

GEOLOGIJA

2016 | št.: **59/2**



ISSN

Tiskana izdaja / Print edition: 0016-7789

Spletna izdaja / Online edition: 1854-620X

GEOLOGIJA

59/2 – 2016

Shaping the future
with the past
70
years



GeoZS
Geološki zavod
Slovenije

GEOLOGIJA	2016	59/2	125-308	Ljubljana
------------------	-------------	-------------	----------------	------------------



Izdajatelj: Geološki zavod Slovenije, zanj direktor MILOŠ BAVEC
Publisher: Geological Survey of Slovenia, represented by Director MILOŠ BAVEC
Financirata Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Geološki zavod Slovenije
Financed by the Slovenian Research Agency and the Geological Survey of Slovenia

Vsebina številke 59/2 je bila sprejeta na seji Uredniškega odbora, dne 20. 12. 2016.
Manuscripts of the Volume 59/2 accepted by Editorial and Scientific Advisory Board on December 20, 2016.

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
MILOŠ BAVEC
Geološki zavod Slovenije, Ljubljana
MIHAEL BRENCIČ
Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani
GIOVANNI B. CARULLI
Dip. di Sci. Geol., Amb. e Marine, Università di Trieste
KATICA DROBNE
Znanstvenoraziskovalni 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
Poslovno svetovanje s.p., Ljubljana

HARALD LOBITZER
Geologische Bundesanstalt, Wien
MILOŠ MILER
Geološki zavod Slovenije, Ljubljana
RINALDO NICOLICH
University of Trieste, Dip. di Ingegneria Civile, Italy
SIMON PIRC
Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani
MIHAEL RIBIČIČ
Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani
MILAN SUDAR
Faculty of Mining and Geology, Belgrade
SAŠO ŠTURM
Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana
DRAGICA TURNŠEK
Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana
MIRAN VESELIČ
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 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.



Izjava o etičnosti

Izdajatelj revije Geologija se zavedamo dejstva, da so se z naglim naraščanjem števila objav v svetovni znanstveni literaturi razmahnili tudi poskusi plagiatorstva, zlorab in prevar. Menimo, da je naša naloga, da se po svojih močeh borimo proti tem pojavom, zato v celoti sledimo etičnim smernicam in standardom, ki jih je razvil odbor [COPE](#) (Committee for Publication Ethics).

Publication Ethics Statement

As the publisher of Geologija, we are aware of the fact that with growing number of published titles also the problem of plagiarism, fraud and misconduct is becoming more severe in scientific publishing. We have, therefore, committed to support ethical publication and have fully endorsed the guidelines and standards developed by [COPE](#) (Committee on Publication Ethics).

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

Cena / Price

Posamezni izvod / Single Issue	Letna naročnina / Annual Subscription
Posameznik / Individual: 15 €	Posameznik / Individual: 25 €
Institucija / Institutional: 25 €	Institucija / Institutional: 40 €

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

Slika na naslovni strani: Izhajanje plina v mofeti Rihtarovci je opazno, kadar so brazde zapolnjene z deževnico. (GABOR & RMAN, članek v tej številki, foto: N. Rman)

Cover page: Gas flux at the mofette Rihtarovci is visible when furrows are filled with rainwater. (GABOR & RMAN, paper in this issue, photo: N. Rman)

VSEBINA – CONTENTS

<i>Poljak, M., Mikuž, V., Trajanova, M., Hajek-Tadesse, V., Miknić, M., Jurkovšek, B. & Šoster, A.</i> Badenijske in sarmatijske plasti v gradbeni jami za hidroelektrarno Brežice Badenian and Sarmatian beds in excavation pit for the hydroelectric power plant Brežice, Slovenia	129
<i>Gabor, L. & Rman, N.</i> Mofete v Slovenskih goricah Mofettes in Slovenske gorice, Slovenia	155
<i>Kanduč, T., Samardžija, Z., Mori, N., Jerebic, A., Levačič, I., Kračun, M., Robinson, J.A., Žigon, S., Blažeka, Ž. & Kocman, D.</i> Hydrogeochemical and isotopic characterization of Pesnica River, Slovenia Hidrogeokemične in izotopske značilnosti reke Pesnice	179
<i>Serianz, L.</i> Tri-dimensional Model of the Radovna Glacier from the Last Glacial Period..... Tridimenzionalni model Radovniškega ledenika iz zadnje poledenitve	193
<i>Andjelov, M., Frantar, P., Mikulič, Z., Pavlič, U., Savič, V., Souvent, P. & Uhan, J.</i> Ocena količinskega stanja podzemnih voda za Načrt upravljanja voda 2015-2021 v Slovenija ... Groundwater quantitative status assessment for River Basin Management Plan 2015-2021 in Slovenia	205
<i>Janža, M., Šram, D., Mezga, K., Andjelov, M. & Uhan, J.</i> Ocena potrebnih količin podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda The assessment of the required groundwater quantity for the conservation of ecosystems and the achievement of a good ecological status of surface waters	221
<i>Horvat, A.</i> <i>Distephanopsis concavus</i> Horvat: a revised silicoflagellate species from the Middle Miocene of the Central Paratethys Revizija srednjemiocenske silikoflagelatne vrste <i>Distephanopsis concavus</i> Horvat	233
<i>Žibret, L.</i> A contribution to better understanding of structural characteristics and tectonic phases of the Boč region, Periadriatic Fault Zone Prispevek k boljšemu razumevanju strukturnih značilnosti in tektonskih faz območja Boča v coni Periadriatskega preloma	243
<i>Jemec Auflič, M., Šinigoj, J., Krivic, M., Podboj, M., Peternel, T. & Komac, M.</i> Landslide prediction system for rainfall induced landslides in Slovenia (Masprem) Sistem opozarjanja na nevarnost proženja zemeljskih plazov v Sloveniji (Masprem)	259
<i>Mohorič, N., Grigillo, D., Jemec Auflič, M., Mikoš, M. & Celarc, B.</i> Longitudinal profiles of torrential channels in the Western Karavanke mountains Vzdolžni profili hudourniških strug v Zahodnih Karavankah	273
Nove knjige	
<i>Pirc, S.</i> Matevž Novak & Nina Rman (urednika), 2016: Geološki atlas Slovenije, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 204 str.	287

Poročila

<i>Rajver, D., Lapanje, A. & Janža, M.</i> : 5. Evropski geotermalni kongres v Strasbourgu (Francija) 19. – 23. september 2016	289
<i>Rman, N. & Žvab Rožič, P.</i> : Delavnica o popularizaciji geologije, 8. 12. 2016, Oddelek za geologijo, NTF.....	292

Nekrolog

<i>Zupančič, N.</i> V spomin akad. prof. dr. Mariu Pleničarju	294
Akad. prof. dr. Mario Pleničar - pomembnejša bibliografija	
<i>Car, M., Gosar, A., Rajver, D. & Stopar, R.</i> V spomin prof. dr. Danilu Ravniku	303
Prof. dr. Danilo Ravnik - pomembnejša bibliografija	
Navodila avtorjem.....	307
Instructions for authors	308



Badenijske in sarmatijske plasti v gradbeni jami za hidroelektrarno Brežice

Badenian and Sarmatian beds in excavation pit for the hydroelectric power plant Brežice, Slovenia

Marijan POLJAK¹, Vasja MIKUŽ², Mirka TRAJANOVA¹, Valentina HAJEK-TADESSE³, Mirjana MIKNIČ³, Bogdan JURKOVŠEK¹ & Aleš ŠOSTER⁴

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija;

e-mail: marijan.poljak@geo-zs.si, mirka.trajanova@geo-zs.si, bogdan.jurkovsek@geo-zs.si

²Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: vasja.mikuz@geo.ntf.uni-lj.si

³Hrvatski geološki institut, Sachsova 2, HR-10001 Zagreb, Hrvatska;

e-mail: tadesse@hgi-cgs.hr, mmiknic@gmail.com

⁴Dobrna 20, SI-3204 Dobrna, Slovenija; e-mail: geolog.bauci@gmail.com

Prejeto / Received 8. 7. 2016; Sprejeto / Accepted 2. 11. 2016, Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Ključne besede: foraminifere, ostrakodi, mehkužci, klastični sedimenti, badenij, sarmatij, Centralna Paratetida, HE Brežice

Key words: foraminifera, ostracoda, mollusca, clastic sediments, Badenian, Sarmatian, Central Paratethys, HPP Brežice, Slovenia

Izvleček

V prispevku so obravnavane geološke razmere v omejeno dostopnem delu gradbene jame za hidroelektrarno (HE) Brežice. Raziskovane so paleontološka vsebina in sedimentno-petrografske značilnosti posameznih kamnin. Neogenski del razkritega zaporedja plasti gradijo karbonatni melji in meljevci z vložki drobnnozrnatega karbonatnega in silikatnega peščenjaka ter debelozrnatega polimiktnega konglomerata. Na osnovi foraminifer, ostrakodov, mehkužcev in morskih sesalcev je ugotovljena zgornjebadenijska in spodnjėsarmatijska starost plasti. Razkrita je bila meja med badenijem in sarmatijem, ki jo označuje krajša prekinitev sedimentacije in sprememba okolja. Fosilne najdbe pričajo, da sta v sarmatiju nihali, generalno pa upadali slanost in globina sedimentacijskega bazena. Kvartarni del skladovnice v krovlini predstavljajo prodnati, peščeni in meljasti nanosi reke Save.

Abstract

Geological prospection of partly accessible constructional pit for the hydroelectric power plant (HPP) Brežice was performed. Paleontological content and sediment-petrographic characteristics of rocks were investigated. Neogene part of the succession consists of carbonate silt and siltstone with intercalations of carbonate and silicate sandstone, and polymict sandstone to conglomerate. Based on foraminifera, ostracods, molluscs and marine mammals, the Upper Badenian and Lower Sarmatian age of beds and boundary between them have been determined. The transition is characterized by a shorter break in sedimentation and environmental change. Fossil finds indicate that salinity and depth of sedimentary basin were oscillating in Sarmatian, but in general decreasing. Quaternary cover beds consist of gravelly, sandy and silty deposits of the Sava River.

Uvod

Krška kotlina je že desetletja predmet različnih geoloških raziskav. Najobsežnejše in najpopolnejše so bile povezane z načrtovanjem in izgradnjo Nuklearne elektrarne Krško, nato pa so se nadaljevale v sklopu izdelave geološke karte merila 1 : 25.000 (POLJAK, 2015). Ponovna priložnost za tridimenzionalni vpogled v geološko zgradbo

kotline se je ponudila v letih 2014 in 2015 ob izkopu gradbene jame za izgradnjo HE Brežice pri so-točju Save in Krke, ki meri približno 40.000 m² (sl. 1, 2). Na območju, ki je sicer pokrito z vegetacijo, debelo plastjo preperine in kvartarnimi peščeno prodnatimi nanosi, so bile razkrite debele plasti miocenskih klastičnih kamnin. Stratigrafski odsek meje med badenijem in sarmatijem v razponu nekaj deset metrov je analiziran paleontološko in

sedimentno-petrografske. Koncem leta 2014 sta Aleš Šoster in Mihael Ravnjak v izkopu za HE Brežice v sarmatijskih plasteh našla več kostnih ostankov zobatega kita iz skupine delfinov, ki so jih predstavili MIKUŽ in sodelavci (2015).

Članek predstavlja rezultate razmeroma hitrega dokumentiranja geoloških razmer v izkopu za HE Brežice v času, ko so se ta že bližala zaključni fazi. Avtorji smo želeli podati informacijo o velikem posegu v prostor, pri katerem nekatere ključne veje temeljne geologije (biostratigrafija, sedimentologija itd.) niso bile predhodno načrtovane. Žal je podobnih primerov ob velikih gradbenih posegih v Sloveniji vse več, temeljne geološke raziskave pa ostajajo v domeni dobre volje raziskovalcev, še večkrat pa so prepuščene zbiralcem fosilov in ljubiteljskim geologom. S tem se, poleg dragocenih geoloških podatkov, izgublja tudi pomemben del naravne dediščine. Avtorji želimo opozoriti, da bi morala postati vsestranska podrobna geološka spremljava vsaj nekaterih večjih posegov v prostor, kar izkop gradbene jame za HE Brežice nedvomno je, samoumevna ter organizacijsko, finančno in zakonsko že predhodno urejena v »Geološkem zakonu«.

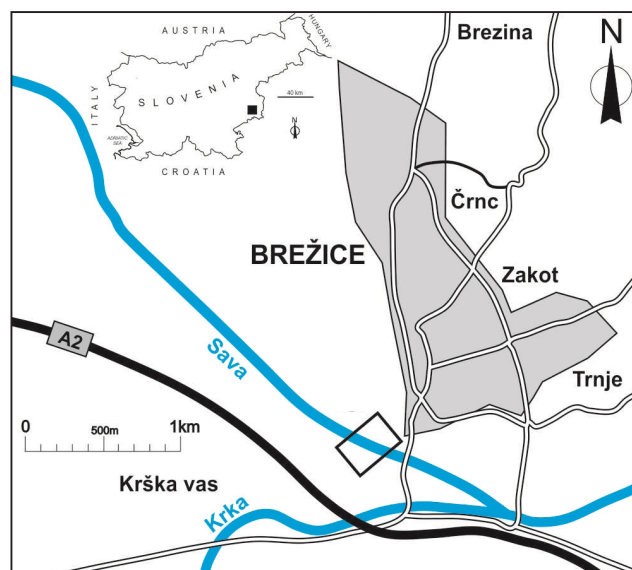
Geografski položaj

Gradbena jama za HE Brežice leži v južnem delu Krške kotline zahodno od sotočja Save in Krke (sl. 1). V geomorfološkem in geološkem smislu pripada to območje široki holocenski dolini reke Save. Njen tok je v subrecentnem in recentnem času meandriral in se prepletal. Dolina je zapolnjena z mešanim karbonatno-silikatnim prodrom in peskom, ki je mestoma pokrit z recentnimi poplavnimi nanosi. Slednji so prav tako sestavljeni iz silikatno-karbonatnega peska in melja. Debelina celotne holocenske skladovnice znaša v gradbeni jami največ 9 metrov.

Gradbena jama je izkopana v recentno, predhodno regulirano Savino korito. Pred začetkom del je bil rečni tok preusmerjen v umetni rokav, izkopan na južnem bregu reke. Po zaključenem izgradnji hidroelektrarne bo tok Save povrnjen v prvotno korito.

Metode raziskav

Prikazani rezultati so dobljeni na osnovi terenskih raziskav gradbene jame in laboratorijskih preiskav, izvedenih na vzorcih iz različnih



Sl. 1. Geografski položaj objekta HE Brežice (očrtan s pravokotnikom).

Fig. 1. Geographical position of HPP Brežice (marked with rectangle).

litostratigrafskih nivojev. Opravljene so makro in mikropaleontološke analize fosilnega gradiva ter sedimentno-petrografske analize kamninskih razlikov, katerih barva je bila določena z barvno skalo za kamnine (Rock Color Chart). Sedimentno-petrografske preiskave obsegajo določitev strukture in sestave badenijskih lapornatih plasti, kompleksometrijsko vsebnost karbonatov v njih ter sedimentno-petrografske analize debeložrnatih peščenih in konglomeratnih vložkov.

Stratigrafski odsek meje med badenijem in sarmatijem je preiskan sedimentno-petrografske in paleontološko. Makrofavna je analizirana na samem prehodu iz badenija v sarmatij, mikrofavna pa le primerjalno in sicer iz badenijskih plasti nekaj deset metrov pod litostratigrafsko mejo ter iz sarmatijskih plasti nekaj metrov nad mejo (sl. 2, 3b). Raziskanih je bilo tudi 137 makrofosilov. Vsi so bili najdeni leta 2014 v kamninah razkritih v gradbeni jami za HE Brežice.

Rezultati in interpretacija

Badenijske in sarmatijske plasti Krške kotline

Krška kotlina je del Panonskega bazena, ki pripada Centralni Paratetidi. Paleogenske in neogenske bazene Centralne Paratetide v Sloveniji so v novjšem času obravnavali številni avtorji med katerimi omenjamo JELEN-a in sodelavcev (2008). Pregled raziskav z obsežno literaturo so



Sl. 2. Gradbena jama za hidroelektrarno Brežice v letu 2014.

Fig. 2. Excavation pit for HPP Brežice in the year 2014.

podali DROBNE in sod. (2009), PAVŠIČ in HORVAT (2009) ter MARKIČ (2009). Transgresija Centralne Paratetide na jugozahodni rob Panonskega bazena se je začela v spodnjem badeniju (ĆORIĆ et al. 2009). Morska in brakična sedimentacija se je na raziskanem ozemlju nadaljevala do konca sarmatija, ko se je formiralo Panonsko jezero *sensu stricto*.

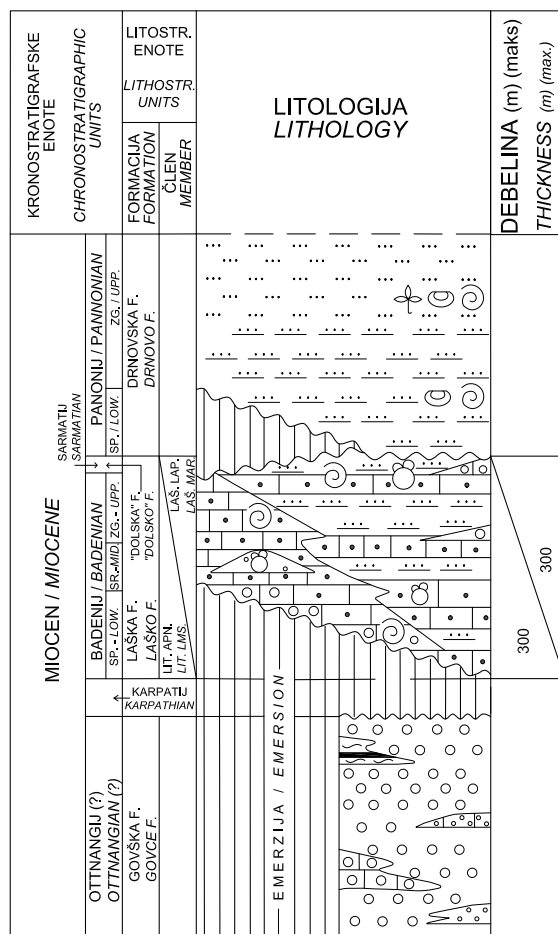
Badenijske plasti so na širšem območju Krške kotline razvite v dveh faciesih in sicer v faciesu t.i. *litotamnijskega apnenca* in *laškega laporja* (sl. 3a). Litotamnijski apnenec leži praviloma v spodnjem delu badenijske skladovnice in predstavlja prvi neogenski morski litostratigrafski člen, ki leži neposredno na starejših paleozojsko-mezozojskih in/ali na terestričnih otnangijskih plasteh. V njegovi bazi je ponekod debelozrnat polimiktni (bazalni) konglomerat debel do nekaj metrov. Navzgor sledijo različne vrste svetlo rjavega do rumenega bolj ali manj sprijetega kalkarenita in kalcirudita do biokalkarenita in biokalcirudita. Kamnina je masivna do debelo plastnata. Nad njimi leži plastnat lapor do laporovec (sedimentono-petrografske karbonatni meljevec do peščenjak) s pogostim menjavanjem dobro in slabo sprejetega meljevca ali peščenjaka. V tej sedimentni skladovnici se pojavljajo tudi nekaj metrov debele plasti ali leče polimiktnega proda in konglomerata. Tak je razvoj badenijskih plasti v osrednjem in zahodnem delu Krške kotline, v vzhodnem delu, v Bizeljskem gričevju pa litotamnijskega apnenca ni, ampak ga v celoti nadomeščata laporovec (kalcitno dolomitni meljevec) in peščenjak.

Sarmatijske plasti Krške kotline so bolj heterogene; sestoje iz biokalkarenita, karbonatnega meljevca in peščenjaka s plastmi in lečami polimiktnega konglomerata ter večjih leč čistega diatomita. Najpogostejše ležijo na badenijskih plasteh brez jasne litološke meje, ponekod pa sarmatijske plasti manjkajo v celoti in je panonij-ski laporovec odložen neposredno na badenijsko podlago. Pri tem ni vedno jasno, ali gre za stratigrafski ali erozijski hiatus.

V starejši geološki literaturi so badenijske plasti Posavskih gub opredeljevali kot laške plasti, ki so sestavljene iz litotamnijskega apnenca ali litavca v spodnjem in laškega laporja v zgornjem delu skladovnice (BITTNER, 1884; TELLER, 1907; KUŠČER, 1967). Po navedenih avtorjih so sarmatijske plasti bolj glinaste in peščene. KUŠČER (1967) navaja, da je meja med badenijem in sarmatijem morfološko ostro vidna le tam, kjer je na vrhu tortona zgornji litavski apnenec. V novjšem času so o badenijsko-sarmatijskih kamninah na območju Krške kotline pisali RIŽNAR in sodelavci (2002), HORVAT (2004), OTONIČAR in CIMERMAN (2006), in drugi. RIŽNAR in sodelavci. (2002) so plasti navedene starosti na severnem pobočju Gorjancev opredelili kot »Čateško formacijo«. Avtorji navajajo, da je erozijska diskordanca na meji med badenijem in sarmatijem pogojena z lokalno tektoniko in ima hiatus različno velik obseg. HORVAT (2004) je iz useka Dolenjske avtoceste pri Beli Cerкви opisal bogato makrofavno in makrofloro ter silikoflagelate in diatomeje iz stratigrafskega odseka zgornji badenij - spodnji sarmatij. OTONIČAR in CIMERMAN (2006) sta iz useka avtoceste pri Čatežu ob Savi prav tako

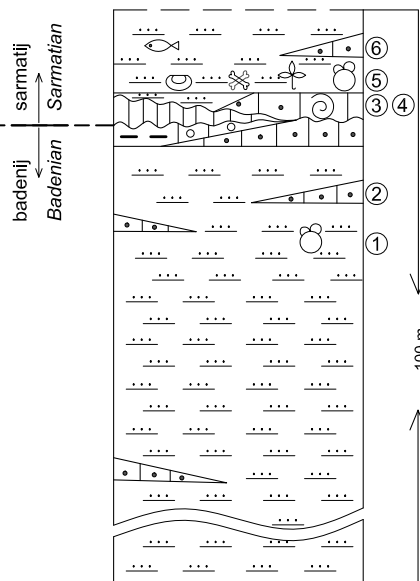
3a

Krška kotlina / Krško basin

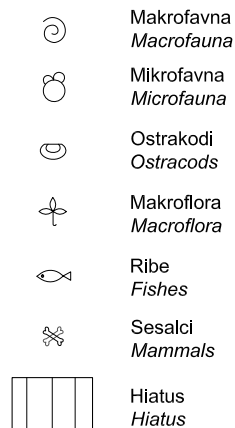
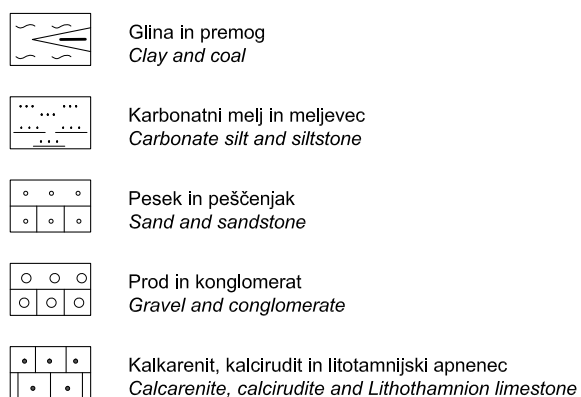


3b

HE Brežice / HPP Brežice



LEGENDA / LEGEND



Sl. 3a. Geološki stolpec Krške kotline.
Fig. 3a. Geological column of the Krško basin.

Sl. 3b. Geološki stolpec raziskovanih plasti v izkopu za HE Brežice.
Fig. 3b. Geological column of investigated beds in the excavation pit for the HPP Brežice.

določila paleogeografsko sedimentacijsko okolje badenijskih in sarmatijskih plasti. Ugotovila sta, da so mikritni apnenci neposredno nad litotamnijskimi rodoidnimi apnenci še badenijske starosti, nekoliko višje ležeči laporasti apnenci z značilnostmi resedimentov pa spodnjesarmatijske starosti.

V okviru izdelave Geološke karte Krške kotline 1:25.000 (POLJAK, 2015) je bila v badenijsko-sarmatijskih plasteh določena številna foraminiferna mikrofavna. Ugotovitve se ujemajo z rezultati podanimi na Osnovni geološki karti SFRJ 1:100.000, list Rogatec (ANIČIĆ & JURŠA, 1985a). Na njej so tako badenijske (originalno

tortonske), kot tudi sarmatijske plasti združene, ker zaradi enake litološke sestave delitev na terenu ni bila mogoča (ANIČIĆ & JURISA, 1985a; 1985b).

