizatorji: Tim Cifer, Nina Caf in Eva Mencin)
6. Tabor v tujini, Češka (organizator: Blaž Vičič)
7. Ekskurzija v Istro (organizator: Ana Trobec)
8. Ekskurzija v rudnik Bor, Srbija (organizator: Klemen Čerňič)
9. Predavanje Kevina Alexandra, glavnega geologa v rudarski družbi Balamara Resources Limited (AUS) o nikljevih lateritih in sodobnih izzivih v rudarjenju. Dotaknil se bo tudi projekta v Črni gori in na Poljskem.
10. Predavanje Klemna Čerňiča o delu geologa pri odpiranju rudnika (začetne raziskave) iz dosedanjih izkušenj z obrazložitvijo poteka vrtanja (wire line).
11. Predavanje Špele Preradovič Hlede, kako in zakaj iti na mednarodno izmenjavo – izkušnje iz študentske izmenjave v ZDA.

V času od ustanovitve si je društvo pridobilo precejšnje število članov in podpornikov. Cilj je, da se društvo zanesljivo uveljavi, zato pozivam študente in strokovnjake k včlanitvi in aktivnem sodelovanju. Zahvalila bi se rada vsem mentorjem, ki so poskrbeli za visok strokovni nivo do sedaj izvedenih projektov Društva študentov geologije ter seveda donatorjem, ki so omogočili kakovostno izvedbo le-teh. To so Geološki zavod Slovenije, Študentski svet NTF in ŠOU v Ljubljani.

V spomin prof. dr. Dušanu Kuščerju



Dne 4. 10. 2012 se je v 93. letu starosti od nas tiho poslovil prof. dr. Dušan Kuščer, pedagog, raziskovalec, občudovalec narave in prijatelj v najširšem pomenu besede. Rodil se je 24. marca 1920 v Brežicah. V Ljubljani je obiskoval realko, ki jo je leta 1938 zaključil z maturo. Jeseni istega leta se je vpisal na Filozofsko fakulteto Univerze v Ljubljani in se posvetil študiju mineralogije in geologije. Diplomiral je februarja leta 1943. Doktorat z naslovom »Stratigrafija in tektonika zagorskega terciarja« pod mentorstvom akademika profesorja Ivana Rakovca je zagovarjal leta 1968.

Po koncu druge svetovne vojne se je leta 1945 kot geolog zaposlil na Ministrstvu za gradnje LRS. Februarja leta 1947 se je zaposlil kot asistent na Inštitutu za mineralogijo, petrografijo in geologijo, ki je takrat deloval pod okriljem Oddelka za rudarstvo in metalurgijo Tehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Septembra leta 1952 je bil imenovan za docenta. Za izrednega profesorja je bil izvoljen leta 1965 in za rednega profesorja leta 1976. Kot pedagog se je upokojil leta 1983, kot recenzent, svetovalec in aktiven raziskovalec pa je nato s stroko sodeloval še dolgo vrsto let.

Pedagoško udejstvovanje profesor Kuščerja je bilo zelo široko. Na Univerzi v Ljubljani je sprva predaval predmet Geologija premoga in nafte, nato pa je prevzel še predmet Splošna geologija. Kmalu za tem je pričel predavati tudi druge predmete in s tem v slovensko geološko stroko uvajati nova področja in nova znanja. Tako med njegove ključne predmete sodijo inženirska geologija, hidrogeologija in tektonika, na področje katerih sodijo tudi njegovi najpomembnejši strokovni ter znanstveni dosežki. Poleg teh predmetov je predaval tudi predmete Mikroskopija premoga, Geološko kartiranje in Petrografija sedimentov. Hkrati s predavanji za geologe, je veliko svoje energije posvečal tudi predavanjem za gradbenike in arhitekte, ki jim je podajal snov s področja splošne geologije s poudarkom na inženirski geologiji ter predavanjem za rudarje, ki jim je predaval predmet Splošna geologija. Bil je pristaš tiste univerzitetne tradicije, po kateri profesor ni dolžan odpredavati vsake pike in vejice, pač pa dovolj obširno in razumljivo pojasniti predvsem tisto, za kar meni, da je za stroko pomembno ter hkrati – po njegovih izkušnjah – študentom najtežje dojemljivo. In seveda vse tisto, česar ne najdeš v študentom dosegljivih šolskih knjigah, saj je novo. Pri tem ga ni bilo strah povedati, da za nekatera vprašanja še ni enoznačnih odgovorov. Naj je šlo za geološko kartiranje, fotogeologijo, tektoniko, inženirsko geologijo ali hidrogeologijo, povsod je pri razlagi geoloških procesov in izvedbenih postopkov izhajal iz matematično-fizikalnih osnov in jo nadgradil s svojimi bogatimi praktičnimi terenskimi izkušnjami. Prav zaradi teh izkušenj se je zavedal, da ni dovolj le naučenost, pač pa uporabno znanje.