Na Geološki karti Krške kotline 1:25.000 (POLJAK, 2015) so badenijske in sarmatijske plasti združene v eno enoto, z dvema členoma (lito-tamnijski apnenec in laški lapor), in opredeljene kot Laška formacija po analogiji z zgoraj navedenimi laškimi plastmi v Posavskih gubah (KUŠČER, 1967). Talnino badenijskih plasti ponekod predstavljajo neogenske klastične kamnine sestavljene iz proda, peska, melja in gline s premogom. Na Osnovni geološki karti SFRJ 1:100.000, list Zagreb (ŠIKIĆ et al., 1978, 1979), so določene kot spodnjehelvetske, torej ottangijske, na Geološki karti Krške kotline 1:25.000 (POLJAK, 2015) pa so po govških plasteh v Posavskih gubah (KUŠČER, 1967) opredeljene kot Govška formacija, domnevno ottangijske starosti. Na badenijskih in sarmatijskih plasteh Laške formacije so odloženi t.i. panonijski laporji, ki po ostrakodni mikrofavni pripadajo spodnjemu in zgornjemu panoniju. Tudi med sarmatijskimi in panonijskimi plastmi je ponekod hiatus (najverjetneje stratigrafski), tako da so na sarmatijskih ali celo na badenijskih plasteh odloženi laporji spodnje ali zgornjepanonijske starosti.

Badenijske in sarmatijske plasti v gradbeni jami za HE Brežice

Gradbena jama za HE Brežice je globoka do 26 m in obsega približno 220 × 180 m veliko površino badenijskih in sarmatijskih sedimentnih kamnin. Stratigrafska debelina razkritih plasti znaša približno 100 metrov. Predstavljajo južno krilo Krške sinklinale in so nagnjene proti severu za 20 do 30° (sl. 2 in 4). Celotna skladovnica je sestavljena iz sivih plastovitih karbonatnih meljevcev (debelina plasti do 40 cm) z relativno pogostimi plastmi in lečami rumenih do svetlorjavih karbonatnih in kremenovih peščenjakov s kalcitnim cementom, ki prehajajo v drobno do debelozrnate polimiktne konglomerate. Prodniki v konglomeratu dosežejo velikost do 30 cm. Na stratigrafski meji med badenijem in sarmatijem se pojavljajo tudi tanke leče rjavega premoga debele 2 do 3 cm.

V plasteh badenijske in posebej sarmatijske starosti so relativno bogati ostanki moluskov (školjke in polži) ter makroflore. Redkeje najdemo ostanke rib, v glavnem njihovih drobnih

lusk in fragmentov drobnih kosti. V spodnjem delu sarmatijskih plasti, takoj nad stratigrafsko mejo z badenijskimi, je nekaj deset centimetrov debela plast s številnimi polži opisanimi v tem prispevku. Pogosti so listi raznorodne vegetacije. V celotnem zaporedju kamnin je obilna tudi mikrofavna, v kateri prevladujejo foraminifere. Meja badenij/sarmatij je diskordantna z jasnim paleoreliefom.

Sedimentno-petrografske značilnosti badenijskih in sarmatijskih plasti

Da bi lahko sklepali na izvor sedimentnega zasipa in deloma na sedimentacijsko okolje, smo določili sedimentno-petrografske značilnosti glavnih litoloških členov v odkopu. Prevladujočo litologijo badenijskih plasti predstavljajo zelo drobnozrnate sedimentne kamnine, terensko imenovane laporovci (največkrat pa samo laporji - vz. 1). Sestavljajo skladovnico z izrazitimi plastmi srednje sive barve (N 5) (sl. 4) in debele od 2 cm do okrog 40 cm (sl. 4). Debelejše plasti so pogosto laminirane, ponekod z vidno postopno zrnnavostjo (na sliki 4 rumenkastosivo (5 Y 8/1) zbledela plast pod kladivom).



Sl. 4. Plastovit badenijski lapornati meljevc in peščenjak iz izkopa za HE Brežice.

Fig. 4. Bedded Badenian marly siltstones and sandstone in the excavation pit for the HPP Brežice.

Lapornate plasti so diagenetsko malo spremenjene. V vodi posamezni deli zelo počasi razpadajo v židek sediment, tako da je za celoten paket ime lapor vsaj toliko upravičeno, kot laporovec. Granulometrijska sestava je pokazala zelo visok delež melja, kar 88 % in le okrog 10 % frakcije gline, zrnnavost pa je praktično v celoti manjša od 0,1 mm. Delež posameznih frakcij je prikazan v tabeli 1.

Tabela 1. Delež posameznih zrnastostnih frakcij v lapornatem meljevcu iz izkopa za HE Brežice.

Table 1. Content of grain size fractions in marly siltstone from the excavation pit for the HPP Brežice.

Frakcija (mm) Fraction (mm)	< 0,002	0,002-0,005	0,005-0,01	0,01-0,02	0,02-0,04	0,04-0,063	0,063-0,1	0,1-0,15
Delež (%) Content (%)	9,8	12,3	12,8	23,5	32,4	7,6	1,4	0,2

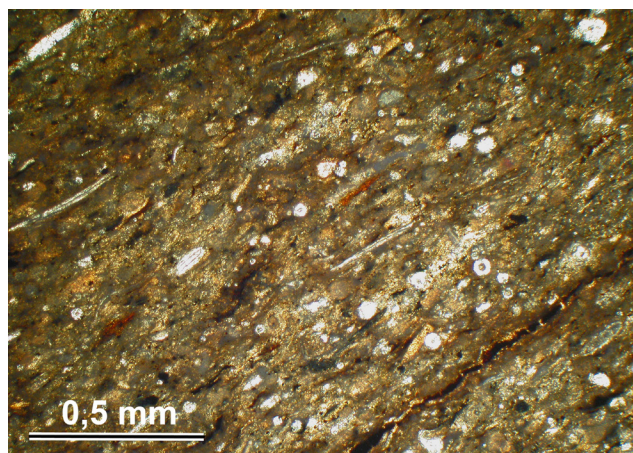
Tabela 2. Rezultati kompleksometrijske analize lapornatega meljevca iz izkopa za HE Brežice.

Table 2. Results of complexometric analysis of marly siltstone from the excavation pit for the HPP Brežice.

Komponenta Component	CaO	MgO	Kalcit Calcite	Dolomit Dolomite	Skupni karbonat Total carbonate	Netopni ostanek Insoluble residue
Vsebnost (%) Content (%)	29,2	0,8	50,1	3,6	53,7	46,3

Sedimentno-petrografsko pripadajo slabo sprijetemu lapornatemu meljevcu. Kompleksometrijska analiza značilnega vzorca je pokazala, da vsebujejo okrog 30 % CaO, pri čemer je okrog 0,8 % MgO in preko 46 % netopnega ostanka (tab. 2). Laporovec je torej sestavljen iz več kot 50 % kalcita, saj je nizka vsebnost MgO najverjetneje vezana predvsem na kalcit.

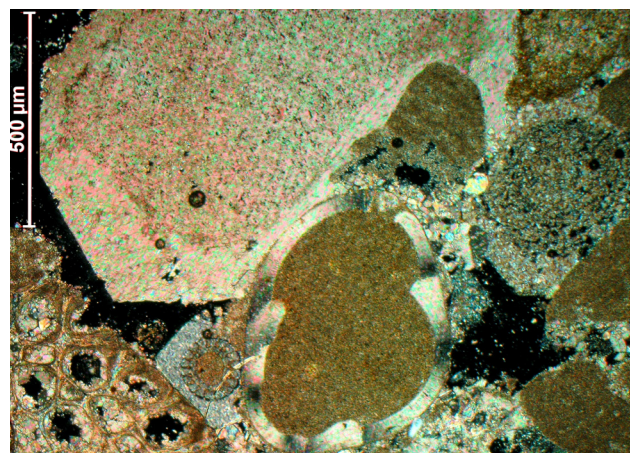
Tekstura lapornatega meljevca nakazuje usmerjenost po plastovitosti (ang. shally). Po-udarjajo jo predvsem zelo številne, planarno razporejene spikule spongij in drugih podolgovatih odlomkov fosilov in mineralov ter trakaste koncentracije organske snovi, ki jo pripisujemo predvsem kerogenu (sl. 5). V glineno karbonatni osnovi se nahajajo še meljasta do drobno peščena monokristalna zrna kalcita, kremenca, malo glinencev, klorita in sericita. Redke so foraminifere. Fosili v kamninah nakazujejo nekoliko globlje morsko okolje sedimentacije.



Sl. 5. Lapornat meljevec z usmerjeno teksturo, vidno po orientaciji številnih spikul spongijev s prednostno orientacijo. Vz. 1, vzporedna polarizatorja. Izkop za HE Brežice.

Fig. 5. Oriented structure of marly siltstone visible due to numerous spicules of sponges with preferred orientation. Samp. 1, parallel polarizers. Excavation pit for the HPP Brežice.

Iz zgornjega dela badenijskega zaporedja smo podrobneje določili sestavo leče drobnnozrnatega biokalcirudita do debelozrnatega biokalkarenita tipa grainstone (sl. 3, vz. 2). Prevladujoča zrna v sestavi kamnine so bioklasti, ki merijo do 4 mm in predstavljajo do okrog 70 % površine. Klasti so slabo sortirani, oglati in polzaobljeni. Med seboj se v glavnem dotikajo s točkastimi do tangencialnimi stiki. Alokemična zrna sestavljajo večinoma drobci koralinacejskih alg (litotamnij), pogoste so ploščice ehinodermov, redkejši pa odlomki moluskov in posamezne bentoške foraminifere. Zaslediti je tudi posamezne intraklaste mikritnega apnenca ter terigena zrnca monokristalnega kremenca, katerih skupna količina je ocenjena na približno 2 %. Zrna povezujejo mikrit, mikrosparit in sparit, katerih količina je ocenjena na največ 10 %. Kalcitni cement je dveh oblik: prva je porni z družimozaično strukturo, druga pa sparitni sintaksialni obrobni cement, ki pogosto raste na ploščicah iglokožcev (sl. 6). Mikrit



Sl. 6. Preseka foraminifere (desno) in bodice ježka (sredina) zapolnjena z mikritom. Zgoraj levo je ploščica iglokožca sintaksialno obraščena s kalcitom. Vz. 2, navzkrižna polarizatorja. Izkop za HE Brežice.

Fig. 6. Cross-section of foraminifera (right) and echinoid spine (middle) filled with micrite. At the top is echinoderm plate syntaxially overgrown with calcite. Samp. 2, crossed polarizers. Excavation pit for the HPP Brežice.

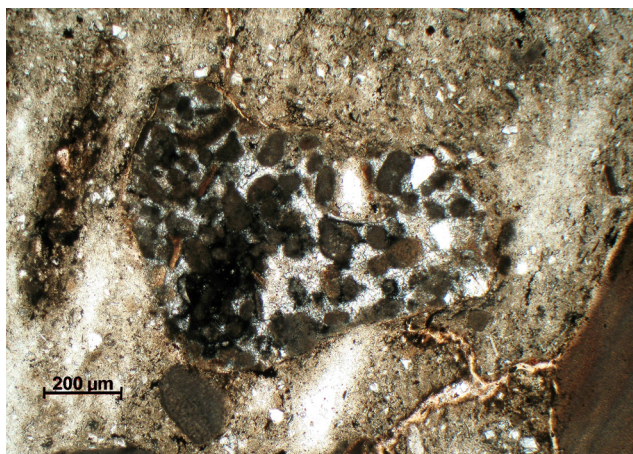
je ohranjen kot zapolnitve mikrofosilov (interni mikrit, sl. 6). Kamnina ima okrog 15 odstotno medzrnsko poroznost. Struktura biokalcirudita priča o višjeenergijskem okolju nastanka.

V spodnjem delu sarmatijskega sedimentnega zaporedja se nahaja nekaj decimetrov debela plast muljevca s prodniki (sl. 3, vz. 3), ki je odložen na badenijskih lapornatih meljevcih. Po razponu zrnivosti prodnikov in bioklastov ter mulja ustreza nekoliko prodnatemu karbonatnemu mulju do muljevca (sl. 7). Vsebuje številne naplavljenе lupine mehkužcev, rdečih alg-rodoidov in malo foraminifer. Redkejši so litoklasti (veliki do 2,5 cm) in intraklasti glinasto karbonatnega muljevca. Med litoklasti najdemo v sledovih močno izpran pelmikitni apnenec s posameznimi zrni kremenca (sl. 8).



Sl. 7. Muljavec s številnimi odlomki in skeleti mehkužcev in posameznimi litoklasti. Vz. 3, izkop za HE Brežice.

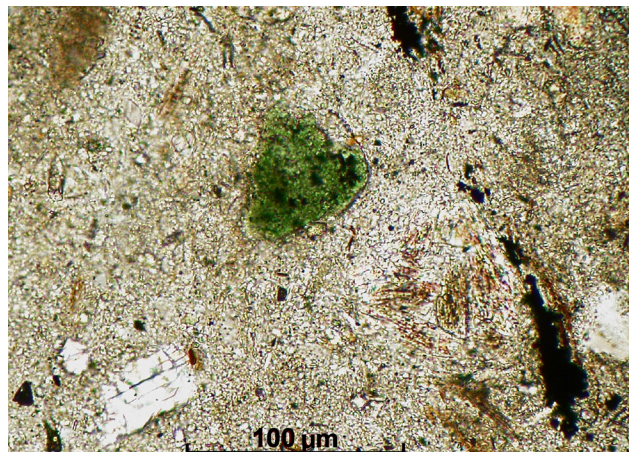
Fig. 7. Mudstone with numerous fragments and skeletons of molluscs, and some lithoclasts. Samp. 3, excavation pit for the HPP Brežice.



Sl. 8. Litoklast izpranega pelmikitnega apnenca v karbonatnem mulju. Vz. 3, vzporedna polarizatorja. Izkop za HE Brežice.

Fig. 8. Lithoclast of washed pelmikitic limestone in the carbonate mud. Samp. 3, parallel polarizers. Excavation pit for the HPP Brežice.

Klasti so podprti z muljasto osnovo, ki je sestavljena iz glinasto karbonatnega mulja z meljastimi do peščenimi zrni kremenca, kalcita, neprosojne organske snovi, sericita ter v sledovih glavkonita (sl. 9).

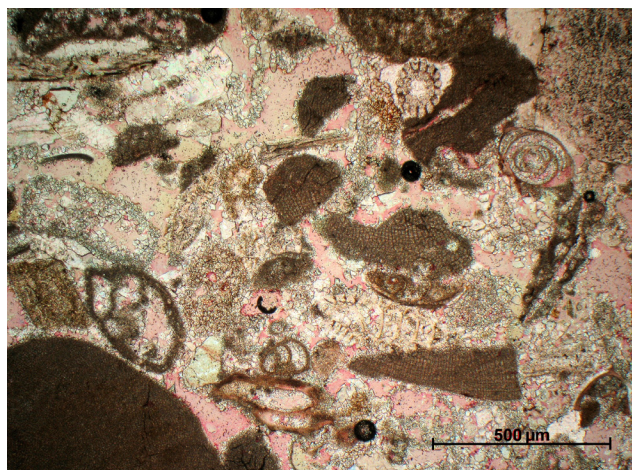


Sl. 9. Zaobljeno zrno glavkonita (zeleno) v meljasto glinasti osnovi. Belo zrno je kalcit. Vz. 3, vzporedni polarizatorji. Izkop za HE Brežice.

Fig. 9. Rounded glauconite grain (green) in the silty clayey matrix. White grain is calcite. Samp. 3, parallel polarizers. Excavation pit for the HPP Brežice.

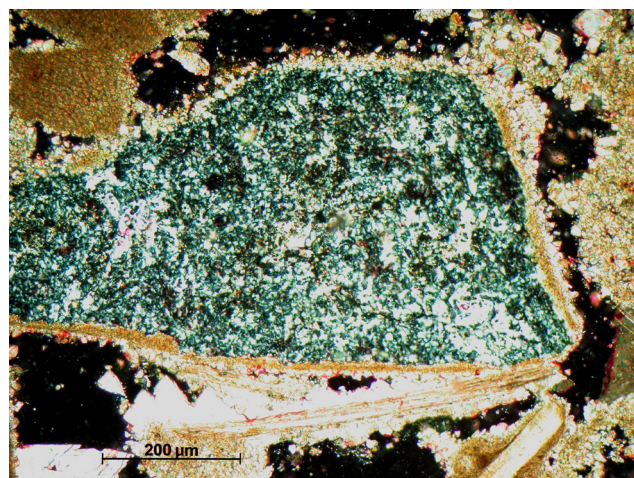
Heterogena zrnivost in sestava sedimenta bi lahko predstavljala rezultat mešanja alokemičnega materiala s terestričnim v plitvomorskem okolju. Posamezne leče drobnazrnatega biokalcirudita (sl. 3b, vz. 6), ki je zelo podoben vzorcu 2 iz zgornjega badenija, predstavljajo v okolju redke dogodke z višjo energijo. V obeh primerih se biokalcirudit nahaja znotraj karbonatnega meljevca. V sestavi kamnine so prevladujoča zrna bioklastov, ki predstavljajo okrog 65 %. Dosežejo velikost do 5 mm. Sediment je slabo sortiran. Zrna so srednje do dobro zaobljena in se med seboj točkasto dotikajo. Večina zrn pripada odlomkom koralinacejskih alg (litotamnij, sl. 10), ploščicam ehinodermov in briozojem. Redke so foraminifere in odlomki školjčnih lupinic. Terigenim zrnem pripada skupno okrog 3-4 %. To so roženci in posamezna zrna monokristalnega kremenca ter redka presedimentirana zrna biomikrita, ki vsebuje odlomke skeletnih alg, bodice ježkov in drobne lupinice ostrakodov.

Veziva je okoli 10 %. Pripada drobnazrnatemu sparitu (sl. 11) in sintaksialnemu obrobnemu cementu, ki nastopa ob ehinodermnih ploščicah (sl. 12). Muljasto vezivo je ohranjeno le še v zaščitnih porah. Kamnina ima okrog 20 % medzrnsko poroznost.



Sl. 10. Drobnozrnati biokalcirudit z odlomki skeletnih alg (motno rjave), redke foraminifere (na levi in desni), bodica ježka (zgoraj), neznatno cementirani z mikrosparitom. V desnem zgornjem kotu je ploščica iglokožca obraščena s sintaksialnim cementom. Pore so rožnato obarvane z alizarinom. Vz. 6, vzporedna polarizatorja. Izkop za HE Brežice.

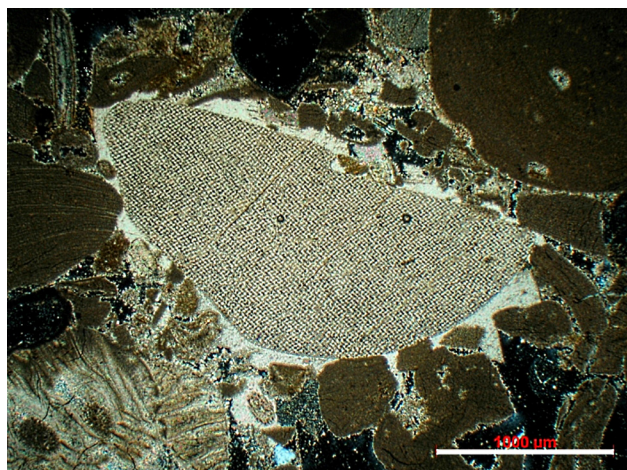
Fig. 10. Finegrained biocalciritite with skeletal algae fragments (brown), sparse foraminifera (on the left and right side), echinoid spine (top), slightly cemented with microsparite; echinoderm plate overgrown with syntaxial cement (upper right corner). Pores are stained pinkish with alizarin colour. Samp. 6, parallel polarizers. Excavation pit for the HPP Brežice.



Sl. 11. Odlomek roženca v drobnozrnatem biokalciruditu obdan s sparitnim obrobim cementom; spodaj je malo sparita, črno so pore. Preparat je rahlo rožnato obarvan z alizarinom. Vz. 6, navzkrižna polarizatorja. Izkop za HE Brežice.

Fig. 11. Chert fragment in finegrained biocalciritite enveloped with sparitic rim cement; some sparite is at the bottom, black are pores. Samp. 6, crossed polarizers. Excavation pit for the HPP Brežice.

Sestava in tekstura kamnine nakazujeta nastanek v višje energijskem in relativno plitvem morskem okolju. Opisane kamnine predstavljajo lateralno nadaljevanje miocenskega sedimentnega zaporedja z območja severnega pobočja Gorjancev, torej nadaljevanje formacije, za katero so RIŽNAR in sodelavci (2002) predlagali ime Čateška formacija. Sedimentno-petrografske lastnosti preiskanih kamnin, deloma tudi zelo slabo sprijetih sedimentov, naj bi nastala v območju



Sl. 12. Odlomek ploščice iglokožca obraščen s sintaksialnim sparitom (sredina). Okrog njega so motno prosojni odlomki koralinacejskih (litotamnijskih) alg. Vz. 6, navzkrižna polarizatorja. Izkop za HE Brežice.

Fig. 12. Fragment of echinoderm plate overgrown with syntaxial sparite (centre) and surrounded by fragments of coralline (lithothamnion) algae. Samp. 6, crossed polarizers. Excavation pit for the HPP Brežice.

plitvega šelfa, redkeje v globljem morju. OTONIČAR in CIMERMAN (2006) sta na območju trase avtoceste med Krško vasjo in Obrežjem, ki poteka po južni strani struge Krke, opisala okolje kot karbonatno platformo z morfologijo rampe. Kalcirudit in kalkarenit predstavljata resedimente. Za korelacijo je pomembna tanka plast prodnatega mulja do muljevca s številnimi fosili na meji med badenijem in sarmatijem. Predvidoma gre za isti horizont v katerem sta OTONIČAR in CIMERMAN (2006) našla le 2 cm debelo lamino v »laporastem« apnencu. V njej je bilo določenih kar 28 vrst badenijskih in spodnje sarmatijskih foraminifer.

Paleontološke raziskave

Mikrofosili

Klasifikacija mikrofosilov: **foraminifer** (lukičark) po LOEBLICH & TAPPAN (1987) in **ostrakodov** po MORKHOVEN (1962)

Badenijska mikrofavna (vzorec 1, tab. 1, sl. 1-13)

V združbi foraminifer velikosti > 0,250 mm prevladujejo primerki vrste *Pappina neudorfenis* (Toula) (tab. 1, sl. 11), sledijo primerki vrst *Uvigerina venusta* Franzén (tab. 1, sl. 10), *Bolivina dilatata maxima* Cicha & Zapletalova in primerki aglutinirane vrste *Pavonitina styriaca* Schubert (tab. 1, sl. 13). V združbi velikosti > 0,125 mm dominirajo primerki vrst *Bolivina dilatata dilatata* Reuss (tab. 1, sl. 7) in *Cassidulina carinata* Silvestri (tab. 1, sl. 1). V obeh združbah so dobro zastopane oblike vrst *Bulimina gutschulica*

Livental (tab. 1, sl. 8), *B. insignis* Luczkowska in *B. elongata* (d'Orbigny) (tab. 1, sl. 9). Zelo redki so primerki vrst *Paravulvulina serrata* (Reuss), *Bolivina pokornyi* Cicha & Zapletalova (tab. 1, sl. 5-6), *Globobulimina pyrula* (d'Orbigny) (tab. 1, sl. 12), *Globocassidulina oblonga* (Reuss), *Cibicidoides ungerianus* (d'Orbigny), *Lobatula lobatula* (Walker & Jacob), *Melonis pompilioides* (Fichtel & Moll), *Heterolepa dutemplei* (d'Orbigny), *Hanzawaia boueana* (d'Orbigny), *Elphidium macellum* (Fichtel & Moll) in *Uvigerina* sp. (tab. 1, sl. 10). Primerki planktonskih vrst so pogosti, med njimi *Globigerina diplostoma* (Reuss), *Gl. bulloides* d'Orbigny (tab. 1, sl. 2), *Globigerina falconensis* Blow (tab. 1, sl. 3), *Gl. concinna* Reuss, *Globigerinella regularis* (d'Orbigny) (tab. 1, sl. 4) in *Globoturborotalia druryi* (Akers). Redki so primerki foraminifer iz skupine *Globigerionoides* spp.

Sarmatijska mikrofavna (vzorec 5, tab. 2, sl. 1-20)

Foraminiferna združba je v sarmatijskem vzorcu glede na badenijsko precej reducirana. V združbi prevladujejo primerki vrst *Ammonia viennensis* (d'Orbigny) (tab. 2, sl. 119, *A. beccarii* (Linné), *A. beccarii* (Linné), *Fursenkoina sarmatica* (Vengliniski) (tab. 2, sl. 6), *Lobatula lobatula* (Walker & Jacob), *Nonion commune* (d'Orbigny), *N. bogdanowiczi* Voloshinova (tab. 2, sl. 1), *N. tumidulus* Pishvanova (tab. 2, sl. 2), *Porosonion granosum* (d'Orbigny), *P. martkobi* (Bogdanowicz) (tab. 2, sl. 7), *Elphidium ferretgranulom* Krashenninnikov (tab. 2, sl. 5), *E. hauerinum* (d'Orbigny) (tab. 2, sl. 3), *E. fichtelianum* (d'Orbigny) (tab. 2, sl. 10), *E. cf. joukovi* Serova (tab. 2, sl. 4), *E. macellum* (Fichtel & Moll) in *Elphidium grilli* Papp (tab. 2, sl. 13). Najdeni so še posamezni primerki vrst *Elphidium reginum* (d'Orbigny) (tab. 2, sl. 12), *Anomalinoidea dividens* (Luczkowska) (tab. 2, sl. 8-9) in *Quinqueloculina akneriana* d'Orbigny. Razen foraminifer je v vzorcu najdena tudi ostrakodna združba *Cytheridea hungarica* (Zalányi) (tab. 2, sl. 15), *Aurila merita* (Zalányi), *Loxocorniculum schmidi* (Cernajsek) (tab. 2, sl. 16), *Senesia* sp. (tab. 2, sl. 14) ter vrsti *Callistocythere egregia* (Méhes) (tab. 2, sl. 17) in *Xestoleberis globerescense* (Reuss) (tab. 2, sl. 20).

Makrofosili

Makrofosili so bili izolirani iz terenskega vzorca 4 (sl. 3.b), razen vrste *Macrochlamys nodosiformis* iz terenskega vzorca 2 (sl. 3.b). Vsi

primerki so shranjeni v Paleontološki zbirki Jurkovšek z oznako BJ.

Sistematska razvrstitev polžev po: WENZ 1938, BOUCHET & ROCROI 2005

Phylum Mollusca Linné, 1758
Classis Gastropoda Cuvier, 1795
Cladus Vetigastropoda Salvini-Plawen, 1980
Superfamilia Trochoidea Rafinesque, 1815
Familia Trochidae Rafinesque, 1815
Genus *Gibbula* Risso, 1826

Gibbula angulata (Eichwald, 1829)

Tab. 3, sl. 1

- 1856 *Monodonta angulata* Eichw. – HÖRNES, 439, Taf. 44, Figs. 9a-9c, 10a-10c
p.1897 *Trochus Guttenbergi* Hilber, species nova. – HILBER, 194, Taf. 1, Figs. 7a-7c, 8
1928 *Gibbula affinis* Eichw. var. *pseudangulata* Boettg. – FRIEDBERG, 491, Tabl. 31, Figs. 1-3
1954 *Gibbula* aff. *angulata* (Eichwald) – PAPP, 10, Taf. 1, Figs. 2-3
1954 *Gibbula angulata angulata* (Eichwald) – PAPP, 10, Taf. 1, Fig. 4
1954 *Gibbula angulata spirocarinata* n. ssp. – PAPP, 11, Taf. 1, Figs. 9-13
1959 *Calliostoma guttenbergi* (Hilber) – BODA, 606 (699), tab. 21, Figs. 1-6
1959 *Calliostoma angulatum* (Eichwald) – BODA, 608 (810), tab. 22, Fig. 3
1969 *Calliostoma guttenbergi* (Hilber, 1897) – KOJUMDŽIEVA, 76, Tabl. 28, Figs. 2a-2b, 3a-3c, 4
1971 *Calliostoma angulatum* (Eichwald) – NICORICI, 221, Pl. 3, Figs. 1-4
1981 *Gibbula (Colliculus) affinis pseudangulata* Boettger, 1907 – ŠVAGROVSKÝ, 107, Taf. 33, Figs. 1-3
2011 *Gibbula angulata* (Eichwald, 1853) – LUKENEDER et al., 772, Fig. 4. A
2013 *Calliostoma? angulatum spirocarinatum* (Papp, 1954) – TĂMAȘ et al., 69, Fig. 2e

Material: Dve poškodovani hišici iz terenskega vzorca 4 (BJ 3224). Hišici sta široki okrog 8 mm.

Opis: Majhna, stožčasta oziroma trohoidna, evolutna hišica z apikalnim kotom okrog 60°. Ohranjeni so trije relativno visoki in ravni zavoji. Zadnji zavoj zavzema polovico hišice in ima okroglo holostomno ustje. Na starejših zavojih je v zgornjem delu en močnejši spiralni greben,

navzdol sledi pet enakovrednih in tankih spiralnih črt. Zadnji zavoj ima podobno ornamentacijo, le da je na sredini zavoja večji in širši spiralni greben, ki v spodnjem delu preide v štiri do pet tankih spiralnih črt.

Opomba: HÖRNES (1856: 439) v sinonimiki navaja, da je vrsto prvokrat opisal Eichwald leta 1829 z imenom *Trochus angulatus*.

Stratigrafska in geografska razširjenost: HÖRNES (1856: 439) piše, da so jo našli v miocenskih skladih avstrijskih in madžarskih najdišč. FRIEDBERG (1928: 491-492) predstavlja različne gibule iz miocena Poljske, med njimi tudi zelo podobno obliko vrsti *Gibbula angulata*. PAPP (1954: 10-11) predstavlja več gibul, ki so si medsebojno zelo podobne, razvršča pa jih v nekaj vrst in podvrst. Najdene so v sarmatijskih rizojskih in ervilijskih plasteh Dunajske kotline. BODA (1959: 606-608) opisuje več različnih gibul in kaliostom, vse so iz sarmatijskih plasti Madžarske. NICORICI (1971: 221) primerke vrste *Calliostoma angulatum* opisuje iz sarmatijskih plasti najdišča Cioncu v Romuniji. ŠVAGROVSKÝ (1981: 108) jo predstavlja iz badenijskih plasti Slovaške, omenja še, da so jih našli tudi na Moravskem, Madžarskem, Poljskem, v Romuniji in Ukrajini. HARZHAUSER & PILLER (2004a: 98) vrsto *Gibbula angulata* (Eichwald) omenjata iz kamnoloma Hummel v kotlini Eisenstadt - Sopron. LUKENEDER in sod. (2011: 772) pišejo, da je vrsta *Gibbula angulata* med pogostnimi oblikami sarmatijskih polžev v Centralni Paratetidi. TAMAŞ et al. (2013: 69) jo opisujejo iz spodnjesarmatijskih plasti Romunije.

Cladus Cycloneritimorpha Fryda, 1998
Superfamilia Neritoidea Rafinesque, 1815
Familia Neritidae Rafinesque, 1815
Genus *Theodoxus* Montfort, 1810

JURIŠIĆ-POLŠAK-ova (1979: 32) piše, da so neritide živele v sladki vodi (rod *Theodoxus*) ali v brakični vodi (rod *Clithon*), izjemoma so neritide v morju, vendar na območju z močnim lokalnim vplivom sladke vode.

Theodoxus soceni Jekelius, 1944
Tab. 3, sl. 2 a-b

- 1959 *Theodoxus (Theodoxus) soceni* Jekelius – BODA, 630 (727), Tab. 33, Figs. 1-4
1969 *Theodoxus (Calvertia) soceni* Jekelius, 1944 – KOJUMDŽIEVA, 61, Tabl. 21, Fig. 6

- 1979 *Theodoxus (Theodoxus) pilari soceni* (Jekelius) – JURIŠIĆ-POLŠAK, 20. Tab. 4, Sl. 3-6
2011 *Theodoxus soceni* Jekelius, 1944 – LUKENEDER et al., 772, Fig. 4. F₁ – F₂

Material: Ena v celoti ohranjena hišica iz terenskega vzorca 4 (BJ 3223). Hišica je visoka 6,5 in široka 7,5 mm.

Opis: Zelo majhna hišica sestoji iz treh prekrivajočih zavojev. Zadnji zavoj je zelo velik, močno izbočen in prekriva vse starejše zavoje. Veliko holostomno ustje je ovalne do pravokotne oblike, notranja ustna je rahlo nazobčana in široka, zunanja je ozka in gladka. Površina hišice je ornamentirana z ohranjenim rjavorumenkastim nepravilnim vzorcem, ki je značilen za tovrstne polže.

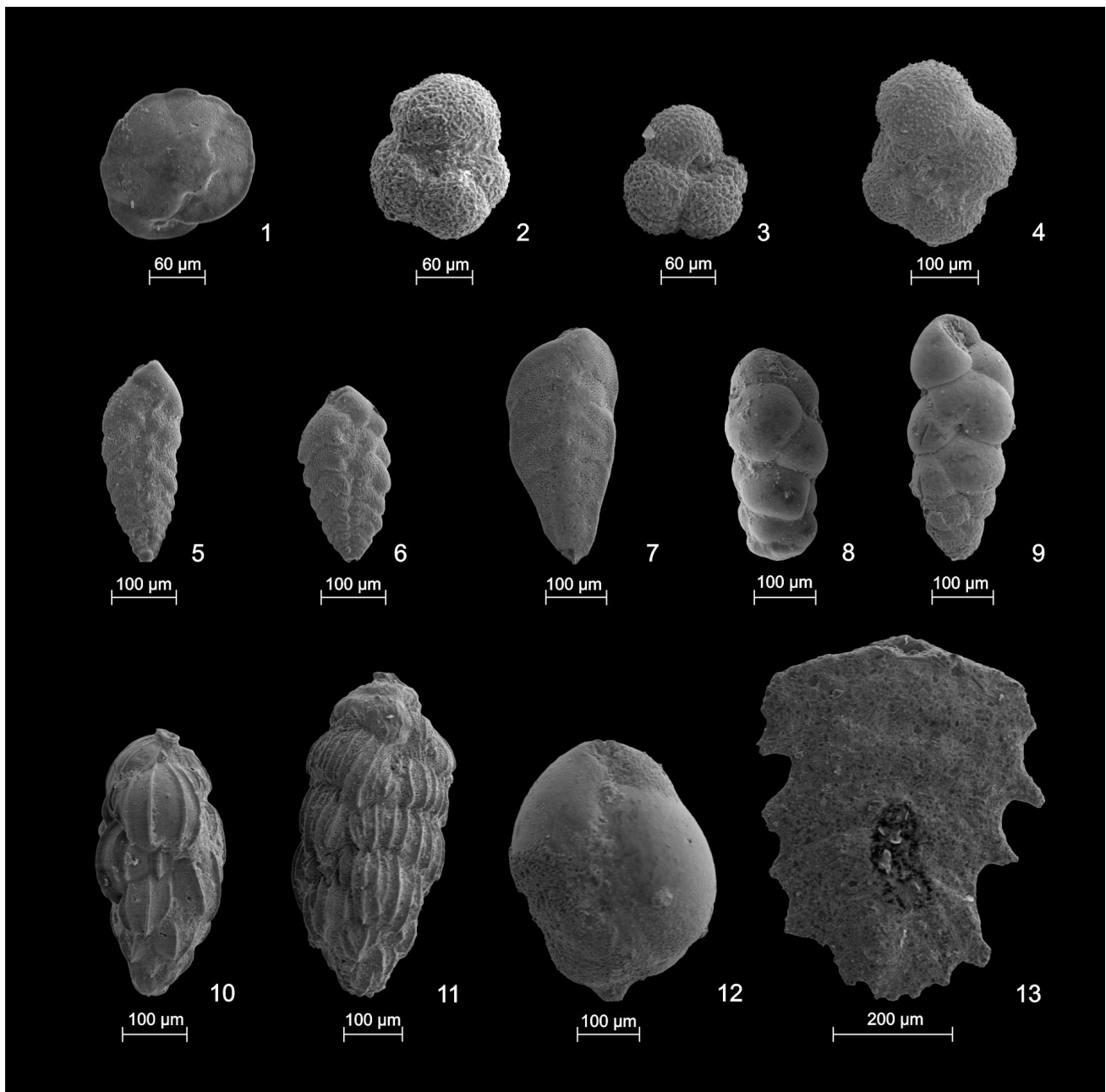
Stratigrafska in geografska razširjenost: BODA (1959: 630 (727)) piše, da so primerki vrste *Theodoxus soceni* ugotovljeni v sarmatijskih plasteh Madžarske (Várpalota) in nastopajo od sarmatija do panonija. KOJUMDŽIEVA (1969: 61) tovrstno obliko predstavlja iz spodnjega sarmatija Bolgarije. JURIŠIĆ-POLŠAK (1979: 20) piše, da je ta polžja oblika najdena v sarmatijskih in panonijskih skladih Hrvaške (Markuševac), Romunije (Soceni) in Avstrije (Vösendorf). LUKENEDER in sodelavci (2011: 772) jo predstavljajo med pogostnimi sarmatijskimi polži Centralne Paratetide.

Cladus Sorbeoconcha Ponder & Lindberg, 1997
Superfamilia Cerithioidea Fleming, 1822
Familia Cerithiidae Fleming, 1822
Genus *Cerithium* Bruguière, 1789

Cerithium rubiginosum (Eichwald, 1830)
Tab. 3, sl. 3 a-b, 4 a-b, 5 a-b

- 1856 *Cerithium rubiginosum* Eichw. – HÖRNES, 396, Taf. 41, Figs. 16a-16b, 18a-18b
1875 *Cerithium rubiginosum* Eichw. var. – HÖRNES, 67, Taf. 2, Figs. 15a-15b, 16a-16b
1922 *Cerithium (Chondrocerithium) subrubiginosum* C. et P. – COSSMANN & PEYROT, 215, T 73, Pl. 5, Figs. 29-31
1954 *Cerithium (Theridium) rubiginosum rubiginosum* (Eichwald) – PAPP, 46, Taf. 6, Figs. 27-28
1954 *Cerithium (Theridium) rubiginosum subtypicum* Sacco – PAPP, 47, Taf. 6, Fig. 29
1959 *Cerithium (Theridium) rubiginosum rubiginosum* (Eichwald) – BODA, 620 (715), tab. 27, Figs. 4-10
1960 *Cerithium rubiginosum* Eichw. – VADÁSZ, 604, Tab. 49, Fig. 5

TABLA 1 – PLATE 1



SEM fotografije badenijskih foraminifer iz vzorca 1.

SEM images of the Badenian foraminifera from sample 1.

- | | |
|--|--|
| 1 <i>Cassidulina carinata</i> Silvestri | 8 <i>Bulimina gutschulica</i> Livental |
| 2 <i>Globigerina bulloides</i> d'Orbigny | 9 <i>Bulimina elongata</i> d'Orbigny |
| 3 <i>Globigerina falconensis</i> Blow | 10 <i>Uvigerina</i> sp. |
| 4 <i>Globigerinella regularis</i> (d'Orbigny) | 11 <i>Pappina neudorfensis</i> (Toula) |
| 5 <i>Bolivina pokornyi</i> Cicha & Zapletalova | 12 <i>Globobulimina pyrula</i> (d'Orbigny) |
| 6 <i>Bolivina pokornyi</i> Cicha & Zapletalova | 13 <i>Pavonitina styriaca</i> Schubert |
| 7 <i>Bolivina dilatata</i> Reuss | |

- 1969 *Cerithium (Vulgocerithium) rubiginosum rubiginosum* Eichwald, 1830 – KOJUMDŽIEVA, 89, Tabl. 31, Figs. 22a-22b, 23a-23b; Tabl. 32, 1a-1b, 2
- 1971 *Cerithium (Theridium) rubiginosum rubiginosum* Eichwald – NICORICI, 230, Pl. 6, Figs. 26-49
- 1998 *Cerithium (Tharidium) rubiginosum rubiginosum* Eichwald – SCHULTZ, 130-131, Taf. 59, Figs. 10a-10b
- 1998 *Cerithium (Theridium) rubiginosum subtypicum* Sacco – SCHULTZ, 130-131, Taf. 59, Figs. 11a-11b
- 2011 *Cerithium rubiginosum* (Eichwald, 1853) – LUKENEDER et al., 772, Fig. 4. G-H
- 2011 *Cerithium rubiginosum* Eichwald, 1830 – HARZHAUSER et al., 172, Fig. 3. 9

Material: V raziskavi smo imeli 82 različno ohranjenih hišic iz terenskega vzorca 4 (BJ 3229). Največje merijo v višino 23 mm, v širino 8,5 mm, najmanjše so visoke 9,5 in široke 5 mm.

Opis: Nizko stolpičasta evolutna hišica sestoji iz devetih do desetih zavojev, z apikalnim kotom okrog 30°. Zavoji so nizki, široki in rahlo izbočeni, zadnji zavoj zavzema skoraj polovico hišice in ima ovalno sifonostomno ustje. Notranja ustna je široka in gladka, zunanja ozka in navzven nazobčana. Celotna površina hišica je prekrita z osno in spiralno tuberkulato ornamentacijo.

Stratigrafska in geografska razširjenost: HÖRNES (1856: 396) jih omenja in opisuje iz številnih avstrijskih najdišč. HOERNES (1875: 67) opisuje vrsto *Cerithium rubiginosum* iz sarmatijskih plasti najdišča Kravarsko na Hrvaškem. FUCHS (1875b: 108) tudi omenja vrsto *Cerithium rubiginosum* iz sarmatijskih (v Mediteranu serravallijskih) plasti v okolici Sirakuze na Siciliji. COSSMANN in PEYROT (1922: 215) zelo podobno podvrsto omenjata iz miocena najdišč Gajac in Mérignac v Franciji. PAPP (1954: 46-47) omenja dve ceritijski obliki iz sarmatijskih plasti Avstrije: *Cerithium (Theridium) rubiginosum rubiginosum* in *C. (T.) rubiginosum subtypicum*. BODA (1959: 620) jih predstavlja iz sarmatijskih plasti Madžarske. KOJUMDŽIEVA (1969: 90) primerke vrste *Cerithium rubiginosum* predstavlja iz spodnesarmatijskih plasti Bolgarije. NICORICI (1971: 230) jih predstavlja iz sarmatijskih plasti najdišča Cioncu v Romuniji. SCHULTZ (1998: 130) omenja dve podvrsti: *Cerithium (Theridium) rubiginosum rubiginosum* iz rizojskih in *C. (T.) rubiginosum subtypicum* iz ervilijskih plasti Spodnje Avstrije. HARZHAUSER in PILLER (2004a: 98) omenjata najdbe vrste *Cerithium rubiginosum* iz sarmatijskih plasti kamnoloma Hummel v kotlini Eisenstadt - Sopron. LUKENEDER in sodelavci (2011: 772) jih predstavljajo iz najdišča Soceni Politioană iz cone z mohrensternijami in najdišča Hauskirchen iz cone z ervilijami. HARZHAUSER in sod. (2011: 172-173) vrsto *Cerithium rubiginosum* predstavljajo in omenjajo iz zgornje ervilijske cone v severnovzhodnem območju Avstrije.

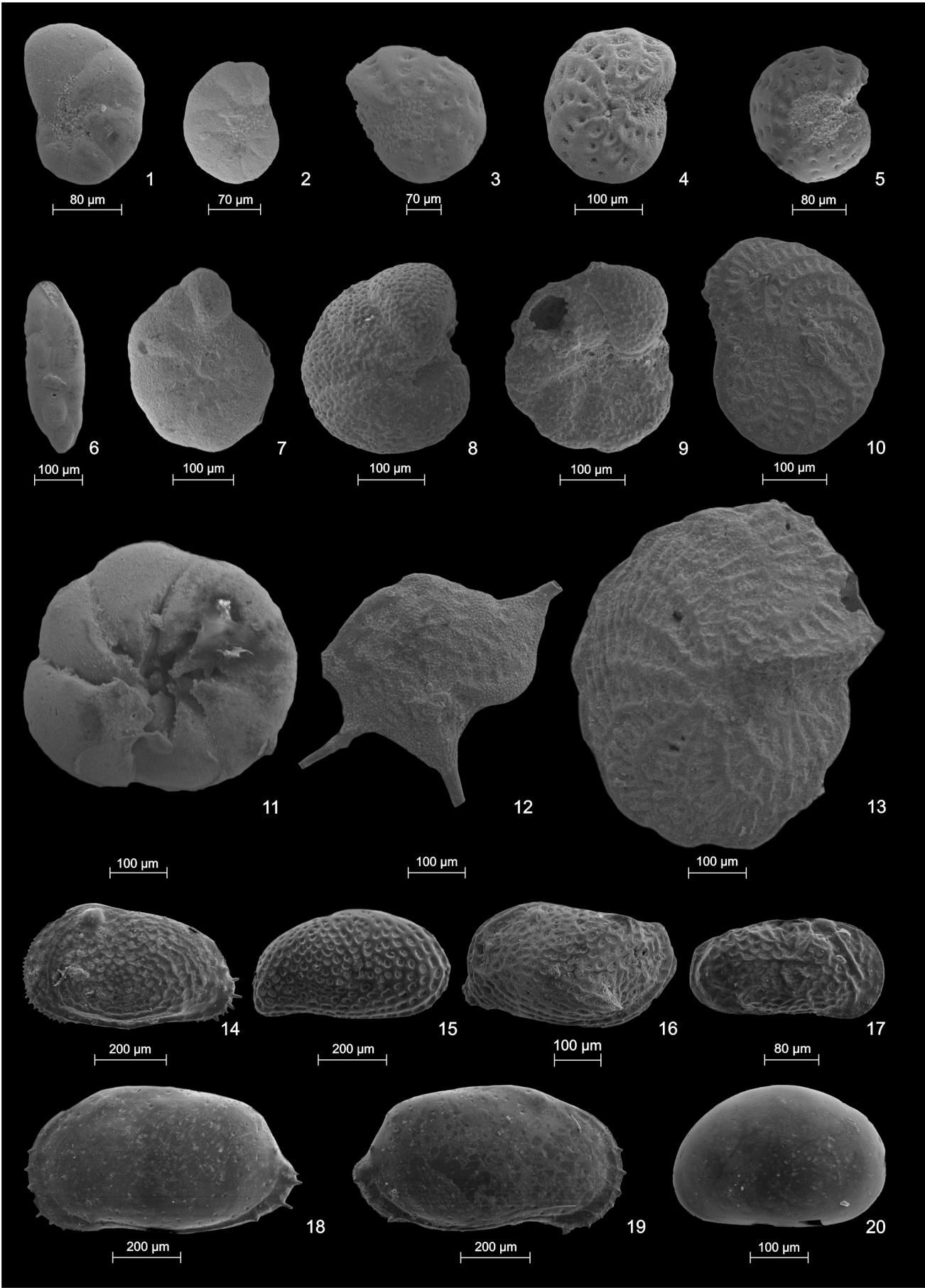
TABLA 2 – PLATE 2

SEM fotografije sarmatijskih foraminifer in ostrakodov iz vzorca 5.

SEM images of the Sarmatian foraminifera and ostracods from sample 5.

- | | |
|---|--|
| 1 <i>Nonion bogdanowiczi</i> Voloshinova | 11 <i>Ammonia viennensis</i> (d'Orbigny) |
| 2 <i>Nonion tumidulus</i> Pisshvanova | 12 <i>Elphidium reginum</i> (d'Orbigny) |
| 3 <i>Elphidium hauerinum</i> (d'Orbigny) | 13 <i>Elphidium grilli</i> Papp |
| 4 <i>Elphidium</i> cf. <i>joukovi</i> Serova | 14 <i>Senesia</i> sp. |
| 5 <i>Elphidium ferentegrnulom</i> Krashenninnikov | 15 <i>Cytheridea hungarica</i> Zálányi |
| 6 <i>Fursenkoina sarmatica</i> (Vengliniski) | 16 <i>Loxocorniculum schmidi</i> (Cernajsek) |
| 7 <i>Porosononion martkobi</i> (Bogdanowicz) | 17 <i>Callistocythere egregia</i> (Méhes) |
| 8 <i>Anomalinoides dividens</i> Luczkowska | 18 <i>Aurila merita</i> (Zálányi) |
| 9 <i>Anomalinoides dividens</i> Luczkowska | 19 <i>Aurila merita</i> (Zálányi) |
| 10 <i>Elphidium fichtellianum</i> (d'Orbigny) | 20 <i>Xestoleberis glaberescence</i> (Reuss) |

TABLA 2 – PLATE 2



Familia Potamididae H. Adams & A. Adams, 1854
Genus *Granulolabium* Cossmann, 1889

***Granulolabium pictum* (Basterot, 1825)**

Tab. 3, sl. 6 a-b, 7 a-b, 8 a-b

- 1825 *Cerithium pictum*. Nob. – BASTEROT, 57, Pl. 3, Fig. 6
1840 *Cerithium pictum*. De Bast. – GRATELOUP, Cérîte, No. 18, Pl. 2, Fig. 8
1840 *Cerithium pictum*. Bast. – GRATELOUP, Supplément, Pl. 1, No. 46, Fig. 12
1856 *Cerithium pictum* Bast. – HÖRNES, 394, Taf. 41, Figs. 15a-15b, 17a-17b
1875 *Cerithium pictum* Bast. var. – HOERNES, 67, Taf. 2, Figs. 8-12
1922 *Pirenella picta* Defr. var. *cingulata* et *effusa* Grat. – COSSMANN & PEYROT, 275, T. 73, Pl. 6, Figs. 10-11
1922 *Pirenella picta* Defr. – COSSMANN & PEYROT, 273, T. 73, PL. 6, Figs. 17-20
1954 *Pirenella picta picta* (Defrance) – PAPP, 39, Taf. 6, Figs. 1-12
1954 *Pirenella picta mitralis* (Eichwald) – PAPP, 40, Taf. 6, Figs. 16-18
1954 *Pirenella picta bicostata* (Eichwald) – PAPP, 41, Taf. 6, Figs. 19-21
1959 *Pirenella picta picta* (Defrance) – BODA, 616 (711), táb. 25, Figs. 15-19; Tá. 26, Figs. 1-5
1959 *Pirenella picta mitralis* (Eichwald) – BODA, 617 (712), táb. 26, Figs. 6-11
1960 *Cerithium pictum* Defr. – VADÁSZ, 604, Tá. 49, Fig. 3
1966 *Pirenella picta floriana* (Hilb.) – KÓKAY, 41, Tá. 4, Figs. 1-4
1969 *Pirenella picta picta* (Defrance in Basterot, 1825) – KOJUMDŽIEVA, 92, Tabl. 32, Figs. 15a-15b, 16a-16b
1971 *Pirenella picta bicostata* (Eichwald) – NICORICI, 229, Pl. 6, Figs. 1-4
2001 *Granulolabium* (*Granulolabium*) *bicinctum* (Brocchi 1814) – Harzhauser & Kowalke, 362-363, Fig. 4. 10
2002 *Granulolabium bicinctum* (Brocchi, 1814) – HARZHAUSER & KOWALKE, 66-67, Pl. 11, Figs. 1-3; Pl. 13, Figs. 1-3
2008 *Granulolabium bicinctum* (Brocchi, 1814) – MANDIC et al., 351, Fig. 7 h
2011 *Granulolabium bicinctum* (Brocchi, 1814) – LUKENEDER et al., 772, Fig. 4. I-J
2011 *Granulolabium bicinctum* (Brocchi, 1814) – HARZHAUSER et al., 172, Fig. 3. 7
2013 *Granulolabium bicinctum* (Brocchi, 1814) – TAMAŞ et al., 71, Figs. 2i-j

Material: 37 različno ohranjenih hišic granulolabijev iz terenskega vzorca (BJ 3228). Največje hišice so visoke 19,5 in široke 8 mm, najmanjše merijo v višino 11 in širino 4mm.