Bil je mentor 44 diplomantom, dvema magistrskima nalogama ter trem doktorskim disertacijam. Njegovi učenci so nadaljevali njegovo delo in razvili inženirsko geologijo, hidrogeologijo in tektoniko v temeljne geološke vede, ki danes predstavljajo podlago pomembnih gospodarskih panog.

Širina njegovega pedagoškega in znanstvenega raziskovalnega ter strokovnega dela je temeljila na njegovi prirojeni radovednosti, že v srednješolskih letih se je zapisal raziskovanju narave, tako vodnemu svetu kot tudi krasu. Pred drugo svetovno vojno sta se s starejšim bratom Ivanom lotila potapljaških raziskav, tako v morju, kot tudi v iztočnih sifonih velikih kraških izvirov. Tako sta se z bratom zapisala ne samo med pionirje slovenskega potapljaštva, temveč sta orala ledino v jamarskem potapljanju tudi v svetovnem merilu. Poleg tega se uvrščata tudi med pionirje podvodne fotografije. Pomanjkanje opreme sta nadomestila z iznajdljivostjo in veliko mero poguma ter drznosti. Njuni pionirski koraki veljajo danes med potapljači in jamarji za legendarne in ob marsikaterem njunem takratnem dosežku, se danes kar zdrzneš. Pustolovska žilica ju je pripeljala tudi v poklicnem življenju v naravoslovje in kasneje na Univerzo v Ljubljani, kjer sta se oba uveljavila kot univerzitetna profesorja. Profesor Dušan Kuščer je že zgodaj napisal nekaj krajših člankov o krasu in nekaterih kraških jamah, ki jih je objavil v reviji Proteus. Skupaj z bratom sta na podlagi proučevanja podvodnih kraških izvirov v Jadranskem morju v zakladnico svetovne hidrogeologije in teoretske fizike prispevala pomemben korak k razumevanju mehanizma in pogojev nastopanja takih izvirov, o čemer sta poročala tako v domačih revijah, kot tudi na mednarodnih geoloških kongresih.

Na svoji strokovni poti se je sprva ukvarjal s petrologijo magmatskih in sedimentnih kamnin, nato pa je kmalu posegel tudi na druga področja. Kot mlad geolog, ki je bil v letih obnove po drugi svetovni vojni zaposlen na ministrstvu za gradnjo, se je soočil s številnimi inženirsko geološkimi problemi

pri načrtovanju, gradnji ter sanaciji hidroelektrarn. Še danes so pomembni njegovi dosežki na širšem območju hidroelektrarne Moste pri Žirovnici. Sledila so dela za številne druge hidroelektrarne, med katere sodi elektrarna Medvode, elektrarne na reki Soči in na njenih pritokih ter hidroelektrarne v Črni gori. Že na začetku svoje kariere se je pričel ukvarjati tudi s problemi gradnje cest in železnic ter problemi hribinskih in zemljinskih plazov. Med zelo pomembna torišča njegovega dela sodijo tudi raziskave Zagorskega terciarja, o čemer je poleg praktično naravnanih elaboratov napisal tudi več pomembnih znanstvenih člankov. Te raziskave so bile tudi izhodišče za njegovo delo na področju rudniških vod, kjer je dosegel veliko mednarodno odmevnost. V letih 1968 do 1971 je sodeloval kot svetovalec pri geološkem kartiranju Alžirije, katerega rezultat je bilo nekaj pomembnih elaboratov in raziskav.