Opis: Nizka stolpičasta ceritijska hišica sestoji iz 11 do 12 nizkih, širokih in rahlo izbočenih zavojev. Apikalni kot znaša okrog 26°. Ambitus hišice je stopničastega videza. Zadnji zavoj zavzema približno tretjino celotne hišice, ovalno ustje je sifonostomno. Notranja in zunanja ustna se podaljšujeta v kratek sifonalni kanal. Na vseh zavojih so po trije spiralni grebeni, na zgornjem delu zavojev je najmočnejši niz spiralno potekajočih izboklin, sledi srednji šibkejši venec in spodaj je najšibkejši spiralni venec izboklinic. Velikost izboklinic se povečuje od najstarejših k najmlajšim zavojem. Zadnji zavoj ima največje izbokline. Opazili smo manjše razlike v ornamentaciji posameznih hišic.

Pripombe: Oblika in ornamentacija prve predstavitve pliocenske (piacentino) polžje hišice Brocchija iz leta 1814 (Tav. 9) z imenom *Murex bicinctus* (tav. 9, fig. 13, cf. PINNA 1989: 314-323, Tav. 165, Fig. 13) je drugačna od sarmatijske vrste z imenom *Granulolabium bicinctum*. Zavoji pri Brocchijevi vrsti so nižji in ornamentirani z dvema enakovrednima spiralnima vrstama vozličev na zavojju. Nekaj podobnega vidimo tudi pri primerku z imenom *Pirenella bicincta* (Brocchi) 1814 (cf. ROSSI RONCHETTI 1951-1957: 125-126, Fig. 60). Po ambitusu hišic in njihovi ornamentaciji sarmatijske oblike ustrezajo BASTEROT – ovi (1825) vrsti *Cerithium picta*, še bolj pa primerkom iste vrste *C. pictum*, ki jih predstavlja HÖRNES (1856: Taf. 41, Figs. 15, 17).

Po našem mnenju primerki Brocchi-jeve vrste *Granulolabium bicinctum*, ki jih iz sarmatijskih plasti Paratetide predstavljajo avtorji HARZHAUSER in KOWALKE (2002), MANDIC in sodelavci (2008), LUKENEDER in sodelavci (2011), HARZHAUSER in sodelavci (2011), TAMAŞ in sodelavci. (2013), ne pripadajo tej vrsti, saj so oblike originalnih hišic oziroma holotipov drugačne.

SUESS (1866: 219-221) iz sarmatijskega bračičnega ceritijskega horizonta Dunajske kotline in Madžarske večkrat omenja primerke vrste *Cerithium pictum*, *C. rubiginosum* in *C. plicatum*. FUCHS (1875a: 49) opisuje terciarne plasti v okolici Kamnika. Iz najmlajših peskov s turitelami in ceritiji omenja zelo pogostni vrsti *Cerithium pictum* Bast. in *C. rubiginosum*

Eicw. ter plasti z njimi primerja z avstrijskimi grundskimi skladi. HILBER (1881: 474-75) navaja med sarmatijskimi polžjimi vrstami iz Viševce in Vrhovij v Tunjiškem gričevju ceritijske oblike *Cerithium rubiginosum* Eichw., *C. aff. rubiginosum* Eichw. in *C. aff. pictum* Basterot. HILBER (1883: 176) znova navaja iz sarmatijskih plasti Tunjiškega gričevja oziroma okolice Tunjiške Mlake in Vrhovij ceritje vrst *Cerithium disjunctum* Sow., *C. pictum* Bast. in *C. rubiginosum* Eichw. BITTNER (1890: 284-285) med sarmatijskimi fosili omenja iz najdišča Marija Gradec na ozemlju med Laškim in Zagorjem štiri ceritijske oblike: *Cerithium pictum*, *C. florianum*, *C. rubiginosum* in *C. nodosoplicatum*. Nadalje še polemizira, da so primerki vrste *Cerithium pictum* najbolj pogostni in da je Hilberjeva vrsta *C. florianum* zelo podobna ali ista vrsti *C. pictum*. SAJOVIC (1909: 26) med polži iz Tunjiškega gričevja omenja številne ceritijske oblike, med njimi tudi vrste *Cerithium disjunctum*, *C. florianum*, *C. pictum* in *C. rubiginosum*.

Stratigrafska in geografska razširjenost:

BASTEROT (1825: 57) jo opisuje iz miocena južnozahodnega dela Francije. GRATELOUP (1840) jih omenja iz miocenskih plasti najdišča Dax v Franciji. Primerke vrste *Cerithium pictum* opisuje HOERNES (1875: 67) iz več najdišč sarmatijskih plasti na Hrvaškem, med njimi omenja Kravarsko, ki je med Zagrebom in Siskom. COSSMANN in PEYROT (1922: 273) tovrstne polže omenjata iz miocena najdišča Pont-Pourquey v Franciji. PAPP (1954: 39-41) predstavlja tri zelo podobne podvrste pirenell, *Pirenella picta picta*, *P. picta mitralis* in *P. picta bicostata* iz sarmatijskih plasti Avstrije. BODA (1959: 616-617) podvrsti *Pirenella picta picta* in *P. picta mitralis* med katerima ni bistvene razlike, omenja in predstavlja iz sarmatijskih plasti Madžarske. KÓKAY (1966: 98) piše, da je podvrsta *Pirenella picta floriانا* najdena v brakičnih ceritijskih skladih območja Herend - Márkó na Madžarskem. KOJUMDŽIEVA (1969: 92) tovrstne polžke predstavlja iz spodnjesarmatijskih plasti Bolgarije. NICORICI (1971: 229) povrsto *Pirenella picta bicostata* predstavlja iz sarmatijskih plasti najdišča Cioncu v Romuniji. HARZHAUSER in KOWALKE (2001: 363) jo predstavljata iz karpatijskih plasti kotline Korneuburg v Avstriji. Vrsta *Granulolabium bicinctum* (BROCCHI, 1814) je po mnenju HARZHAUSER-ja in KOWALKE-ja (2002: 66-67) tipična za to sarmatijsko združbo območja kotline Eisenstadt (Avstrija) – Sopron

(Madžarska). HARZHAUSER in PILLER (2004a: 98) vrsto *Granulolabium bicinctum* omenjata iz sarmatijskih plasti profila Hummel v kotlini Eisenstadt-Sopron ter iz eneko starih plasti profila Klapping v Štajerski kotlini (2004: 101). MANDIC in sodelavci (2008: 351) sarmatijsko vrsto polža predstavljajo iz severnovzhodnega predela Avstrije. LUKENEDER in sodelavci (2011: 770) jo predstavljajo iz več sarmatijskih najdišč, Siebenhirten, Hauskirchen, Nexing in Soceni. HARZHAUSER in sodelavci (2011: 172-173) jo predstavljajo iz ervilijskih plasti severnovzhodnega predela Avstrije. TAMAŠ in sodelavci (2013: 71-73) to obliko polža predstavljajo iz spodnjesarmatijskih plasti Romunije. Omenjajo jo še iz Avstrije, Bolgarije, Madžarske, Slovaške in Ukrajine.

Familia Turritellidae Lovén, 1847

Genus *Turritella* Lamarck, 1799

Turritella sarmatica Papp, 1954

Tab. 3, sl. 9

1954 *Turritella (Haustator) sarmatica* n. sp. – PAPP, 37, Taf. 9, Figs. 20-22

1998 *Turritella (Haustator) sarmatica* Papp – SCHULTZ, 130-131, Taf. 59, Fig. 5

2008 *Turritella eryna sarmatica* (Papp, 1954) – MANDIC et al., 351, Fig. 7g

Material: Iz terenskega vzorca 4 (BJ 3226) smo izdvojili en zelo poškodovan primerek turitelne hišice. Velikost ostanka hišice meri 12 × 6,5 mm.

Opis: Ohranjeni so štirje zavoji evolutne stolpičaste hišice. Zavoji so nizki, široki in precej izbočeni. Apikalni kot hišice znaša okrog 20°. Ornamentacija zavojev sestoji iz treh močnejših spiralnih grebenov, osrednji je najbolj izrazit.

Stratigrafska in geografska razširjenost: PAPP (1954: 37) je novo vrsto turitele našel v sarmatijskih rizojskih plasteh najdišča Hollabrunn v Spodnji Avstriji. SCHULTZ (1998: 130) jo predstavlja iz spodnjesarmatijskih rizojskih plasti najdišča Hollabrunn v Spodnji Avstriji. MANDIC in sodelavci (2008: 351) predstavljajo spodnjesarmatijsko turitelo iz najdišča Hollabrunn v severnovzhodnem predelu Avstrije.

***Turritella* sp.**

Tab. 3, sl. 10

Material: Skromen ostanek turitelne hišice iz terenskega vzorca 4(BJ 3227).

Opis: Ohranjeni so trije nizki in široki zavoji turitele. Zavoji so ravni do vbočeni s po dvema spiralnima grebenoma. Zgornji greben je šibek, spodnji izrazit. Zaradi premajhnega števila zavojev, apikalnega kota ne moremo ugotoviti.

Primerjava: Ostanek hišice je podoben hišicam vrste *Turritella bicarinata* Eichwald (cf. HÖRNES 1856, Taf. 43, Fig. 8).

Pripomba: Takšnih turitel iz sarmatijskih plasti ne poznamo, najverjetneje je iz starejših badenijskih plasti.

***Turritella* sp.**

Tab. 3, sl. 11

Material: Vzorec z oznako BJ 3227. Najdeni sta dve hišici, večja meri 21 × 6 mm, manjša 15 × 5 mm.

Opis: Ozko stolpičasta hišica sestoji iz večjega števila ravnih do konkavnih zavojev. Apikalni kot hišice znaša okrog 17°. Večja hišica ima deset zavojev, manjša ima osem zavojev. Površina hišice ima spiralno ornamentacijo. Na zgornjem delu zavojev je več zelo tankih spiralnih črt, v spodnjem delu sta dva enako močna spiralna grebena.

Primerjava: Ostanka hišic sta podobna hišicam vrst *Turritella archimedis* Brongniart (cf. HÖRNES 1856, Taf. 43, Figs. 13-14) in *Turritella pythagoraica* Hilber (cf. HLADILOVÁ & FORDINÁL 2013: 40, Fig. 5.a).

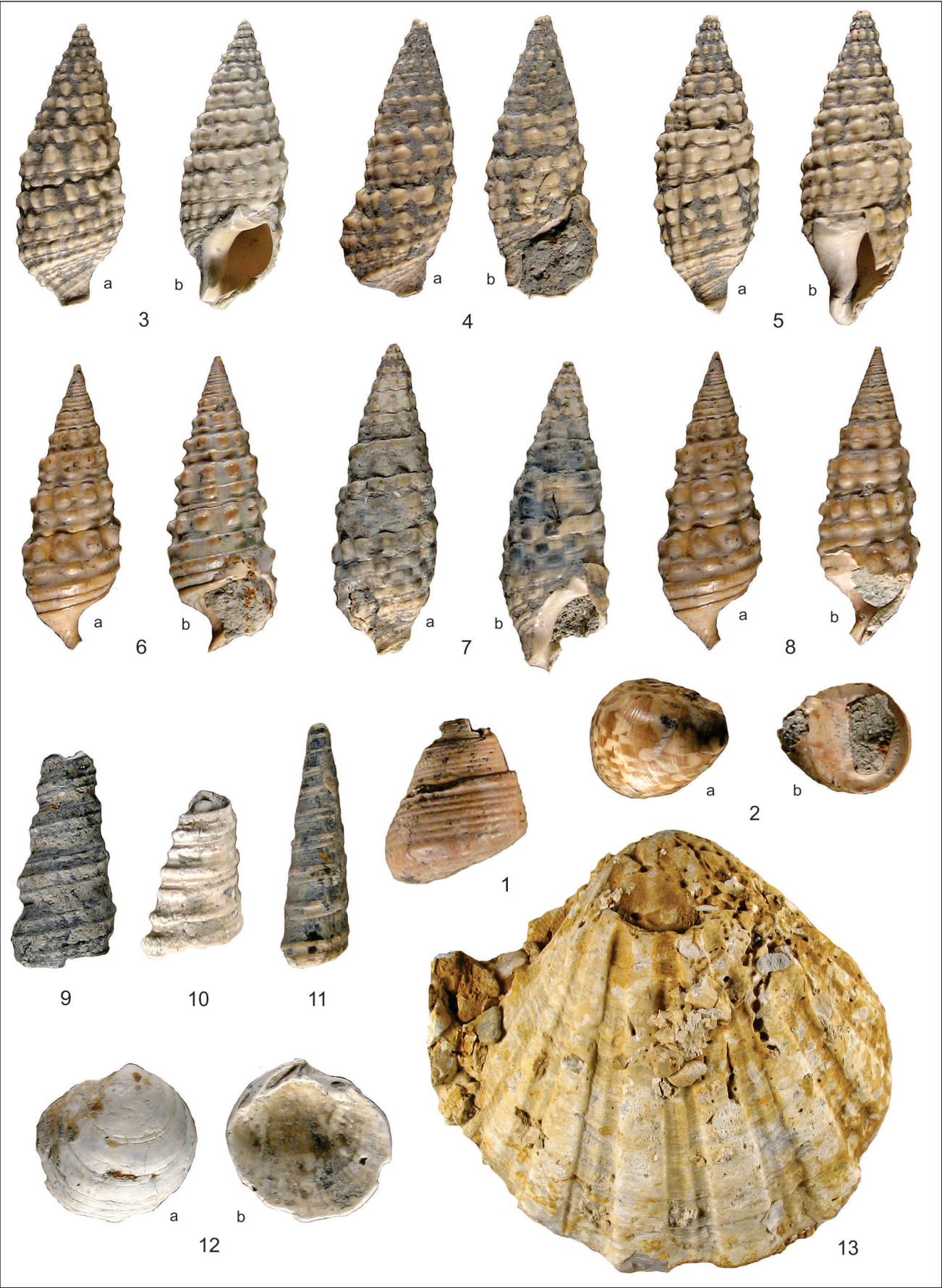
Pripomba: Tudi ta tip turitel ni poznan iz sarmatijskih kamnin Centralne Paratetide. Hišica je najverjetneje badenijske starosti.

TABLA 3 – PLATE 3

- | | | | |
|---|---|----|--|
| 1 | <i>Gibbula angulata</i> (Eichwald, 1829); vz./samp. 4 (BJ 3224); 8.5 × 8 mm | 8 | <i>Granulolabium pictum</i> (Basterot, 1825); a) dorzalno/dorsal, b) ventralno/ventral, vz. / samp. 4 (BJ 3228); 17.5 × 6 mm |
| 2 | <i>Theodoxus soceni</i> Jekelius, 1944; a) dorzalno/dorsal, b) ventralno/ventral, vz./samp. 4 (BJ 3223); 6.5 × 7.5 mm | 9 | <i>Turritella sarmatica</i> Papp, 1954; vz./samp. 4 (BJ 3226); 8.5 × 6 mm |
| 3 | <i>Cerithium rubiginosum</i> (Eichwald, 1830); a) dorzalno/dorsal, b) ventralno/ventral, vz. / samp. 4 (BJ 3229); 22 × 8.5 mm | 10 | <i>Turritella</i> sp.; vz./samp. 4 (BJ 3227); 12.5 × 7 mm |
| 4 | <i>Cerithium rubiginosum</i> (Eichwald, 1830); a) dorzalno/dorsal, b) ventralno/ventral, vz. / samp. 4 (BJ 3229); 19.5 × 7.5 mm | 11 | <i>Turritella</i> sp.; vz./samp. 4 (BJ 3227); 21 × 6 mm |
| 5 | <i>Cerithium rubiginosum</i> (Eichwald, 1830); a) dorzalno/dorsal, b) ventralno/ventral, vz. / samp. 4 (BJ 3229); 20 × 7 mm | 12 | <i>Parvilucina dentata</i> (Basterot, 1825); leva lupina/ left valve: a) zunanja stran/outer side, b) notranja stran/inner side; vz./samp. 4 (BJ 3225); 12 × 11.5 × 4 mm |
| 6 | <i>Granulolabium pictum</i> (Basterot, 1825); dorzalno/dorsal, b) ventralno/ventral, vz. / samp. 4 (BJ 3228); 18 × 6.5 mm | 13 | <i>Macrochlamys nodosiformis</i> (Serres, 1837); vz./samp. 2 (BJ 3132); 81 × 87 × 18 mm |
| 7 | <i>Granulolabium pictum</i> (Basterot, 1825); a) dorzalno/dorsal, b) ventralno/ventral, vz. 4 / samp. 4 (BJ 3228); 20 × 7 mm | | |

Makrofosili so bili izolirani iz terenskega vzorca 4 (sl. 3.b), razen vrste *Macrochlamys nodosiformis* iz terenskega vzorca 2 (sl. 3.b). Primerki so shranjeni v Paleontološki zbirki Jurkovšek z oznako BJ.

TABLA 3 – PLATE 3



Sistematska razvrstitev školjk po: SCHULTZ 2001, 2003

Classis Bivalvia Linné, 1758

Subclassis Heterodonta Neumayr, 1884

Ordo Veneroida H. Adams & A. Adams, 1856

Superfamilia Lucinoidea Fleming, 1828

Familia Lucinidae Fleming, 1828

Genus *Parvilucina* Dall, 1901

Parvilucina dentata (Basterot, 1825)

Tab. 3, sl. 12 a-b

- 1825 *Lucina dentata*. Nob. – Basterot, 87, Pl. 4, Fig. 20A-20B
 1870 *Lucina dentata* Bast. – Hörnes, 238, Taf. 33, Figs. 9a-9c
 1934 *Loripes dentatus* Defr. var. *nivea* Eichw. – Friedberg, 112, Tabl. 19, Figs. 22-28
 1954 *Lucina* (*Loripes*) *dentata* Basterot. – Papp, 68, Taf. 12, Fig. 14
 1959 *Loripes* cfr. *dentatus* (Defrance) – Boda, 590 (681), tab. 3, Figs. 2-3
 1960 *Loripes dentatus* (Defrance, 1823) – Kojumdžieva, 32, tabl. 10, Figs. 3a-3b
 1969 *Loripes dentatus* (Defrance, 1823) – Kojumdžieva, 13, Tabl. 1, Figs. 1a-1b, 2a-2b
 1971 *Loripes* (*Loripes*) *dujardini* (Deshayes), (Hörnes) – Nicorici, 216, Pl. 1, Figs. 2-13
 1985 *Loripes dentatus* (Defrance, 1823) – Atanacković, 50, Tab. 11, Figs. 5-6
 2003 *Parvilucina* (*Microloripes*) *dentata* (Defrance, 1823) – Schultz, 406, Taf. 58, Figs. 7a-7b, 8a-8b

Material: Ena lupinica iz terenskega vzorca 4 (BJ 3225). Školjčna lupinica meri v dolžino 11,5 v višino 10 mm, njena debelina znaša 4 mm.

Opis: Majhna, tanka in srednje izbočena leva lupinica je subkvadratne oblike z dolgim polkrožnim ventralnim robom. Dorzalni del sprednjega roba lupine je dolg in položen, sledi drobcen zašiljen vrh in strm polkrožen zadnji rob lupine. Površina lupine prekriva nekaj močnejših koncentričnih prirastnih linij, ki predstavljajo krajše prekinitve v rasti. Lucine imajo v notranjosti lupine dva različna mišična odtiska in sklepno površino heterodontnega tipa.

Stratigrafska in geografska razširjenost: BASTEROT (1825: 87) jih omenja iz najdišč Dax in Saucats v Franciji. HÖRNES (1870: 238) jih omenja iz številnih avstrijskih miocenskih najdišč, predvsem iz Dunajske kotline, ugotovljene

so tudi v Franciji, Italiji, na Češkem, Poljskem, Madžarskem in v Romuniji. Po podatkih FRIEDBERG-a (1934: 113-114) so tovrstne školjke najdene v številnih miocenskih najdiščih Poljske. PAPP (1954: 68) jih omenja iz sarmatijskih plasti Dunajske kotline. BODA (1959: 590) tovrstne školjke omenja iz sarmatijskih plasti na Madžarskem. KOJUMDŽIEVA (1960: 32) predstavlja primerek vrste *Loripes dentatus* iz badenijskih plasti Bolgarije. KOJUMDŽIEVA (1969: 13) jih predstavlja iz spodnjega sarmatija in še piše, da so v Bolgariji ugotovljene tudi v badeniju. NICORICI (1971: 216) predstavlja parvilucine iz sarmatijskih skladov Romunije. ATANACKOVIĆ (1985: 51) piše, da so jih ugotovili v badenijskih skladih Bosne. SCHULTZ (2003: 408-410) jih omenja iz številnih avstrijskih najdišč, ponekod so najdene v eggenburgijskih, drugod v karpatijskih, badenijskih ali sarmatijskih skladih. V podobno starih skladih je tovrstna školjka ugotovljena tudi drugod v Centralni Paratetidi ter v Atlantski in Mediteranski bioprovinci.

Superfamilia Pectinacea Rafinesque, 1815

Familia Pectinidae Rafinesque, 1815

Genus *Macrochlamys* Sacco, 1897

Macrochlamys nodosiformis (Serres, 1837)

Tab. 3, sl. 13

- 1870 *Pecten latissimus* Brocc. – HÖRNES, 395, Taf. 56, Fig. 3-4; Taf. 57, Fig. 3-4
 1936 *Pecten* (*Grandipecten*) *latissimus* Brocc. – FRIEDBERG, 215, Tabl. 35, Fig. 1; Tabl. 36, Fig. 1
 1960 *Chlamys* (*Gigantopecten*) *latissima* var. *nodosiformis* (de Serres in Pusch 1837) – KOJUMDŽIEVA, 70, Tabl. 24, Figs. 1a-1b; Tabl. 25, Fig. 1
 1981 *Chlamys* (*Macrochlamys*) *latissima nodosiformis* (M. Serres in G. Pusch, 1837) – ŠVAGROVSKÝ, 57, Taf. 13, Figs. 1-2; Taf. 14, Fig. 1; Taf. 15, Fig. 1
 1985 *Chlamys* (*Macrochlamys*) *latissimus nodosiformis* (Serres in Pusch, 1837) – ATANACKOVIĆ, 38, Tab. 5, Fig. 3
 1997 *Gigantopecten nodosiformis* (Pusch) – MAJCEN et al., 110, Tab. 3, Sl. 1a-1b
 1998 *Chlamys* (*Macrochlamys*) *latissima nodosiformis* (Serres) – SCHULTZ, 88-89, Taf. 38, Fig. 2
 2001 *Gigantopecten nodosiformis* (Pusch, 1837) – SCHULTZ, 249, Taf. 37, Fig. 2; Taf. 8, Fig. 2
 2014 *Macrochlamys nodosiformis* (de Serres, 1837) – KRIŽNAR & MIKUŽ, 47-48, Sl. 57-58

Material: Školjčna lupina je v biogenem konglomeratu (biokalkruditu), ki sestoji pretežno iz skeletnih delov različnih organizmov, koralinejskih alg - rodoidov, briozojev, redkih polžjih hišic in školjčnih zdrobljenih lupin ter alg. Terenski vzorec 2 (BJ 3132).

Opis: Debela pahljačasta školjčna lupina je močno korodirana, predvsem njen obvršni del, ki je povsem brez ušesc. Ornamentacija razmeroma majhne lupine sestoji iz šestih radialnih širokih reber in s sedmimi vmesnimi žlebovi približno enakih širin. Na sredini žlebov je en manj izrazit radialno potekajoč greben. Po izbočenosti lupine sklepamo, da je ohranjena desna lupina mlajše školjke. Lupina je dolga 82 in visoka 86 mm.

Opomba: Tovrstne miocenske školjke so običajno večje. Vrsta zanesljivo ni sarmatijske starosti, v Centralni Paratetidi so živele do zgornjega badenija. Obstaja možnost, da je lupina presedimentirana iz badenijskih v mlajše sarmatijske plasti.

Stratigrafska in geografska razširjenost: Po podatkih HÖRNES-a (1870: 396-397) je ta pektenidna vrsta najdena v številnih območjih Centralne Paratetide, bila je zelo razširjena

tudi v takratnih bližnjih sedimentacijskih prostorih. FRIEDBERG (1936: 216-217) omenja številna miocenska najdišča tovrstnih pektenov na Poljskem in od drugod. KOJUMDŽIEVA (1960: 71) tovrstno školjko prikazuje iz badenijskih skladov Bolgarije. ŠVAGROVSKÝ (1981: 58) jih omenja iz badenijskih plasti Slovaške, Moravske na Češkem, Avstrije, Madžarske, Bolgarije, Romunije, Poljske in Francije. ATANACKOVIĆ (1985: 38) piše, da so tovrstno pektenidno školjko našli v badenijskih skladih Bosne. SCHULTZ (1998: 88) jih predstavlja iz badenijskih najdišč Wildon na Štajerskem in Grund v Spodnji Avstriji. SCHULTZ (2001: 251-253) poroča, da tovrstna školjka nastopa na avstrijskem samo v badeniju, v preostali Centralni Paratetidi pa je ponekod v karpatiju in badeniju. HARZHAUSER in sodelavci (2003: 334) vrsti *Macrochlamis nodosiformis* (de Serres) pripisujejo razširjenost v Paratetidi izključno v obdobju badenija, v Protomediteranu in Atlantiku pa od zgornjega burdigalija do konca messinija oziroma do začetka pliocena. KRIŽNAR in MIKUŽ (2014: 48) poročata, da so te badenijske školjke našli tudi v kamnolomu Lipovica, drugod v Sloveniji so najdene še v okolici Laškega (MAJCEN et al. 1997), v okolici Šentilja (MIKUŽ 1998), pri Dobruški vasi (MIKUŽ 2009), blizu Podsrede, Podgračenega in drugod.

Tabela 3. Stratigrafska razširjenost mehkužcev iz izkopa za HE Brežice.

Table 3. Stratigraphical distribution of molluscs from the excavation pit for the HPP Brežice.

Mehkužci iz najdišča HE Brežice/ <i>Molluscs from site HPP Brežice</i>	badenij <i>Badenian</i>	sarmatij <i>Sarmatian</i>		
		spodnji <i>Lower</i>	srednji <i>Middle</i>	zgornji <i>Upper</i>
<i>Gibbula angulata</i> (Eichwald, 1829)	+	+	+	
<i>Theodoxus soceni</i> Jekelius, 1944		+	+	+
<i>Cerithium rubiginosum</i> (Eichwald, 1830)		+	+	
<i>Granulolabium pictum</i> (Basterot, 1825)		+	+	
<i>Turritella sarmatica</i> Papp, 1954		+		
<i>Turritella</i> sp. (tab. 1, sl. 10)	+			
<i>Turritella</i> sp. (tab. 1, sl. 11)	+			
<i>Parvilucina dentata</i> (Basterot, 1825)	+	+		
<i>Macrochlamys nodosiformis</i> (Serres, 1837)	+			

Med makrofosili je bilo ugotovljenih sedem rodov mehkužcev z devetimi različnimi oblikami - sedem polžjih in dve školjčni (tabela 3, tabla 3). Polži vrste *Gibbula angulata* (Eichwald, 1829) (tab. 3, sl. 1), *Theodoxus soceni* Jekelius, 1944 (tab. 3, sl. 2), *Cerithium rubiginosum* (Eichwald, 1830) (tab. 3, sl. 3 - 5), *Granulolabium pictum* (Basterot, 1825) (tab. 3, sl. 6 - 8) in *Turritella sarmatica* Papp, 1954 (tab. 3, sl. 9) so spodnesarmatijski, značilni za rizojske in ervilijske plasti. Dve nedoločljivi turiteli *Turritella* sp. (tab. 3, sl. 10, 11) sta najverjetneje badenijski, školjka *Macrochlamys nodosiformis* (de Serres, 1837) (tab. 3, sl. 13) je zanesljivo badenijske starosti. S školjčno vrsto *Parvilucina dentata* (Basterot, 1825) (tab. 3, sl. 12) si pri ugotavljanju starosti plasti ne moremo pomagati, saj je ta vrsta ugotovljena tako v spodnje kot tudi v srednjemiocenskih skladih Centralne Paratetide, Protomediterana in Atlantika.

Sarmatijske brakične polže oziroma zelo podobne brežiškim, smo v Sloveniji ugotovili tudi v miocenskih kamninah Tunjiškega gričevja, v terciarju Posavskih gub in v sarmatijskih mejecih pri Beli Cerkvi na Dolenjskem.

Paleogeografske razmere

Na osnovi fosilne združbe in sedimentno-petrografskih lastnosti kamnin odkritih v izkopu za HE Brežice je bila, kljub relativno omejenemu obsegu, mogoča groba rekonstrukcija okolja sedimentacije na meji badenij/sarmatij in deloma izvora klastičnega materiala. Sedimenti in kamnine imajo značilnosti sedimentacije obrobja bazena, predvsem šelfa, kjer se je nihanje morske gladine odražalo močnejše, kot v globljih delih in sicer tako na zrnivosti sedimenta kot tudi na favni ter na občasnih krajših okopnitvah. Okolje sedimentacije je bilo podobno na območju celotne Krške kotline, ter se vklaplja v razmere širšega območja Centralne Paratetide (npr. STEININGER et al., 1988; HARTZHAUSER & MANDIČ, 2008; in drugi).

V spodnjem delu odkritega zgornjebadenijskega litološkega zaporedja so karbonatni muljevci, ki jih poznamo pod terenskim imenom laporji, z redkimi plastmi karbonatnega do silikatnega peščenjaka (sl. 2, 3b). Sedimentne teksture laporja do laporovca, njegova mineralna sestava in fosilna združba kažejo na globljemorsko okolje sedimentacije brez indikatorjev izvora materiala iz oddaljenih območij. Dobra ohranjenost relativno pogostih organskih ostankov v sedimentu (delno

rastlinskih, delno kerogena) priča o anoksičnih razmerah v času diageneze.

Po mikrofavnistični conaciji GRILL-a (1949) in CÍCHA-e in sodelavcev (1975) ugotovljena združba (vzorca 1) pripada buliminsko-bolivinski coni zgornjega badenija. Veliko število infavnističnih vrst skupine *Pappina/Uvigerina* in skupine *Bolivina/Bulimina* govori v prid združbi, ki je živel na območju zunanjega šelfa z globino 100 do 200 m, z malo kisika pri dnu (STITGER et al., 1998; KOUWENHOVEN et al., 2003) ter s povečano vsebnostjo organskih snovi (KAIHO, 1999; BALDI, 2006). Zelo pogostna epifavnistična vrsta *Cassidulina carinata* je bila prilagojena na stresno okolje, z malo kisika in veliko hranil in najverjetneje v dobro stratificiranem vodnem stolpcu (BALDI & VETÓ, 2007; KOVAČOVA & HUDAČKOVA, 2009). S tem lahko razložimo skromno zastopanost epifavnističnih oksičnih oblik rodov *Heterolepa*, *Cibicidoides* in *Lobatula* (MIKNIČ & HAJEK-TADESSE, 2014). Tako lahko sklepamo na takratne podobne pogoje v raziskovanem sedimentacijskem območju. Dodati je potrebno še, da so v foraminiferni združbi najdeni tudi številni primerki pteropodnih planktonskih polžev rodu *Limacina*, ki so se v Centralni Paratetidi pojavili v začetku zgornjega badenija (BOHN-HAVAS & ZORN, 1993; CÍCHA & ČTYROKA, 1998).

V zgornjem delu badenija proti biostratigrafski meji s sarmatijem se povečuje število plasti z debeložrnatimi sedimenti. Sestavljene so iz dobro sprejetega karbonatnega do silikatnega peščenjaka ter polimiktnega konglomerata. Litoklasti so v glavnem litotamnijski apnenci, bioklasti pa izhajajo iz kopuč litotamnij in velikih moluskov. Silikatni prodniki so pretežno beli kremen in črn do rdeč roženec. V debeložrnati plasti pri meji s sarmatijem so litoklasti, kakor tudi tanke plasti, rjavega premoga, ki pričajo o izrazito anoksičnih pogojih v času diageneze. Navedene debeložrnate klastične kamnine lahko interpretiramo kot drobirske tokove ali kot zapolnitve erozijskih kanalov, kamor so bili sedimenti naplavljeni z vzdignjenih robnih delov bližnje okolice, zgrajenih iz litificiranih spodnjebadenijskih litotamnijskih apnencev in iz govških klastitov domnevne ottnangijske starosti. Tanka premogova plast nad temi sedimenti pa že označuje kopenski močvirnato-jezerski facies, torej emerzijo.

Iz badenija se je po krajši prekinitvi podobna sedimentacija nadaljevala v sarmatij. Drobnožrnati klastiti nakazujejo sedimentacijo v

mirnejšem, vendar plitvem morskem okolju. Pri lociranju meje med badenijem in sarmatijem smo upoštevali tudi lokalno in globalno (Centralna Paratetida) evstatično krivuljo, ki kaže večji upad globine morja ravno na meji med badenijem in sarmatijem (npr. HAQ et al., 1988; NAGYMAROSY & MÜLLER, 1988; HOHENEGGER, et al., 2009 in drugi). Na robu bazena, ki ga predstavlja obravnavano območje, se odraža kot emerzija.

V obdobju sarmatija so bili v Centralni Paratetidi spremenljivi in bolj ali manj morski pogoji (PILLER & HARZHAUSER 2005; HARZHAUSER & PILLER 2007). V spodnjem delu sarmatijskega dela stolpca so karbonatni muljevci s številnimi mehkužci, med katerimi prevladujejo polži iz rodov *Cerithium* in *Granulolabium*. Sediment nakazuje plitvomorsko okolje, številne hišice polžev pa najverjetneje na priobalno območje. Muljevci prehajajo navzgor v karbonatne meljevce z bogato mikrofavno spodnesarmatijske starosti. V tem delu litostratigrafskega stolpca se pojavljajo tudi plasti debelozrnatih resedimentov v obliki karbonatnih klastitov, odnosno kalkarenitov. Sestavljeni so v glavnem iz bioklastov presedimentiranih iz badenijskih kamnin, kar kaže na višji energijski nivo plitvomorskega sedimentacijskega okolja. Vezivo je pretežno drobnozrnati kalcitni cement.

Določene oblike foraminifer rodov *Nonion*, elfidijev brez grebena (*Elphidium hauerinum* in *E. ferentegranulom*) ter *Ammonia* spp. so živele infavnistično, v suboksičnem in evrihalinem okolju, prenesle so velika nihanja v slanosti in so prebivale v plitvem morskem okolju. Na drugi strani imamo elfidije z grebeni, ki so večinoma rastlinojedi, epifavnistični ter prebivalci peščenega in plitvega morskega dna – notranjega šelfa (KOUBOVA & HUDAČKOVA 2010; TOTH et al., 2010). V vzorcu s sarmatijskimi foraminiferami so najdene tudi presedimentirane hišice foraminifer in delov briozojskih skeletov, bodice morskih ježkov in delov alg iz starejših, najverjetneje badenijskih kamnin.

Ugotovljena mikrofavnistična združba pripada v biostratigrafskem smislu v spodnji do srednji sarmatij po tridelni razdelitvi GRILL-a (1949) in PAPP-a (1974). V zadnjem času se uporablja dodelna razdelitev sarmatija (HARZHAUSER & PILLER 2004a, b), pri kateri spodnji ali starejši sarmatij s cono *Mohrensternia* in spodnjim delom cone *Ervilia*, ustrezajo coni luknjičark *Elphidium reginum* in *E. hauerinum*. Zgornji ali mlajši

sarmatij je ekvivalent zgornjemu delu *Ervilia* in *Sarmatimactra* coni, oziroma *Porosononion granosum* coni. Po omenjenem, raziskovana mikrofosilna združba sodi v zgornji del spodnjega sarmatija. Sarmatijske plasti prekrivajo kvartarni sedimenti reke Save, ki v tem članku niso obravnavani.

Zaključki

Paleontološke raziskave fosilnega gradiva in spremljajoče sedimentno-petrografske raziskave v izkopu za HE Brežice nakazujejo, da so sedimenti nastajali v plitvomorskem okolju, v katerem se je spreminjala tako njegova globina, kot tudi energija v okolju. Vsi podatki so skladni v tem, da je v badeniju prevladovalo morsko okolje. Badenijski paket kamnin sestoji pretežno iz karbonatnih meljevcev, kalkarenitov in kalciruditov. Prehod badenija v sarmatij označuje krajša prekinitev sedimentacije in sprememba okolja. Upadala je slanost in zniževala se je globina sedimentacijskega bazena. Rezultat teh sprememb se odraža tako na zastopanosti in obliki organizmov kot tudi v nekoliko debelejši zrnivosti sedimentov.

Biostratigrafska pripadnost badeniju in sarmatiju je določena na osnovi bogate mikro- in makrofavne. Spodaj ležeče plasti spadajo v cono *Bulimina-Bolivina* zgornjega badenija. Plasti so razvite v faciesu Laškega laporja, v katerega smo, za razliko od klasične Laške formacije v Posavskih gubah, uvrstili poleg badenijskih tudi sarmatijske plasti. Nad njimi so plasti spodnjega do srednjega sarmatija, ki po novejši razdelitvi sodijo v zgornji del spodnjega sarmatija. Celotno zaporedje pripada južnemu krilu prostrane Krške sinklinale.

Z geološkega vidika ima izkop poseben pomen zato, ker je bila v njem odkrita litostratigrafska meja badenij/sarmatij, ki je na površini terena najpogostejše prekrita. Pod mejo je značilna makrofosilna združba s školjko *Macrochlamys nodosiformis*, medtem ko so nad mejo spodnesarmatijski polži vrst *Theodoxus soceni*, *Cerithium rubiginosum*, *Granulolabium pictum* in *Turritella sarmatica*, značilni za rizojske in erviljske plasti. Nad regresijskim sedimentom morske obale in kopenskimi lagunsko-jezersko-močvirskim sedimentom s premogom, smo postavili litostratigrafsko mejo badenij/sarmatij. Meja je aproksimativna, saj preko nje ni bil izdelan podroben paleontološki profil; vendar pa emerzija

kaže na sočasno znižanje morske gladine, ki je značilen za celotno Centralno Paratetido prav na meji med badenijem in sarmatijem. Vsekakor gre v badenijskih plasteh za združbo globlje-ga morskega okolja, v sarmatijskih plasteh pa za združbo spreminjajočega plitvejšega okolja z upadajočo slanostjo. Foraminiferna združba je v sarmatijskem vzorcu glede na badenijsko precej reducirana, kar je značilen pojav za plitvovodno okolje in upadajočo slanost.

Gradbena dela so spremljale tudi hidrogeološke in geomehanske preiskave, žal pa brez poglobljenih ostalih geoloških raziskav, predvsem sedimentoloških in paleontoloških. Pri teh bi namreč, poleg neposrednih aplikativnih, pridobili tudi temeljne znanstvene podatke, koristne za boljšo korelacijo in geološko rekonstrukcijo, ne samo ožje temveč tudi širše okolice sedimentacijskega bazena.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla ARRS v okviru programa P1-0025. Zahvaljujemo se kolegici Mariji Horvat (Hrvatski geološki institut) za SEM posnetke foraminiferne in ostrakodne združbe. Zahvalo dolgujemo tudi dr. Dragomirju Skaberneju za koristne napotke in popravke ter kolegoma Tadeju Vodušku iz RGP d.o.o., Velenje in Andreju Unetiču iz HSE INVEST d.o.o. iz Maribora, ki sta nam omogočila ogled in vzorčenje izkopa.

Literatura

- ANIČIĆ, B. & JURIŠA, K. 1985a: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Rogatec. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- ANIČIĆ, B. & JURIŠA, K. 1985b: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tolmač za list Rogatec. Zvezni geološki zavod Beograd, Beograd: 76 p.
- ATANACKOVIĆ, M. A. 1985: Mekušci morskog miocena Bosne. (Mollusques du Miocène marin de la Bosnie). In: ČIČIĆ, S. (ed.): Fosilna fauna i flora, knj. 1. Geologija Bosne i Hercegovine. »Geoinženjering« Sarajevo, Sarajevo: 305 p, (Tab. 1–62).
- BALDI, K. 2006: Paleoceanography and climate of the Badenian (Middle Miocene, 16.4 – 13.00 Ma) in the Central Paratethys based on foraminifera and stable isotope ($\sigma^{18}\text{O}$ and $\sigma^{13}\text{C}$) evidence. *International Journal of Earth Sciences*, 95: 119–142.
- BALDI, K. & VETŐ, I. 2007: Coupling of the benthic foraminifera *Cassidulina carinata* and hydrogen rich, isotopically heavy organic matter indicating algal blooms in the Mid Miocene Paratethys. *Geophysical Research Abstracts*, 9.
- BASTEROT, B. DE 1825: Description géologique du bassin tertiaire du sud-ouest de la France. *Mém. Soc. Hist. Natur. Paris*, 2: 100 p, Pl. 1–7.
- BITTNER, A. 1884: Die Tertiär-Ablagerungen von Trifail und Sagor. *Jb. Geol. Reichsanst.*, 34, Wien.
- BITTNER, A. 1890: Die sarmatischen und vorsarmatischen Ablagerungen der Tertiärbucht von Tüffer – Sagor. *Verh. Geol. R. A. Wien*, Sitzung Nr. 15: 283–290.
- BODA, J. 1959: A Magyarországi szarmata emelet és gerinctelen faunája. *Annales Inst. Geol. Publ. Hung.*, 47/3: 567–862, (Táb. 1–44).
- BOHN-HAVAS, M. & ZORN, I. 1993: Biostratigraphic studies on planktonic gastropods from the Central Paratethys. *Scripta Geol., Spec. Issue*, 2: 57–66.
- BOUCHET, P. & ROCROI J. P. 2005: Classification and Nomenclatur of Gastropod Families. *Malacologia*, 47/1–2: 397 p.
- CICHA, I. & ČTYROKA, J. 1998: The Carpathian Foredeep. In: CICHA, I., RÖGL, F. & ČTYROKA, J. (eds.): *Oligocene – Miocene foraminifera of the Central Paratethys*. *Abh. Senk. Naturforsch. Ges.*, 549: 17.
- COSSMANN, M. & PEYROT, A. 1917–1924: *Conchologie néogénique de l'Aquitaine*. *Actes Soc. Linn. Bordeaux*: T. 69–74.
- CICHA, I., ČTYROKA, JIŘÍČEK, R. & ZAPLETALOVA, I. 1975: Principal biozones of the Late Tertiary in the eastern Alps and West Carpathians. In: CICHA, I. (ed.): *Biozonal division of the Upper tertiary Basins of the eastern Alps and West Carpathians*. *IUGS Proceedings of the VIth Congress, Bratislava, September 1975*: 19–34.
- ČORIĆ, S., PAVELIĆ, D., RÖGL, F., MANDIĆ, O., VRABAC, S., AVANIĆ, R., JERKOVIĆ, L. & VRANJKOVIĆ, A. 2009: Revised Middle Miocene datum for initial marine flooding of North Croatian Basins (Pannonian Basin System, Central Paratethys). *Geologia Croatica*, 62/1: 31–43.
- DROBNE, K., OGORELEC, B., PAVŠIĆ, J. & PAVLOVEC, R. 2009: Paleocen in eocen v Jugozahodni Sloveniji. Paleocene and Eocene in south-western Slovenia. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (ed.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 311–372.
- FRIEDBERG, W. 1911–1928: *Mieczaki Miocénskie Ziemi Polskich*. (Mollusca miocaenica Poloniae). Pars I. *Gastropoda et scaphopoda*.

- Nakladem muzeum imienia Dzieduszyckich we Lwowie (Lwów i Poznań): VII, 631 p., Tabl. 1–38.
- FRIEDBERG, W. 1934–1936: Mieczaki Miocénskie Ziem Polskich. (Mollusca miocaenica Poloniae). Pars II. Lamellibranchiata. Wydano z zasiłku funduszu kultury narodowej (Kraków): 283 p., Tabl. 1–56.
- FUCHS, T. 1875a: Die Tertiärbildungen von Stein in Krain. Verh. Geol. R. A. Wien, Sitzung Nr. 3: 48–49.
- FUCHS, T. 1875b: Über das Auftreten von Miocänschichten vom Charakter der sarmatischen Stufe bei Syrakus. Sitzungsab. Akad. Wiss. mathem.-naturwiss. Kl., 70: 106–109.
- GRATELOUP, J. P. S. DE 1840: Conchyliologie fossile des terrains Tertiaires du bassin de l'Adour. Tome 1, Univalves, Atlas. Imprimeur de Th. Lafargue, Libraire, (Bordeaux).
- GRILL, R. 1949: Stratigraphische Untersuchungen mit Hilfe von Mikrofaunen im Wiener Becken und den benachbarten Molasse-Anteilen. Öl Khole, 31/15: 595–603.
- HAQ, B.U., HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. 1988: Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea level changes. In: WILGUS, C.K. (ed.): Sea-Level Changes – An Integrated Approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Spec. Publ., 42: 71–108.
- HARZHAUSER, M., DAXNER-HÖCK, G., GÖHLICH U. & NAGEL, D. 2011: Complex faunal mixing in the early Pannonian palaeo-Danube Delta (Late Miocene, Gaweinstal, Lower Austria). Ann. Naturhist. Mus. Wien. Ser. A, 113: 167–208.
- HARZHAUSER, M. & KOWALKE, T. 2001: Early Miocene brackish-water Mollusca from the Eastern Mediterranean and from the Central Paratethys – a faunistic and ecological comparison by selected faunas. (Brakičtí měkkýši spodnomiocenního stáří z východního Středomoří a centrální Paratethydy – faunistické a ekologické srovnání vybraných faun). Journ. Czech Geol. Soc., 46/3: 353–374.
- HARZHAUSER, M. & KOWALKE, T. 2002: Sarmatian (Late Miocene) Gastropod Assemblages of the Central Paratethys. Facies, 46: 57–82, (Pl. 9–13).
- HARZHAUSER, M., MANDIĆ, O. & ZUSCHIN, M. 2003: Changes in Paratethyan marine molluscs at the Early/Middle Miocene transition: diversity, palaeogeography and palaeoclimate. Acta Geologica Polonica, 53/4: 323–339.
- HARZHAUSER, M. & PILLER, W. E. 2004a: The Early Sarmatian – hidden seesaw changes. Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, 246: 89–111, (Pl. 1–3).
- HARZHAUSER, M. & PILLER, W. E. 2004b: Integrated stratigraphy of the Sarmatian (Upper Middle Miocene) in the western Central Paratethys. Stratigraphy 1: 65–86.
- HARZHAUSER, M. & PILLER, W. E. 2007: Benchmark data of a changing sea – paleogeography, paleobiogeography and events in the Central Paratethys during the Miocene. Paleogeogr. Paleoclimat. Paleoecol., 253: 8–31.
- HARZHAUSER, M. & MANDIĆ, O. 2008: Neogene lake systems of Central and South-Eastern Europe: Faunal diversity, gradients and interrelations. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 260: 417–434.
- HILBER, V. 1881: Ueber das Miocän, insbesondere das Auftreten sarmatischer Schichten bei Stein in Krain. Jb. Geol. R. A. Wien, 31: 473–478.
- HILBER, V. 1883: Ueber eine neue Fossilsendung aus der Miocän-Bucht von Stein in Krain. Verh. Geol. R. A. Wien, Sitzung Nr. 11: 175–179.
- HILBER, V. 1897: Die sarmatischen Schichten vom Waldhof bei Wetzelsdorf, Graz SW. Mitt. Naturwiss. Vereines Steiermark, Jg. 1896, 33: 182–204, Taf. 1.
- HLADILOVÁ, Š. & FORDINÁL, K. 2013: Upper Badenian Molluscs (Gastropoda, Bivalvia, Scaphopoda) from the Modra-Kráľ'ová locality (Danube Basin, Slovakia). Mineralia Slovaca, 45: 35–44.
- HOERNES, R. 1875: Tertiär Studien. VI. Ein Beitrag zur Kenntniss der Neogen-Fauna von Süd-Steiermark und Kroatien. Jb. Geol. R. A., 25/1: 63–78, Taf. 2–3.
- HOHENEGGER, J., RÖGL, F., ČORIĆ, S., PERVESLER, P., LIRER, F., ROETZEL, R., SCHOLGER, R. & STINGL, K. 2009: The Styrian Basin: a key to the Middle Miocene (Badenian/Langhian) Central Paratethys transgressions. Austrian Journal of Earth Sciences, 102: 102–132.
- HÖRNES, M. 1856: Die Fossilen Mollusken des Tertiaer-Beckens von Wien. Bd. I: Univalven. Abh. Geol. R. A., 3: 1–736, Taf. 1–52.
- HÖRNES, M. 1870: Die Fossilen Mollusken des Tertiaer-Beckens von Wien. Bd. II, Bivalven. Abh. Geol. R. A., 4: 1–479, Taf. 1–85.
- HORVAT, A. 2004: Srednjemiocenske kremenice alge Slovenije. ZRC, SAZU, Ljubljana: 255 p.
- JURIŠIČ-POLŠAK, Z. 1979: Miocenske i pliocenske neritide u Hrvatskoj = Miozäne und Pliozäne Neritiden in Kroatien. Palaeont. Jugoslavica, 22: 1–50, Tab. 1–10.