Izkušnje na področju hidrogeologije in inženirske geologije so ga usmerile tudi na področje tektonike ali boljše strukturne geologije, kjer je profesor Kuščer pri nas oral ledino. Študentom je podal teoretske osnove deformacij kamnin ter metod terenske in kabinetne obdelave. Njegov članek »O vrednosti nekaterih strukturnih analiz« (Geologija 8, 1965) predstavlja formalen in kritičen vstop slovenske geologije na področje z dokazi podprte strukturne interpretacije.

Za svoje znanstveno raziskovalno in strokovno delo je prejel tudi nekaj pomembnih nagrad. Že kot študent je leta 1940 prejel Svetosavsko nagrado za svojo razpravo »Razmerje med optičnimi konstantami in kemičnim sestavom mineralov cojzito-epidotove skupine in karakteristika zastopnikov skupine iz mej Jugoslavije.« V letu 1968 je prejel nagrado Sklada Borisa Kidriča za razpravo z naslovom »Zagorski terciar«. Leta 1980 je bil odlikovan z redom zaslug za narod s srebrnimi žarki. Leta 1998 je bil izvoljen za častnega člana Slovenskega komiteja mednarodnega združenja hidrogeologov.

Profesor Kuščer je bil odličen človek in pedagog, priljubljen in vedno pripravljen za prijazen pogovor. Pri njegovem delu ga je vodil metodični dvom, na podlagi česar je vsako trditev podvrgel natančnemu premisleku. Do sebe in drugih je bil strokovno in znanstveno kritičen, kar ga je pripeljalo do pomembnih dosežkov, ki bodo v zgodovini slovenske geologije ostali zapisani; kakor bo ostal trajen tudi njegov prispevek k razvoju slovenske geološke šole.

*Mihael Brenčič
Ladislav Placer
Miran Veselič*

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 druge objave prispevka z isto vsebino.

Jezik: Članki naj bodo napisani v angleškem, izjemo ma v slovenskem jeziku, vsi pa morajo imeti slovenski in angleški izveček. 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)
- Izveček (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, Lj. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote – Kredne in paleogene 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 (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) z 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. Tabele 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 ali 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 (Introduction, Methods, Results, And Discussion).

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.

JURKOVSEK, 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 zvezek 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 (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

- 161 Brenčič, M.
Uvodnik
- 163 Ambrožič, B., Šturm, S., Jeršek, M. & Mirtič, B.
Klasifikacija kamnitih meteoritov in hondrul – primer meteorita Jesenice
- 181 Dozet, S. & Ogorelec, B.
Younger Paleozoic, Mesozoic and Tertiary oolitic and oncolitic beds in Slovenia – An Overview
- 209 Nádor, A., Lapanje, A., Tóth, G., Rman, N., Szőcs, T., Prestor, J., Uhrin, A., Rajver, D., Fodor, L., Muráti, J. & Székely, E.
Transboundary geothermal resources of the Mura-Zala basin: a need for joint thermal aquifer management of Slovenia and Hungary
- 225 Rman, N., Lapanje, A. & Rajver, D.
Analiza uporabe termalne vode v severovzhodni Sloveniji
- 243 Koroša, A. & Mali, N.
Pregled novih organskih onesnaževal v podzemni vodi v Sloveniji
- 263 Mikuž, V. & Bartol, M.
A new cephalopod find in the Eocene beds near Grdoselo in Istria, Croatia
- 271 Mikuž, V., Bartol, M. & Ulaga, Š.
Ramenonožec *Lingula* iz srednjemiocenskih – badenijskih plasti Slovenije
- 275 Jeršek, M. & Milič, Z.
Feromangan – izvrstna imitacija kovinskega meteorita