- KAIHO, K. 1999: Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen indeks (BFOI). *Marine Micropal.*, 37: 67–76.
- KOJUMDŽIEVA, E. 1960: Vienski tip torton. = Le Tortonien du type viennois. In: KOJUMDŽIEVA, E. & STRAŠIMIROV, B. (eds.): Fosilite na B'lgarija. VII, Torton. = Les fossiles de Bulgarie. VII, Tortonien. B'lgarska akademija na naukite, Sofija: 317 p., Tab. 1–59.
- KOJUMDŽIEVA, E. 1969: Fosilite na B'lgarija. VIII, Sarmat = (Les fossiles de Bulgarie. VIII, Sarmatien. B'lgarska akademija na naukite, Sofija: 223 p., (Tab. 1–40).
- KÓKAY, J. 1966: A Herend – Márkói barnakőszén-terület földtani és őslénytani vizsgálata. = Geologische und paläontologische untersuchung des Braunkohlengebietes von Herend – Márkó (Bakony-Gebirge, Ungarn). *Geol. Hungarica*, ser. *Palaeontologica*, 36: 1–149, (Táb. 1–15).
- KOUBOVA, I. & HUDAČKOVA, N. 2010: Foraminiferal successions in the shallow water Sarmatian sediments from the MZ 93 borehole (Vienna Basin, Slovak part). *Acta Geologica Slovaca*, 2/1: 47–58.
- KOUWENHOVEN, T. J., HILGEN, F. J. & VAN DER ZWAAN, G. J. 2003: Late Tortonian – early Messinian stepwise disruption of the Mediterranean connections: constraints from benthic foraminiferal and geochemical data. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, 198: 303–319.
- KOVAČOVA, P. & HUDAČKOVA, N. 2009: Late Badenian foraminifers from the Vienna Basin (central Paratehys): Stable isotope study and paleoecological implications. *Geol. carpathica*, 60/1: 59–70.
- KRIŽNAR, M. & MIKUŽ, V. 2014: Kamnolom Lipovica in njegove paleontološke zanimivosti = Lipovica quarry and its interesting paleontological characteristics. *Scopolia*, 82: 1–120.
- KUŠČER, D. 1967: Zagorski terciar. *Geologija*, 10: 5–58.
- LOEBLICH, A. R. JR. & TAPPAN, H. 1987: Foraminiferal genera and their classification. Van Nostrand, Reinhold Co. New York: 970 p., 847 pls.
- LUKENEDER, S., M. ZUSCHIN, HARZHAUSER M. & MANDIC, O. 2011: Spatiotemporal signals and palaeoenvironments of endemic molluscan assemblages in the marine system of the Sarmatian Paratehys. *Acta Paleontologica Polonica*, 56/4: 767–784.
- MANDIC, O., HARZHAUSER, M., ROETZEL, R. & TIBULEAC, P. 2008: Benthic mass-mortality events on a Middle Miocene incised-valley tidal-flat (North Alpine Foredeep Basin). *Facies*, 54: 343–359.
- MAJČEN, T., MIKUŽ, V. & POHAR, V. 1997: Okamnine v paleontološki zbirki Laškega muzeja. *Geološki zbornik*, 13: 104–118, (Tab. 1–11).
- MARKIČ, M., 2009: Pliocen in pliokvartar = Pliocene and Plioquaternary. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 427–440.
- MIKNIĆ, M. & HAJEK-TADESSE, V. 2014: Determination and analysis of microfossils fauna from two samples HE Brežice 1 and HE Brežice 2 from Bizeljsko area (Eastern Slovenia). *Hrvatski geološki institut, Zagreb*: 1–5. (Arhiv GZS)
- MIKUŽ, V. 1998: Srednjemiocenske pektinide iz bližnje okolice Šentilja (SV Slovenija) = Middle Miocene Pectinids from vicinity of Šentilj (NE Slovenia). *Razprave 4. razreda SAZU*, 39/3: 81–135, (Tab. 1–10).
- MIKUŽ, V. 2009: Srednjemiocenska pokrovača iz Dobruške vasi na Dolenjskem = A Middle Miocene scallop from Dobruška vas in Dolenjska, Slovenia. *Folia biologica et geologica*, 50/2: 79–89, (Tab. 1–2).
- MIKUŽ, V., ŠOSTER, A. & RAVNJAK, M. 2015: Kostni ostanki delfina (Odontoceti) iz meljevecev gradbene jame hidroelektrarne Brežice = The dolphin bone remains (Odontoceti) from siltstone in excavation pit for the hydroelectric station Brežice, Slovenia. *Folia biologica et geologica*, 56/2: 109–123, (Tab. 1–2).
- MORKHOVEN, F.P.C.M. VAN 1962: Post – Paleozoic Ostracoda. Their Morphology, Taxonomy and Economic Use. Vol. 1, General. Elsevier Publ. Co. Amsterdam-London-New York: 204 p.
- NAGYMAROSY, A. & MÜLLER, P. 1988: Some Aspects of Neogene Biostratigraphy in the Pannonian Basin. In: ROYDEN, L. H. & HORVÁTH, F. (eds.): 1988: *The Pannonian Basin*. AAPG Memoir 45: 69–87.
- NICORICI, E. 1971: Fauna sarmatiană de la Vîrciorog (Bazinul Vadului). *Studii și cercetări de geol., geofiz., geograf.*, Ser. geologie, 16/1: 215–232, Pl. 1–7.
- OTONIČAR, B. & CIMERMAN, F. 2006: Facialna analiza, biostratigrafija in depozicijski model srednjemiocenskih karbonatnih kamnin med Krško vasjo in Obrežjem. In REŽUN, B., ERŽEN, U., PETRIČ, M. & GANTAR, I (eds.): *Zbornik povzetkov. 2. Slovenski Geološki Kongres, Idrija*, 26–28. sept. 2006, str. 71.

- PAPP, A. 1954: Die Molluskenfauna im Sarmat des Wiener Beckens. Mitt. Geol. Gesselsch. Wien (1952), 45: 1–112, Taf. 1–20.
- PAVŠIČ, J. & HORVAT, A. 2009: Eocen, oligocen in miocen v osrednji in vzhodni Sloveniji. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 373–426.
- PILLER, W. E. & HARZHAUSER, M. 2005: The myth of the brackish Sarmatian Sea. Terra Nova, 17: 450–455.
- PINNA, G. 1989: Il Grande Libro dei Fossili. Biblioteca universale Rizzoli (Milano): 1–381, (Tav. 1–200).
- POLJAK, M. 2015: Geološka karta Krške kotline 1:25 000. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana. Manuskript.
- RIŽNAR, I., MILETIĆ, D., VERBIČ, T. & HORVAT, A. 2002: Srednjemiocenske kamnine severnega pobočja Gorjancev med Čatežem in Kostanjevico = Middle Miocene sediments on the northern part of Gorjanci between Čatež and Kostanjevica (SE Slovenia). Geologija, 45/2: 531–536, [doi:10.5474/geologija.2002.060](https://doi.org/10.5474/geologija.2002.060).
- ROSSI RONCHETTI, C. 1951–1957: I tipi della »Conchologia fossile subapennina« di G. Brocchi. Riv. Italiana Paleont. Stratigr., Mem., 5/1–2: 1–343.
- SAJOVIC, G. 1909: Ein Beitrag zur Geschichte der Steiner Alpen. Carniola, 2: 24–29.
- SCHULTZ, O. 1998: Tertiärfossilien Österreichs. Wirbellose, niedere Wirbeltiere und marine Säugetiere. Goldschneck-Verlag (Korb): 159 p.
- SCHULTZ, O. 2001: Bivalvia neogenica (Nuculacea – Unionacea). In: PILLER, W. E. (ed.): Catalogus Fossilium Austriae. Band 1/Teil 1. Ein systematisches Verzeichnis aller auf österreichischem Gebiet festgestellten Fossilien. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Wien): XLVIII, 1–379, Taf. 1–56.
- SCHULTZ, O. 2003: Bivalvia neogenica (Lucinoidea – Mactroidea). In: PILLER, W. E. (ed.): Catalogus Fossilium Austriae. Band 1/Teil 2. Ein systematisches Verzeichnis aller auf österreichischem Gebiet festgestellten Fossilien. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Wien): X, 381–690, Taf. 57–95.
- STEININGER, F.F., MÜLLER, C. & RÖGL, E. 1988: Correlation of Central Paratethys, Eastern Paratethys and Mediterranean Neogene Stages. In: ROYDEN L. R. & HORVATH, F. (eds.): The Pannonian Basin. AAPG Memoir 45: 79–87.
- STIGTER, H. C., JORISSEN, F. J. & VAN DER ZWAAN, G. J. 1998: Bathymetric distribution and microhabitat partitioning of live (Rose Bengal stained) benthic Foraminifera along a shelf to bathial transect in the southern Adriatic Sea. Journ. Foram. Res., 28/1: 40–65.
- SUESS, E. 1866: Untersuchungen über den Charakter der österreichischen Tertiärbagerungen. II. Über die Bedeutung der sogenannten »brackischen Stufe« oder der »Cerithienschichten«. Sitzungsab. Akad. Wiss. mathem.-naturwiss. Cl., Abt. 1, 54: 218–257.
- ŠIKIĆ, K., BASCH, O. & PIKIJ, M. 1978: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Zagreb. Savezni geološki zavod Beograd.
- ŠIKIĆ, K., BASCH, O. & ŠIMUNIĆ, A. 1979: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Zagreb. Savezni geološki zavod Beograd, Beograd: 81 p.
- ŠVAGROVSKÝ, J. 1981: Lithofazielle Entwicklung und Molluskefauna des oberen Badenians (Miozän M_{4d}) in dem Gebiet Bratislava – Devínska Nová Ves. Západné Karpaty, sér. paleontológia, 7: 5–204, Taf. 1–53.
- TĂMAȘ, D., A. TĂMAȘ & POPA, M. V. 2013: Early Sarmatian (Middle Miocene) molluscs from Răcăștia (Romania). Acta Palaeont. Romaniae, 9/1: 67–81.
- TELLER, F. 1907: Geologische Karte der Osterr.-Ungar. Monarchie. Cilli – Ratschach, Wien.
- TOTH, E., GÖRÖG, A., LÉCUYER, C., MOISSETTE, P., BALTER, V. & MONOSTORI, M. 2010: Paleoenvironmental reconstruction of the Sarmatian (Middle Miocene) Central Paratethys based on paleontological and geochemical analyses of foraminifera, ostracods, gastropods and rodents. Geol. Mag., 147/2: 299–314.
- VADÁSZ, E. 1960: Magyarország földtana. Akadémiai Kiadó, Budapest: 646 p, (Táb. 1–51).
- WENZ, W. 1938: Gastropoda. Teil 1: Allgemeiner Teil und Prosobranchia. Handbuch der Paläozoologie, 6. Gebrüder Borntraeger, Berlin: 1200 p.



Mofete v Slovenskih goricah

Mofettes in Slovenske gorice, Slovenia

Laura GABOR¹ & Nina RMAN²

¹Laura Gabor, Tropovci, Kolesarska ulica 72, SI-9251 Tišina; e-mail: laura.gabor666@gmail.com

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

Prejeto / Received 12. 9. 2016; Sprejeto / Accepted 3. 11. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Ključne besede: mofeta, razplinjevanje CO₂, mineralna voda, slatina, batimetrični 3D model, Ščavniška dolina, Radenci, Slovenija

Key words: mofette, CO₂ degassing, mineral water, slatina, bathymetric 3D model, Ščavniška dolina, Radenci, Slovenia

Izvleček

Pojavi naravnih izvirov CO₂ in vode z veliko prostega plina v Sloveniji so poznani predvsem v Slovenskih goricah. S terenskim delom v letih 2014–2015 smo hidrogeološko opisali enajst izvirov vode in/ali plina: Ihovska slatina, Ivanjševska slatina, Lokavska slatina, Polička slatina, Radvenska slatina, mofeta Rihtarovci, Stavešinske Slepice, Stavešinske mofete Strmec, Ujterska slatina, Verjanska slatina in Žekš. Za pet nezajetih izvirov smo ugotovili, da lahko premer presega 4 m, globina dna pa 2 m, čeprav je njihov obseg večinoma skromnejši. Izdelali smo batimetrične 3D modele izvirnega območja ter na tlorisu označili mesta izhajanja plina in ocenili intenzivnost dotoka po subjektivni, vizualni petstopenjski lestvici. Izmerili smo tudi fizikalno-kemijske parametre vode. Opazovane pojave smo razvrstili med *mofete* in *mineralne vode*. Dve sta mokri *mofeti* (Polička slatina in Slepice), tri pa suhe (mofeta Rihtarovci, mofeta Strmec, mofeta pri Lokavski slatini). Iz njih stalno izhaja hladen CO₂, površinska ali padavinska voda je kislja, v okolici pa je opazno spremenjeno rastje in/ali gola tla. *Mineralna voda* z nad 1 g/l skupnih raztopljenih snovi izvira v Ihovski, Ivanjševski in Radvenski slatini ter Žekšu in je bogata s prostim CO₂ z intenzivnostjo izhajanja plina 2–4. Verjanska in Ujterska slatina nista niti *mofeti* niti *mineralni vodi*. Prva je mogoče, tako kot večina, *slatina*, z nad 250 mg/l prostega CO₂ (CO₂)_g. Povezave med globino dna izvira in intenzivnostjo izhajanja plina na vodni površini nismo našli.

Abstract

Natural CO₂ springs and groundwater rich in free gas in Slovenia occur mainly in the Slovenske gorice hills. Within the frame of fieldwork performed in 2014–2015 we investigated 11 springs: Ihovska slatina, Ivanjševska slatina, Lokavska slatina, Polička slatina, Radvenska slatina, Mofette Rihtarovci, mofettes Stavešinske Slepice, and Strmec, Ujterska slatina, Verjanska slatina and Žekš. The diameter of five uncaptured springs can exceed 4 m, with depression depths of 2 m, but most are smaller. We elaborated bathymetric 3D models of these spring areas, marked degassing locations in a plan view, and evaluated the gas flux according to a subjective, visual five-level scale. We also measured physicochemical parameters of the water. The observed phenomena were classified among *mofettes* and *mineral waters*. Two are wet *mofettes* (Polička slatina and Slepice) and three dry *mofettes* (Rihtarovci, Strmec, mofette at Lokavska slatina). These constantly emit cold CO₂, hold acid surface or meteoric water, and bare soil or changed vegetation may also be present. *Mineral water* consisting of more than 1 g/l of total dissolved solids surfaces at Ihovska, Ivanjševska and Radvenska slatina, and Žekš. It is rich in free CO₂, having a flux intensity of 2–4. Verjanska slatina and Ujterska slatina are neither *mofettes* nor *mineral waters*. The first, like most others, may be a *slatina*, having more than 250 mg/l of free CO₂ (CO₂)_g. We found no connection between the depth of the springs and the intensity of gas emissions.

Uvod

Naravni izviri plinov se pojavljajo tako na vulkanskih kot nevulkanskih območjih. V Evropi so raziskani številni naravni izviri metana (MINISSALE et al., 2000; ETIOPE, 2009), tisti na Hrvaškem so na žalost že presahnili (MARKIČ, 2013). V tem prispevku se posvečamo naravnim izvirom ogljikovega dioksida. Najpogostejše jih opredeljujejo kot posebno vrsto *fumarol* in jih imenujejo *mofete*. *Mofete* so najpogostejše v bližini vulkanov, njihove raziskave potekajo na primer v Kaliforniji (ZDA) (EVANS et al., 2002) in Romuniji (VASELLI et al., 2002), ter na območjih s hidrogeotermalnim sistemi, včasih tudi vezanimi na vulkane. Takšni primeri so jarek Salton v Kaliforniji (ZDA) in Taupo vulkanska cona na Novi Zelandiji (DERRILL et al., 1995), Dixie Valley v Nevadi (ZDA) (BERGFELD et al., 2001), Liu–Huang–Ku na Tajvanu (LAN et al., 2007) idr. Na nevulkanskih območjih se izviri CO₂ pojavljajo ob izrazitih aktivnih prelomih, kot na primer v Marmara regiji v SZ Turčiji (DOĞAN et al., 2009), ob prelomih Sv. Andreja in Calaveras v Kaliforniji (ZDA) (LEWICKI et al., 2003), v osrednji Italiji (ROGIE et al., 2000), v Mefite d'Ansanto v južni Italiji (CHIODINI et al., 2010) in na Oherský příkop (Eger Rift) v zahodni Češki (ALBU et al., 1997; KÄMPF et al., 2013).

Zahodna Češka je Sloveniji podobno nevulkansko območje z aktivnimi prelomi in številnimi *mineralnimi izviri* in *mofetami* s hladnim CO₂ iz plašča. KÄMPF et al. (2013) opisujejo suhe in mokre *mofete*, pri čemer so NICKSCHICH et al. (2015) ugotovili, da se velike količine CO₂ (tudi nad 100 kg/dan) sproščajo iz kotanj, ki so široke manj kot 1 m. Poleg takšnega koncentriranega iztoka se pojavljajo tudi območja z difuznim izhajanjem plina, s posameznimi mehurčki. Za ločnico med difuznim in koncentriranim izhajanjem predlagajo ocenjen tok prostega CO₂ nad 500 g/dan/m² (kar znese 11,1 l/h/m² pri p = 1 atm in T = 12 °C) za slednjo. SAUER et al. (2013) omenjajo, da je difuzno izhajanje brez podrobnih geofizikalnih meritev opazno le v primeru tako močnega in stalnega dotoka plina, da spremeni rastje. Na najbolj izpostavljenih mestih geogeni CO₂ nadomesti kisik v tleh in ustvari hipoksične ali celo anoksične pogoje, zato tam uspeva le posebna vegetacija (VODNIK et al., 2002, 2009). Ta vpliv so slovenski raziskovalci opazovali pri *mofetah* pri Stavešincih v Slovenskih goricah, imenovanih Strmec in Slepice. OGOREVC (2008) je meril tok CO₂ in vsebnost vode v tleh in ugotovil, da je v najožjem območju Strmca stalen skozi celo leto. MAČEK (2013) je ugotavljal vpliv abiotskih

dejavnikov okolja na biodiverziteto in strukturo združb mikrobov. Ker je vsebnost CO₂ v tleh na najožjem območju *mofet* tudi nad 99 vol% (WEINLICH et al., 1998), lahko ob njih pogosto najdemo mrtve manjše živali, včasih pa so nevarne celo za ljudi (CHIODINI et al., 2010).

Ob izviri CO₂ poteka intenzivna interakcija med plini, kamnino, tlemi in podzemno in/ali površinsko vodo, ki lahko povzroči mobilizacijo kovin (MEHLHORN et al., 2014) ali nastanek visokomineraliziranih voda (WEINLICH et al., 1998; VASELLI et al., 2002; ŽLEBNIK, 2009 in številni tuji avtorji). WEINLICH in sodelavci (1998) so raziskovali izvor in tok CO₂ v 74 *mineralnih vodah* na Češkem, pri čemer so vključili *mofete* s skupnimi raztopljenimi snovmi (TDS) med 78 in 5407 mg/l ter izvire s TDS 126–4290 mg/l. Sklepajo, da ponekod plin pospešuje iztekanje tople in mineralizirane vode iz globin na površje, pri čemer ne omenjajo možnosti, da migrira le plin in pospešuje raztapljanje kamnin v plitvih vodonosnikih. Mineralni izviri v Počátky-Plesná prelomni coni na Češkem (KÄMPF et al., 2013) imajo pH vrednost približno 4,4, elektroprevodnost (EC) 114–349 µS/cm in pogosto tudi rdečkaste oborine.

V Slovenskih goricah, na območju med Lenartom, Gornjo Radgono in Radenci, t.j. v dolini reke Ščavnice ter na desnem bregu reke Mure pri Radencih, je poznanih največ naravnih izvirov plina in *mineralne vode* v Sloveniji (NOVAK, 1974–1977; ŽLEBNIK, 1978a,b, 1980; MIOČ, 1996, 1997). Nekateri izviri so zavarovani kot naravne vrednote (NARAVOVARSTVENI ATLAS, 2013). *Mineralne vode* običajno vsebujejo vsaj 1 g/l skupnih raztopljenih snovi ali nad 1 g/l prostega CO₂ (CO₂)_g (MIOČ, 1996). Te *mineralne vode* so pomembne za zdravljenje obolenj in pridobivanje pijač, saj v Boračevi deluje največja polnilnica *naravne mineralne vode* v Sloveniji, Radenska d.d. Izraz *naravna mineralna voda* se uporablja le za ustekleničene vode, ki imajo lahko zelo različno vsebnost skupnih raztopljenih snovi in/ali plinov (glej URADNI LIST RS, 2004, 2005, 2008). Številni izviri so poimenovani po bližnjih domačijah ali krajih in marsikatero ime vsebuje izraz *vrelec* ali *slatina*. Medtem ko *vrelec* običajno pomeni mesto, kjer podzemna voda naravno ali umetno izteka na površje (PAVŠIČ et al., 2006), *slatina* pogosto označuje kislo mineralno vodo oziroma njen izvir (BEZLAJ, 1995). Ker ponekod iztekata tako podzemna voda kot plin, fizikalno-kemijske lastnosti teh voda pa so izredno raznolike, se zdi raba izrazov problematična ali pa vsaj

nedosledna. Težave z enoznačno opredelitvijo, kaj je *mofeta*, *mineralna voda* in *slatina*, so opazne tudi v svetovni literaturi.

Namen pričujočega prispevka je prikazati rezultate hidrogeološkega kartiranja enajstih izvirov vode in/ali plina v Slovenskih goricah, ki obsega opis fizikalno-kemijskih lastnosti vode, pojavov prostega plina ter izris batimetričnih 3D kart naravnih izvirov. Na podlagi teh rezultatov smo preiskane izvire oziroma vode razvrstili med *mineralne vode*, *mofete* oziroma *slatine*.

Geološki opis območja

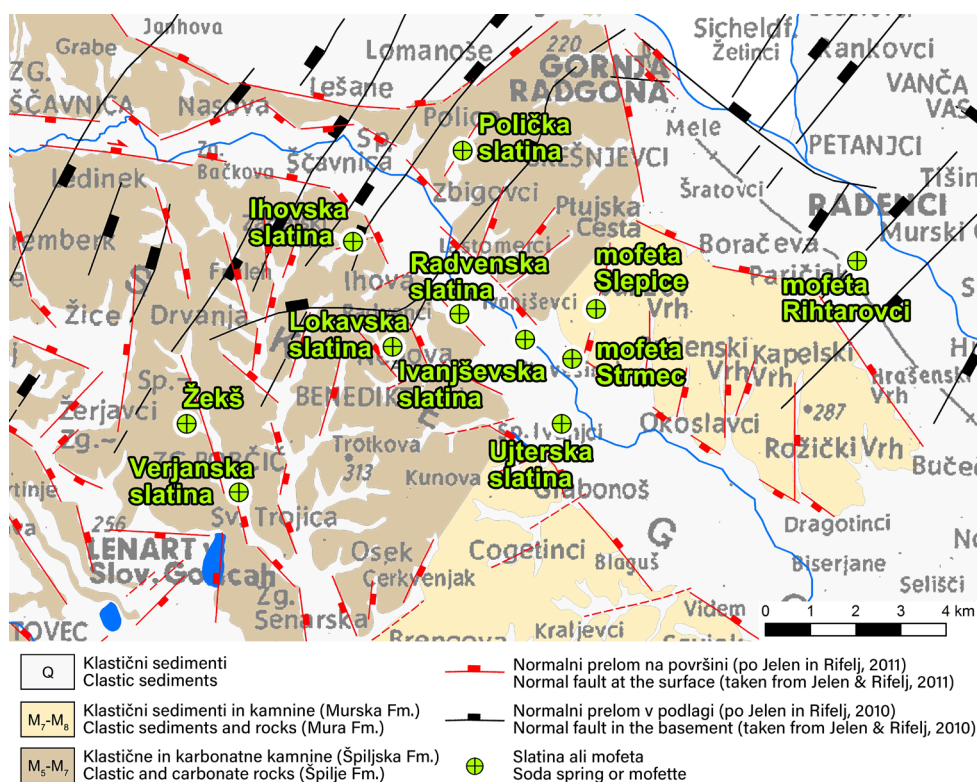
Raziskano območje obsega osrednji del Slovenskih goric med Lenartom, Gornjo Radgono in Radenci, torej predvsem Ščavniško dolino in Radence ter okoliške vrhove do približno 300 m n.v. (sl. 1). V Gornji Radgoni v subpanonskem podnebju znaša povprečna letna količina padavin za obdobje 1961–1990 le 926 mm, temperatura zraka pa 9,5 °C (ARSO, 2016).

Geološka zgradba je podana na OGK SFRJ 1:100.000, na listih Maribor in Čakovec ter njunih tolmačih (MIOČ & ŽNIDARČIČ, 1987; MIOČ & MARKOVIČ, 1998). V zadnjih letih je bila podrobneje raziskana v okviru več mednarodnih projektov, npr. TRANSTHERMAL (LAPANJE et al., 2007),

T–JAM (JELEN & RIFELJ, 2011; NÁDOR et al., 2012), TRANSENERGY in GeoMol (ŠRAM et al., 2015) ter z drugimi raziskavami (LUČIĆ et al., 2001; FODOR et al., 2002, 2005; JELEN et al., 2006; PAVŠIČ & HORVAT, 2009). Slovenske gorice pripadajo geotektonski enoti Panonskega bazena (PLENIČAR & NOSAN, 1958), ki je nastal s pogrezanjem in ekstenzijo sedimentacijskih bazenov Centralne Paratetide ob trku Jadranske in Evropske litosferske plošče v miocenu (SAFTIĆ et al., 2003; VRABEC et al., 2009; HORVÁTH et al., 2015).

Teren je presekán s prelomi različnih smeri (JELEN, 2010; JELEN & RIFELJ, 2011). Med Benediktom in Hodošem ter naprej na Madžarsko v kamninah predneogenske podlage Mursko-zalskega bazena poteka Rabska prelomna cona, ob kateri je razvit Radgonsko-vaški subbazen. Njegov južni rob se dviga proti preiskanemu območju, ki že leži na Murskosoboškem ekstenzijskem bloku (JELEN & RIFELJ, 2005; JELEN et al., 2006; JELEN, 2010), kjer je globina do podlage tudi manj kot 500 m.

Na pretežno paleozojske metamorfne kamnine v podlagi bazena so diskordantno odloženi neogenski sedimenti Špiljske in Murske formacije (sl. 1), medtem ko vmesna Lendavska formacija tu ni razvita (JELEN & RIFELJ, 2011). Špiljska formacija je sestavljena iz Selniškega in Oseškega člena. Selniški člen (srednji badenij do sarmatij)



Sl. 1. Poenostavljena litostratigrafska zgradba obravnavanega območja. Povzeto po JELEN, 2010; JELEN & RIFELJ, 2011. Več podatkov je v tabeli 1.

Fig. 1. Simplified lithostratigraphic map of the investigated area. Modified after JELEN, 2010; JELEN & RIFELJ, 2011. More data is given in Table 1.

gradi menjavanje peska, peščenjaka, peščenega in meljastega laporja/laporovca, melja, meljevca, laporaste in meljne gline in konglomerata ter lokalno peščenimi algi in oolitni apnenec. Oseški člen (spodnji panonij) je v zgornjem delu sestavljen iz menjavanja peščenega laporovca, peska in redkih plasti peščenega proda, v spodnjem delu pa iz peščenega laporovca, glinastega laporja, laporaste gline in peščenega proda. Cogetinško-Kuzemski člen Murske formacije (zgornji del spodnjega panonija do zgornji pontij) tvori menjavanje meljaste gline, gline, melja, glinastega, prodnega in peščenega melja, peska, meljastega in prodnatega peska, proda in vložkov fragmentov dreves. Najmlajše so kvartarne aluvialne terase, sestavljene iz proda, peščenega in glinastega proda in prodnatega peska, ter peščena glina.

Hidrogeološki opis območja

Turbiditni peščenjaki ali redkeje apnenci Špiljske formacije tvorijo razmeroma izolirane lokalne vodonosnike, ki so ponekod bogati z *mineralno* (TDS > 1 g/l) in *termomineralno* (TDS > 1 g/l in temperatura vode nad 20 °C) vodo ter prostimi plini (ŽLEBNIK, 1974, 1978a,b; Szócs et al., 2013). Zanje je značilna razmeroma slaba prepustnost in nizka izdatnost. Slabo sprijeti peski deltnega čela Murske formacije tvorijo najpomembnejši regionalni in čezmejni geotermalni vodonosnik v SV Sloveniji (RMAN et al., 2012, 2016; Tóth et al., 2016), a ker na preiskanem območju izdajajo predvsem slabše prepustne plasti deltne ravnice, so razviti predvsem lokalni in manj izdatni vodonosniki. Z izdatnimi kvartarnimi aluvialnimi vodonosniki se v članku ne ukvarjamo.

Naravni izviri *slatin* v Benediktu (KRALJ, 2007), Lenartu (NOVAK, 1974–1977; SENEKOVIČ 2011), Pesnici (ŽLEBNIK, 1978b), Nuskovi (NOSAN, 1973; ŽLEBNIK, 1974), Ščavniški dolini in Radencih (NOSAN, 1973; ŽLEBNIK, 1978a,b; PEZDIČ, 1991; BAGAR POVŠE et al., 2007; KOKOL, 2008; VRZEL, 2012; RMAN & KANDUČ, 2015) so poznani že dolgo, a zajem in turizem v Radencih na osnovi »radenske slatine« se je pričel šele konec 19. stoletja (ŽLEBNIK, 1978a, 1980). ŽLEBNIK (1975, 2009) meni, da izviri v Ščavniški dolini in Radencih niso hidrogeološko povezani. V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so na območju Radencev in Ščavniške doline izvedli njihov popis za pripravo karte *termalnih in mineralnih vod* Slovenije (ŽLEBNIK, 1978b), za potrebe zajema *mineralne vode* pa so bile izvrtane tudi nove vrtine. V Boračevi je bila

izvrtana 780 m globoka vrtina T-1, iz katere je po treh mesecih prenehala iztekati *mineralna voda* in je namesto nje izhajal le suh plin CO₂ (ŽLEBNIK, 2009). Leta 1974 je bila izvrtana tudi vrtina pri Rihtarovcih, kjer so zajeli visoko mineralizirano vodo z veliko CO₂.

Hidrogeokemične značilnosti podzemnih voda

Z analizo izvora voda in plinov v SV Sloveniji se je ukvarjal predvsem PEZDIČ (1991; PEZDIČ et al., 1995), ki je z analizo njihove izotopske sestave pokazal, da se pri Radencih in v dolini Ščavnice mešajo mlada in stara meteorna voda ter razredčena slanica z lastnostmi morske vode. Vertikalno conacijo voda je ugotovilo veliko raziskovalcev (glej razlago v RMAN, 2016). Mlada deževnica pretežno Ca²⁺-Mg²⁺-HCO₃⁻ tipa prehaja v Na⁺-HCO₃⁻ in vmesne tipe pri starejši deževnici, medtem ko so razredčene slanice Na⁺-HCO₃⁻-Cl⁻ in Na⁺-Cl tipa. VRZEL (2012) potrjuje mešanje v bližini prelomov, ki ga je ugotovil PEZDIČ (1991), in meni, da sta v Radencih prisotna dva različna sistema mešanja vode. *Mineralne vode* tega območja spadajo med hladne, blago do srednje mineralizirane in bogate s CO₂. V Rihtarovcih vsebujejo več kot 1000 mg/l CO₂ in so Na⁺-HCO₃⁻ tipa, v Radencih približno 2048 mg/l CO₂ in so Ca²⁺-HCO₃⁻ tipa. Ca²⁺-HCO₃⁻ tipa so tudi vode v Stavešincih, Ihovi, Benediktu in Negovi. Vse vode vsebujejo več kot 1000 mg/l skupnih raztopljenih snovi, v Radencih celo približno 2055 mg/l (NOVAK, 1974). *Mineralna voda* v dolini Ščavnice pripada Ca²⁺-HCO₃⁻ in delno Ca²⁺-Na⁺-HCO₃⁻ tipu (MIOČ, 1997). MIOČ (1997) tudi podaja, da je največja mineralizacija vode v Radencih nad 8 g/l TDS in vsebnost CO₂ skoraj 2 g/l, medtem ko LAPANJE & RMAN (2009) poročata o koncentraciji do 11 g/l TDS.

ŠLEBINGER (1955) je opazoval pojavljanje sulfidov v pomurskih slatinah in ugotavljal njihov pomen. Ugotovil je, da je železo nestalna sestavina in da nekatere vsebujejo H₂S, kar naj bi bilo povezano z genetsko zvezo obeh prvin preko razpada pirita oziroma sekundarnih limonitiziranih mineralov v kamninah.

Izvor plina

Raziskave izvirov plina oziroma *mofet* na območju Slovenskih goric so redke. PEZDIČ (1991) omenja, da na več mestih vzdolž Boračevskega preloma od Negove do Radencev izhajajo praktično suh plin CO₂ (100 vol.% CO₂) medtem ko ima v okolici povprečno 1 vol.% primesi (N₂, CH₄,

H₂S...). Zelo čist CO₂ je tudi v Ščavniški dolini (PEZDIČ, 1991; BRAUER et al., 2016). Drugi avtorji omenjajo, da se izloča vzdolž prepustnih con Rabskega preloma (KRALJ & KRALJ, 2000; LAPANJE, 2006, 2007).

Izvor plina v *mineralnih vodah* je prvi interpretiral ŠLEBINGER (1955), ki meni, da izhaja iz magmatskih kamnin, ki oddajajo CO₂ počasi in stalno, čeprav so že ohlajene. ŽLEBNIK (1975) je njegov izvor pripisal dvema nastankoma. Prva hipoteza je, da izhaja iz globoko ležečega magmatskega telesa, ki je v srednjem pliocenu predrlo v metamorfne kamnine in se ohlajalo, pri čemer je izhajal plin, ki se je raztopljen kopičil in akumuliral v poroznih neogenskih plasteh. Po drugi hipotezi je plin nastal s kemičnimi reakcijami pri temperaturah 50–120 °C iz laporjev. PEZDIČ (1991) je opravil kemijske in izotopske analize vode in plina v Ihovcih, Ivanjševcih, Lokavcih, Očeslavcih, Radvencih, Stavešincih, v Slepici, Leljakovi, Norički, Matjaževi in Ujterski slatini, a ni podal njihovih natančnih lokacij. PEZDIČ (1991, 2003) meni tudi, da je CO₂ nastal v pliocenu in pleistocenu z dekarbonatizacijo dolomita v prisotnosti kremenice in silikatov, predvsem mineralov glin, v temperaturnem razponu 80–150 °C, nekaj pa ga prispevata tudi redukcija sulfatov in zorenje organskih osnovi. KOKOL (2008) je opisala Ivanjševsko, Lokavsko, Poličko, Radvensko in Ujtersko slatino, Stavešinske mofete in Slepice, a se ni poglobljala v izvor fluidov. Ravno tako ne SENEKOVIČ (2011), ki je interpretirala kemijsko sestavo vode izvira Žekš in nekaterih slatin pri Lenartu. KRALJ et al., (2009) so preučevali hidrotermalni sistem v 1,9 km globoki vrtini v Benediktu in na podlagi izotopske sestave ogljika v CO₂ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -4,6 \text{ ‰}$) pripisali izvor plina vulkanskem delovanju. Nekateri raziskovalci (ŽLEBNIK, 1978A; KRALJ et al., 1998; LAPANJE, 2007) menijo, da plin nastaja pri razplinjanju metamorfnih kamnin v Rabski prelomni coni.

Čeprav ŽLEBNIK (2009) meni, da plinski CO₂ migrira skupaj z vodo ter s tem povečuje njeno mineralizacijo, najnovejše raziskave vsebnosti helija in žlahtnih plinov v plinu v Slepicih in *mineralni in termomineralni vodi* v Radencih, opravljene v letih 2013 in 2014, dokazujejo prevladujoč dotok plina iz plašča (BRAUER et al., 2016). Avtorji potrjujejo tudi sklepanja predhodnikov (PEZDIČ, 1991; LAPANJE et al., 2007; KRALJ et al., 2009), da plin prodira proti površini ob prelomih in ločeno od podzemne vode ter se koncentrira pod plitvejšimi, zelo slabo prepustnimi plastmi.

Metode dela

Raziskava je obsegala enajst izvirov vode in/ali plina na območju med Benediktom, Ščavniško dolino in Radenci (sl. 1). Po zbiranju podatkov o lokacijah in stanju izvirov smo izvedli hidrogeološko kartiranje. Zajemalo je ogled lokacij, meritve obsega in globine nezajetih izvirov, fizikalno-kemijske meritve vode ter popis mest in jakosti izhajanja plina. Sledil je kabinetni izris preglednih kart in postavitev katastra izvirov (glej GABOR, 2015), izris batimetričnih 3D modelov nezajetih izvirov in razvrstitev preiskanih pojavov.

Hidrogeološko kartiranje

Terensko delo je obsegalo geološki in hidrogeološki pregled enajstih lokacij med decembrom 2014 in marcem 2015 (tab. 1). Pregledali smo jih trikrat: 19. 12. 2014, 16. 1. in 20. 3. 2015. Razen Ihovske in Verjanske slatine, mofete Rihtarovci in izvira Žekš smo jih našli na podlagi opisov in karte v brošuri Med vrelci življenja (BAGAR POVŠE et al., 2007), kljub temu, da so ponekod zelo zaraščene.

Z GPS-om TRIMBLE Juno 5D smo določili natančen položaj pojavov vode in plina, njihov obseg pa premerili z metrom. Vris opazovanih točk smo kontrolirali z izrisom na topografskih kartah 1: 5.000. V naravnih izvirih smo izmerili globine dna tako, da smo glede na velikost izvira določili mrežo 10 cm × 10 cm za manjše ali 20 cm × 20 cm za večje, jo izrisali v lokalnem koordinatnem sistemu in z merilcem (lesena palica z označenimi centimetrskimi razdaljami) izmerili globino dna pod vodno gladino na vsaki točki. Pridobljene podatke smo uporabili za izdelavo batimetričnih 3D modelov.

Merjeni fizikalno-kemijski parametri vode so bili: temperatura, pH vrednost, elektroprevodnost (EC) in oksidacijsko-redukcijski potencial (ORP). Prve tri smo določili z merilnikom pH/Cond 340i, ORP pa z inštrumentom SentixORP, oba proizvajalca WTW. Točnost meritev pH je ±0.01, temperature ±0.1 °C ter elektroprevodnosti vode ±0.5 %. Večina meritev je bila opravljena trikrat. Pri interpretaciji smo zaradi ugotavljanja spremenljivosti opazovanih lastnosti uporabili tudi podatke iz drugih raziskav (glej RMAN & KANDUČ, 2015; neobjavljeno gradivo). Kjer podatki za skupno količino raztopljenih snovi v vodi (TDS) niso bili na voljo, smo parameter izračunali s pomočjo empirične enačbe HOUNSLOWA (1995) (en. 1), pri čemer smo za faktor A uporabili obe mejni vrednosti:

Tabela 1. Lokacije (v Gauss-Krugerjevem KS D-48), naravovarstveni status in drugi parametri preiskanih izvirov (NVDP = naravna vrednota državnega pomena, NVLP = naravna vrednota lokalnega pomena, identifikacijska št.).

Table 1. Location (Gauss-Kruger CS D-48), nature protection status and other characteristics of the investigated springs (NVDP = natural feature of national importance; NVLP = natural feature of local importance, ID No.).

Št. / No.	Izvir / Spring	X _{SI}	Y _{SI}	Z _{SI}	Naravovarstveni status / Nature protection status	Tip izvira / Type of spring	Uporaba / Use
1	Ihovska slatina	166333	570165	237	NVLP 869	Zajetje / Captured	Ni v uporabi / No use*
2	Ivanjševska slatina	164164	573978	213	NVLP 737	Zajetje vrtine / Capture of a well	Pitna voda / Drinking water
3	Lokavska slatina	164005	571043	250	NVLP 856	Zajetje / Captured	Ni v uporabi / No use*
4	Mofeta Rihtarovci	165905	581325	196	NVLP 2017	Naraven / Natural	Ni v uporabi / No use
5	Polička slatina	168349	572593	237	NVLP 867	Naraven / Natural	Ni v uporabi / No use*
6	Radvenska slatina	164733	572524	217	NVLP 736	Zajetje / Captured	Ni v uporabi / No use*
7	Mofeta Strmec / Stavešinske mofete / Mofeta Ivanjševci	163739	575019	209	NVDP 79	Naraven / Natural	Ni v uporabi / No use
8	Mofeta Slepice / Stavešinske slepice	164840	575545	222	NVDP 7044	Naraven / Natural	Ni v uporabi / No use
9	Ujterska slatina	162299	574788	208	NVLP 738	Zajetje / Captured	Ni v uporabi / No use*
10	Verjanska slatina	160784	567639	243	NVLP 854	Naraven / Natural	Ni v uporabi / No use*
11	Žekš	162303	566486	258	/	Naraven / Natural	Ni v uporabi / No use*

* V preteklosti se je izvirna voda uporabljala za pitje. / Spring water was used as drinking water in the past.

$$TDS \left(\frac{mg}{l} \right) = A \cdot EC \left(\mu S/cm \right) [A = 0,55 - 0,76] \quad (1)$$

Kjer je izhajal tudi plin, smo določili mesta in intenzivnost izhajanja. Ker nismo razpolagali z merilci za določanje toka plina, smo razvrstili intenzivnost izhajanja plina subjektivno, po nominalni vizualni petstopenjski lestvici, pri čemer je bila ena (1) najmanjša in pet (5) največja intenzivnost (tab. 2). Z višjo vrednostjo narašča pogostost (nad vključno 3 stalen iztok plina), številčnost (en ali več mehurčkov) in velikost mehurčkov plina oziroma obseg razburkane vodne površine.

Izdelava batimetričnih 3D modelov naravnih izvirov

Batimetrične karte ponazarjajo opise in vizualne prikaze terena pod koto tal oziroma vodno gladino – relief in globino dna morja, jezera ali v tem primeru izvira. S podatki globin dna se izdelajo batimetrični 3D modeli, s katerimi si vizualiziramo obliko dna (KLANJŠČEK & RADOVAN, 2005). Batimetrične modele smo izdelali za pet izmed enajstih izvirov, ki niso videti zajeti in njihova oblika najverjetneje več desetletij ni bila spremenjena: Slepice (mala in velika mofeta), Poličko slatino, Verjansko slatino in Žekš.

Za njihovo izdelavo smo uporabili terenske podatke iz mrež izmerjenih globin gostote točk 10 cm × 10 cm pri manjših izviroh in 20 cm × 20 cm pri večjih. Za obdelavo in prikaz podatkov smo uporabili računalniške programe MS Office Excel, AutoCAD, Surfer 9 in ArcGIS. V Excel smo vnesli koordinate točk v skicirani mreži v lokalnem koordinatnem sistemu z označenim severom in izmerjene globine dna. V programu AutoCAD smo skice digitalizirali, na njih označili mesta izhajanja plina in jim pripisali intenzivnost od 1 do 5. Oboje smo uvozili v Surfer 9, kjer smo izrisali topografijo dna izvirov. Iz Surferja 9 smo slike uvozili v ArcGIS in sestavili batimetrične 3D modele.

Razvrstitev opazovanih izvirov

Zbrane definicije *mofete*, *mineralne vode* in *slatine* smo razvrstili glede na letnico vira ter poiskali njihove skupne točke. Na njihovi podlagi smo ocenili ustreznost poimenovanja preiskanih enajstih izvirov.

Tabela 2. Vizualna lestvica za oceno intenzivnosti izhajanja plina s petimi stopnjami.

Table 2. Visual scale for evaluation of intensity of gas emissions has five levels.



suha *mofeta* (če ni poplavljen, se intenzivnosti izhajanja ne da oceniti)/
dry *mofette* (the intensity can not be evaluated if it is not flooded)
primer/example: Strmec,
foto: N. Rman



(1) posamezen mehurček v nerednem časovnem intervalu /
random individual bubbles
primer/example: potok ob Slepica / stream at Slepice,
foto: T. Kanduč



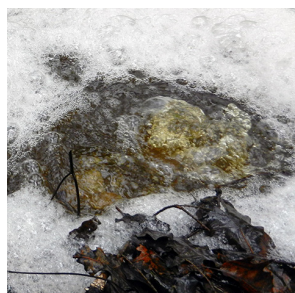
(2) več mehurčkov v nerednem časovnem intervalu /
several random bubbles
primer/example: mofeta ob Polički slatini / mofette at Polička slatina,
foto: N. Rman



(3) stalni posamezni mehurčki – šibek tok manjšega obsega /
constant individual bubbles – weak flow of minor extent
primer/example: mofeta / mofette Rihtarovci,
foto: N. Rman



(4) skupina stalnih mehurčkov, da površina žubori – močan tok manjšega obsega /
group of constant bubbles causing rippling surface – strong flow of minor extent
primer/example: Žekš,
foto: N. Rman



(5) večja skupina stalnih mehurčkov, da površina žubori in je razburkana v obsegu več cm – stalen močan tok večjega obsega /
larger group of constant bubbles causing rippling turbulent surface – strong flow of major extent
primer/example: Slepice,
foto: N. Rman

Tabela 3. Lastnosti preiskanih izvirov in fizikalno-kemijske značilnosti vode.

Table 3. Properties of investigated springs and physicochemical characteristics of water.

Izvir / Spring	Iztok vode / Water outflow	Izhajanje plina / Gas emissions		Videz vode / Water appearance	T (°C)	pH	EC (μ S/ cm)	O ₂ (%)	ORP (mV)
		Št. mest / No. of sites	Intenzivnost/ Intensity						
Ihovska slatina	Neopazen / Unnoticeable	3	1–3	Motna, z mehurčki / Turbid, with bubbles	8,6– 11,2	5,5– 6,2	1370– 2050	12,6– 17,4	172,1– 243,9
Ivanjševska slatina	< 0,1 l/s	1 v zajetju in več v reki / 1 in the capture and several in the river	5 v zajetju / in the captured spring; 1 v reki / in the river	Bistra, oranžna oborina, z mehurčki / Transparent, orange precipitate, with bubbles	5,2– 8,2	7,6– 8,9	3008– 3285	103– 121	93,0– 123,0
Mofeta ob Lokavski slatini	Neopazen / Unnoticeable	1 (2r = 40 cm)	5	Siva, motna, z mehurčki / Grey, turbid, with bubbles	9,9– 10,8	4,5– 5,0	66–92	0,8**	-16,5
Mofeta Rihtarovci	Neopazen / Unnoticeable	Vsaj 4 suhe <i>mofete</i> / At least 4 dry <i>mofettes</i> (4,5 m x 3,6 m)	1–3	Bistra, oranžna oborina, z mehurčki / Transparent, orange precipitate, with bubbles	6,6– 6,8	6,2– 6,8	455– 737	73,4**	73,6
Polička slatina	Neopazen / Unnoticeable	1 mokra <i>mofeta</i> in več suhih / 1 wet <i>mofette</i> and several dry ones	1–4	Bistra, oranžna oborina, z mehurčki / Transparent, orange precipitate, with bubbles	4,1– 6,8	4,5– 5,2	50–81	24,8– 40,8	292,8– 334,7
Radvenska slatina	Neopazen / Unnoticeable	6	1–2	Rahlo motna, z mehurčki / Slightly turbid, with bubbles	8,2– 9,5	6,2– 6,6	1105– 2280	24,3– 29,6	195,2– 205,0
Mofeta Strmec	Neopazen / Unnoticeable	6 večjih in 5 manjših suhih <i>mofet</i> ter 1 na drugi strani ceste / 6 larger and 5 smaller dry <i>mofettes</i> , one across the road	1–5	Siva, motna, z mehurčki / Grey, turbid, with bubbles	4,6– 7,1	4,9**	274– 562	0,3**	6,6**
Mofeta Slepice	Neopazen / Unnoticeable	2 mokri <i>mofeti</i> oddaljeni 6,6 m, 5 difuznih izvirov v reki / 2 wet <i>mofettes</i> at a distance of 6.6 m, 5 diffuse springs in the river	3–5 večja / bigger; 2–4 manjša / smaller; 1–2 v potoku / in the stream	Rjavkasta, v bližnjem potoku bistra, z mehurčki / Brownish, transparent in near-by spring, with bubbles	6,4– 7,3	4,4– 6,1	62–86	1,2–1,4	182,7– 297,0
Ujterska slatina	Neopazen / Unnoticeable	Brez / No	Ni mehurčkov / No bubbles	Rahlo motna, brez mehurčkov / Slightly turbid, no bubbles	7,8*	7,3*	115*	1,1*	58,5*
Verjanska slatina	Zelo majhen / Very small	1	1	Bistra, z rjavo usedlino, z mehurčki / Transparent, brown precipitate, with bubbles	4,4*	5,9*	430*	11,0*	18,6*
Žekš	Zelo majhen / Very small	1 <i>mofeta</i> s 36 mesti / 1 <i>mofette</i> with 36 sites (4,5 m x 3,8 m)	1–4	Siva, kalna, z mehurčki / Grey, turbid, with bubbles	7,3*	6,4*	1183*	43,8*	196,7*

* le ena meritev, opravljena / only one measurement, performed on 20.3.2015

** le ena meritev, opravljena / only one measurement, performed on 19.12.2014

Rezultati in diskusija

Rezultati hidrogeološkega kartiranja

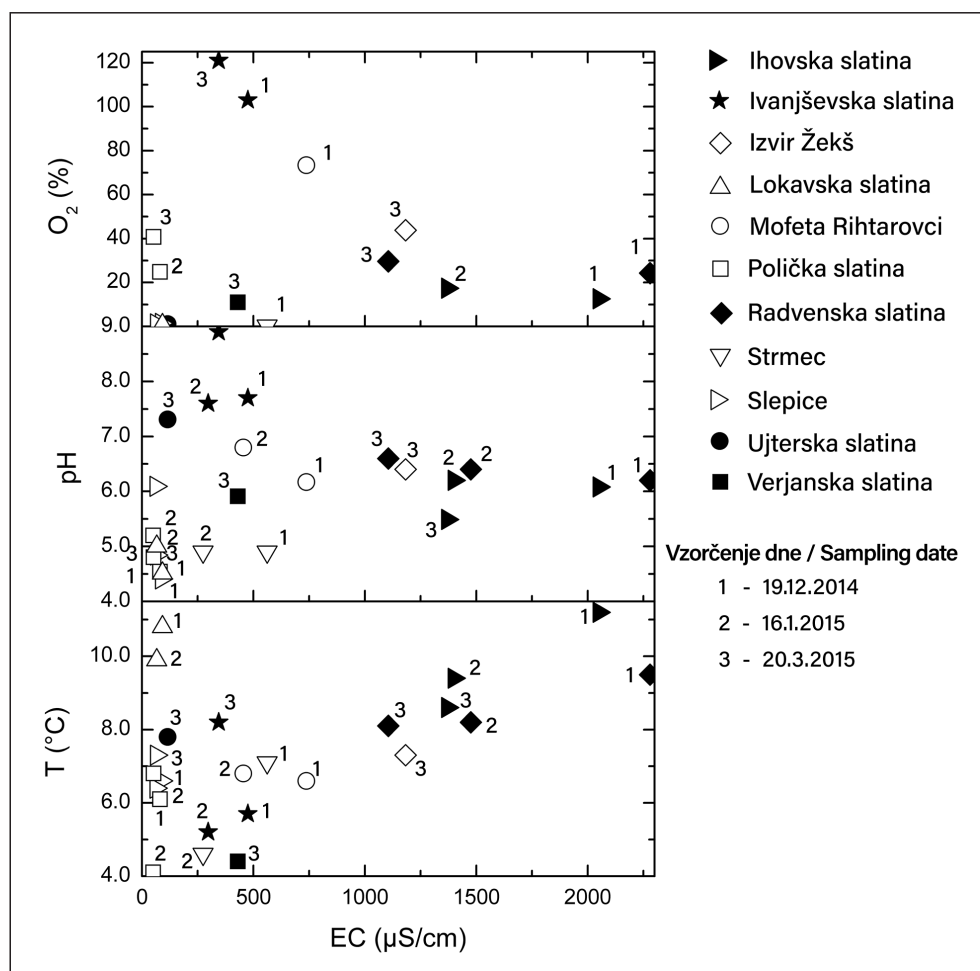
Na podlagi hidrogeološkega kartiranja smo opredelili globino naravnih izvirov, ocenili količino iztoka vode in jakost izhajanja plina, opisali videz vode, v kolikor je prisotna, ter podali njene fizikalno-kemijske značilnosti (tab. 3, sl. 2).

Temperatura vode v izvirihi je v obdobju izvajanja meritev, od decembra 2014 do marca 2015, nihala od 4,1 do 11,2 °C (sl. 2, tab. 3). Najnižjo smo izmerili v Polički slatini, najvišjo v Ihovski slatini. Največje nihanje temperature smo opazili pri Ivanjševski slatini in sicer 3 °C, čeprav ima opazen in stalen iztok vode. Na ostalih lokacijah so temperature vode nihale v povprečju za 1,7 °C. Spreminjanje temperature je najverjetneje pogojeno z nihanjem temperature zraka. Na to kažejo tudi predhodne meritve temperature vode v Ihovski, Polički, Radvenski in Verjanski slatini ter Žekšu, izvedene v septembru 2014 (neobjavljeno gradivo), ki podajajo 10–11 °C, razen v Ihovski in Radvenski slatini, kjer sta bili 15,2 oziroma 15,6 °C. Slednji sta za približno 5 °C višji od povprečne letne temperature zraka in izmerjene tem-

perature vode v zimi 2014/2015 (tab. 3), kar kaže na velik vpliv temperature zraka na temperaturo vode v izvirihi in s tem potrjuje domnevo o razmeroma majhni količini iztoka podzemne vode.

pH vrednost je večinoma rahlo kislja in v obsegu 4,4–6,8 (sl. 2, tab. 3). Razlikuje se le v Ivanjševski slatini, kjer smo izmerili povprečno vrednost 8,1, in v Ujterski slatini s 7,3. Najnižja pH vrednost je v Slepica. Pred tem, septembra 2014 izmerjene pH vrednosti (neobjavljeno gradivo) so v razponu predstavljenih meritev.

Najnižja elektroprevodnost (50 µS/cm) je bila izmerjena v Polički slatini, najvišja (3285 µS/cm) pa v Ivanjševski slatini (sl. 2, tab. 3). Elektroprevodnosti do 100 µS/cm smo izmerili tudi v mofeti ob Lokavski slatini, v Slepica in Ujterski slatini, kjer kažejo na prevladujočo komponento sveže padavinske vode. Pri mofetah Rihtarovci in Strmec ter Verjanski slatini je bila EC 430–590 µS/cm, zato sklepamo na prevladujočo komponento podzemne vode. Največje spremembe vrednosti EC smo opazili v Radvenski slatini (za 1175 µS/cm), kjer je bila najvišja vrednost izmerjena decembra 2014, najnižja pa marca 2015. Tudi v



Sl. 2. Razsewni diagrami fizikalno-kemijskih parametrov vode v izvirihi. Meritve za Lokavsko slatino so opravljene v mofeti pri vodnjaku.

Fig. 2. Scatter plots of physicochemical parameters of spring water. Measurements for Lokavska slatina are performed in a near-by mofette.

tem primeru so pred tem, septembra 2014 izmerjene vrednosti (neobjavljeno gradivo), v razponu predstavljenih meritev. V Ihovski slatini in Žekšu je bila najvišja vrednost izmerjena septembra 2014, a se razlikuje od najvišje v zimi 2014/2015 le do 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nihanje in nižja vrednost EC je v večini primerov posledica vdora sveže padavinske vode v malo izdaten izvir ali zajetje, ki ima pogosto tudi omogočeno komunikacijo s plitvo podzemno vodo.

Najnižji ORP (-16,5 mV) smo izmerili v mofeti ob Lokavski slatini in kaže, da voda ni prezračena. Na ostalih lokacijah je bil ORP pozitiven. Najvišjega (334,7 mV) smo izmerili v Polički slatini. Vrednosti so najbolj nihale v Slepica, in sicer od 182,7 do 297 mV.

Najnižje vrednosti raztopljenega kisika (0,3–1,4 %) smo izmerili v mofeti ob Lokavski slatini, Strmcu, Slepica, ter Ujterski in Verjanski slatini (sl. 2, tab. 3). Najvišje vrednosti (103–121 %) in največje nihanje smo izmerili v Ivanjševski slatini, kjer je meritev možna le na iztoku cevi iz zajetja. Na ostalih lokacijah je bila 17–30 %, v mofeti Rihtarovci 73 %.

Izračun količine skupnih raztopljenih snovi v vodi je bil opravljen za vzorce, odvzete septembra 2014 (neobjavljeno gradivo) ter julija 2014 (GABOR, 2015; str. 10). Njihova mineralizacija je določena na: 2171 mg/l v Ihovski slatini, 1933 mg/l v Radvenski slatini, 1743 mg/l v Žekšu, 576 mg/l v Verjanski slatini in 31 mg/l v Polički slatini, oziroma približno 3,5 g/l v Ivanjševski slatini. Primerjava s tabelo 3 razkrije, da za oceno TDS pri opazovanih vodah ne moremo uporabiti predlagane enačbe 1, kajti njihov faktor A je med 1,02 (Ihovska in Radvenska slatina) in 1,42 (Žekš), izjema je le Polička slatina z 0,42. Lokalno povišan faktor A je posledica večje koncentracije CO_2 in sposobnosti vode, da raztaplja kamnine, kar viša njeno mineralizacijo. Preostali od 11 izvirov imajo elektroprevodnost vode do 737 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in malo prostega plina (tab. 3), zato sklepamo, da ne presegajo 1 g/l TDS. Da bi bili uvrščeni med *mineralne vode*, bi morala biti njihova elektroprevodnost po enačbi 1 vsaj 1317 oziroma 1819 $\mu\text{S}/\text{cm}$, odvisno od faktorja A.

Batimetrični 3D modeli naravnih izvirov

Na slikah 3 do 7 so prikazani batimetrični 3D modeli petih naravnih izvirov z mesti in intenzivnostjo izhajanja plina, v preglednici 3 pa nji-

hov opis. Domnevali smo, da v kolikor je vodni stolpec previsok in tok plina ni dovolj močan, se mehurčki plina ne pojavljajo oziroma so šibkejši.

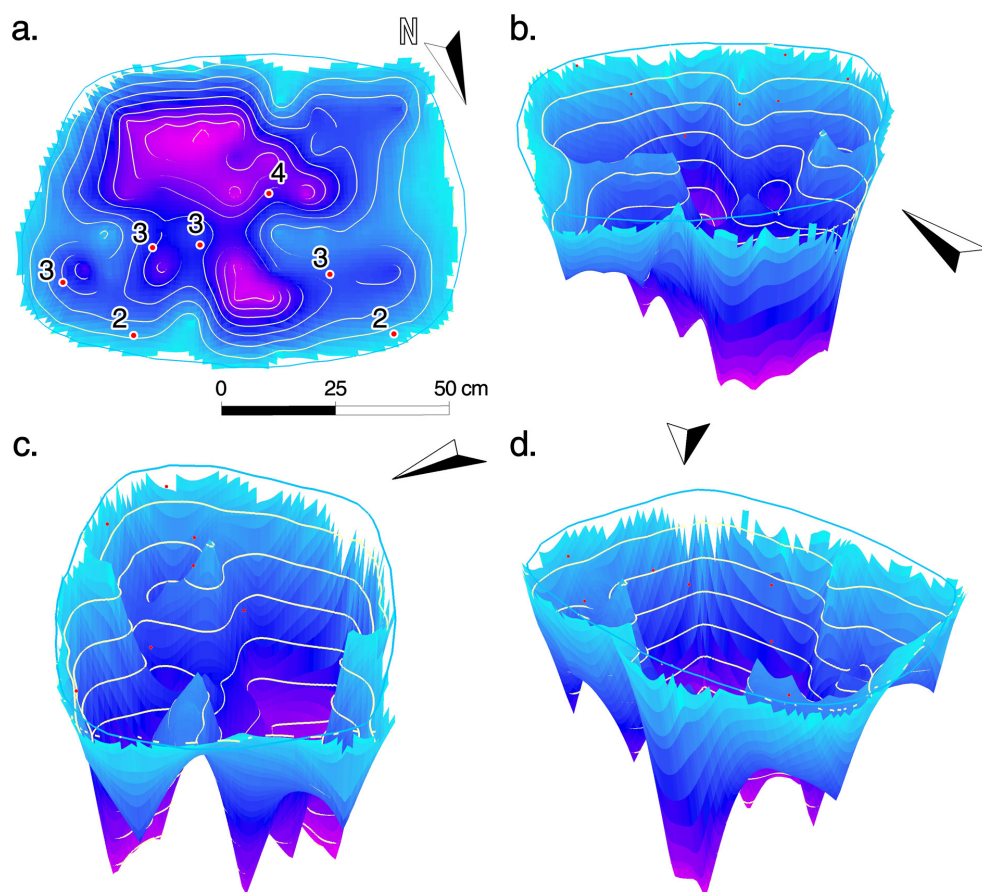
Obe najizrazitejši mofeti Slepice, tako mala (sl. 3) kot velika (sl. 4) kotanja, sta ovalne oblike. Globina se pri obeh povečuje proti sredini izvira, dno je razgibano. V plitvejši (0,6 m), a večji (premer 1,4 m) Slepici smo ponekod na dnu opazili kamenje, kar dodatno (umetno) vpliva na razgibanost dna. Točke izhajanja plina so v večji razporejene po celotni površini, pri manjši (premer 1 m), a globlji (0,8 m) pa je večina točk na eni polovici. Jakosti izhajanja plina so od 2 do 5 po lestvici od 1 do 5 in niso povezane z globino (sl. 8).

Dno 2 m globoke Poličke slatine (sl. 5) je razgibano, globina narašča proti sredini izvira. Izrazita uravnava in plitvina na modelu je posledica tega, da je del izvira prekrit s široko leseno desko. Ta tudi preprečuje izhajanje plina. Točke izhajanja plina intenzivnosti 1 do 4 niso vezane na globino, ampak se pojavljajo po celotni površini, razen nad desko. KOKOL (2008) omenja, da je bil izvir nekoč obdan z leseno kašto, a tega, niti njene oblike, nismo mogli potrditi.

Verjanska slatina je globoka prek 1,7 m in je kroglaste oblike, premera približno 1,8 m (sl. 6). Globina homogenega dna se povečuje proti sredini izvira. Točka izhajanja plina z intenzivnostjo 1 je ena sama in v srednjem, globljem delu izvira. Podatka, ali je bil izvir nekoč obzidan, nimamo.

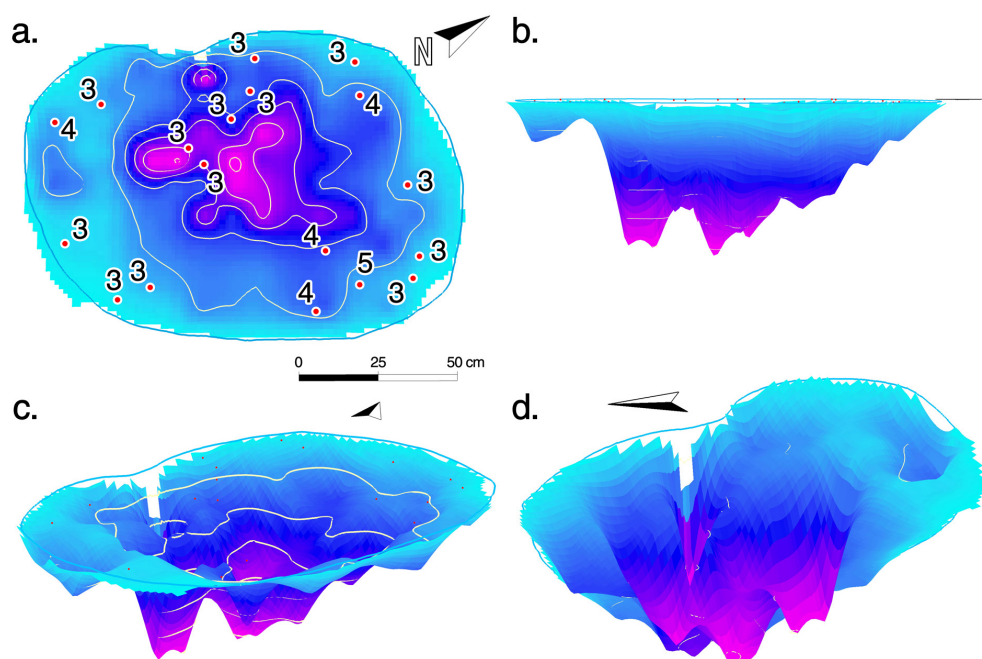
Izvir Žekš (sl. 7) je pravokotne oblike. Dno je ob robu plitvejše (20 cm) in bolj razgibano, nato se proti sredini zelo hitro poglobi do čez 2 m in je homogeno. V izviru so ostanki nekdanje vrtine, ob kateri je dno bistveno plitvejše. Morda je bil izvir nekoč oblikovan s pravokotno postavljenimi zagatnicami, ki so se ohranile do danes. Točke izhajanja plina z intenzivnostjo 1 do 4 so skoraj enakomerno razporejene ob robu v plitvejšem delu, nekaj jih je ob vrtini, v globokem delu jih ni. Iz tega sklepamo, da je možna povezava med višino vodnega stolpca nad dnom izvira (in točko izhajanja plina) in mesti izhajanja plina na površini, saj se mehurčki pojavljajo predvsem do globine dna 85 cm.

Na razgibanost dna izvirov lahko vplivajo tudi različno zgoščeni (številčni in intenzivni) dotoki plina, ki pripomorejo k hitrejšemu raztapljanju kamnin, razgradnji mineralov v tleh in stalnemu turbulentnemu dviganju usedlin z dna.



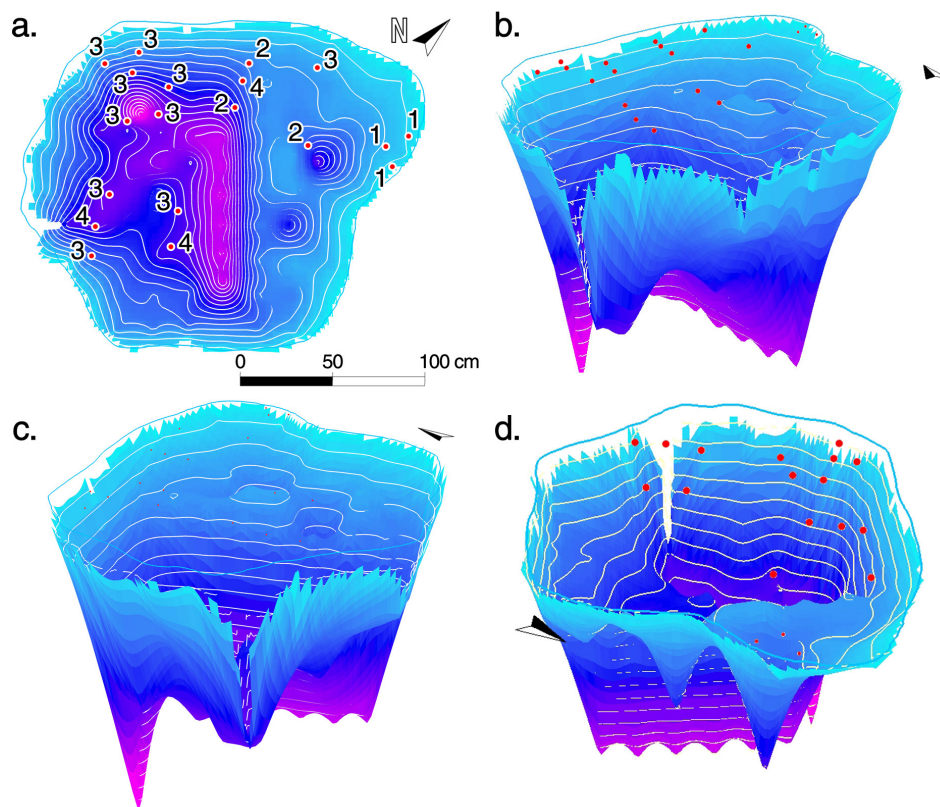
Sl. 3. Batimetrični 3D model male *mofete* Slepice. Izobate so na 10 cm globine. Pike označujejo mesta, številke pa intenzivnost izhajanja plina na petstopenjski lestvici (glej tab. 2).

Fig. 3. Bathymetric 3D model of the small *mofette* of Slepice. Isobaths mark 10 cm distance in depth. Dots mark location and numbers intensity of gas emissions at a five-level scale (see Tab. 2).



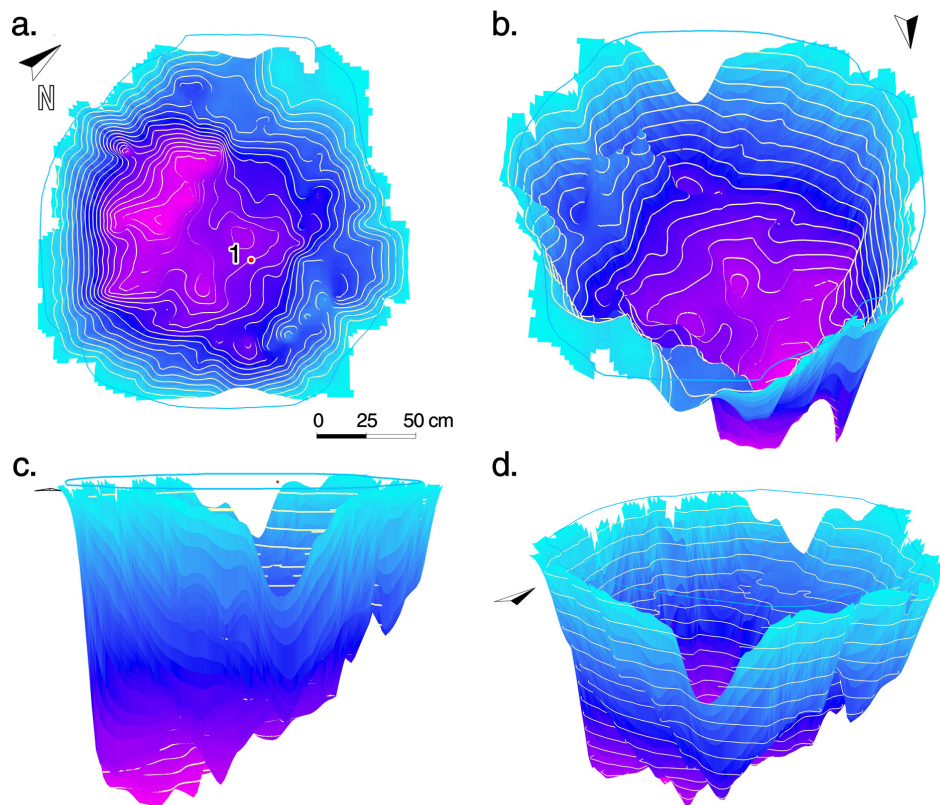
Sl. 4. Batimetrični 3D model velike *mofete* v Slepica. Izobate so na 10 cm globine. Pike označujejo mesta, številke pa intenzivnost izhajanja plina na petstopenjski lestvici (glej tab. 2).

Fig. 4. Bathymetric 3D model of the large *mofette* of Slepice. Isobaths mark 10 cm distance in depth. Dots mark location and numbers intensity of gas emissions at a five-level scale (see Tab. 2).



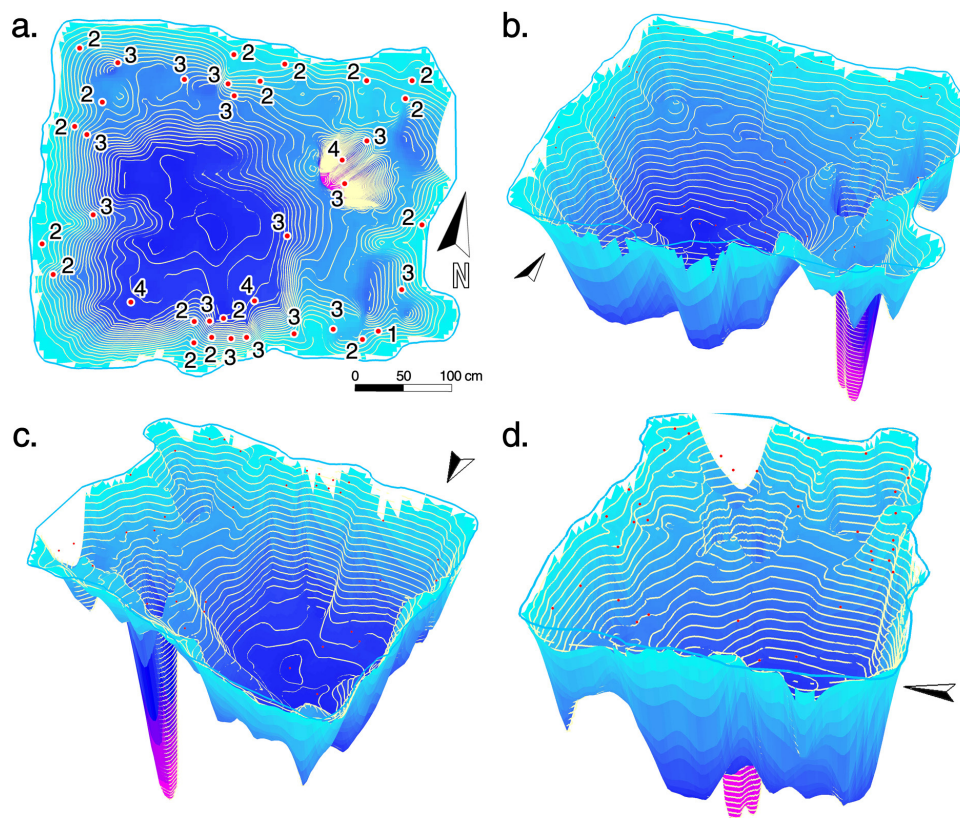
Sl. 5. Batimetrični 3D model Poličke slatine. Izobate so na 10 cm globine. Pike označujejo mesta, številke pa intenzivnost izhajanja plina na petstopenjski lestvici (glej tab. 2).

Fig. 5. Bathymetric 3D model of Polička slatina. Isobaths mark 10 cm distance in depth. Dots mark location and numbers intensity of gas emissions at a five-level scale (see Tab. 2).



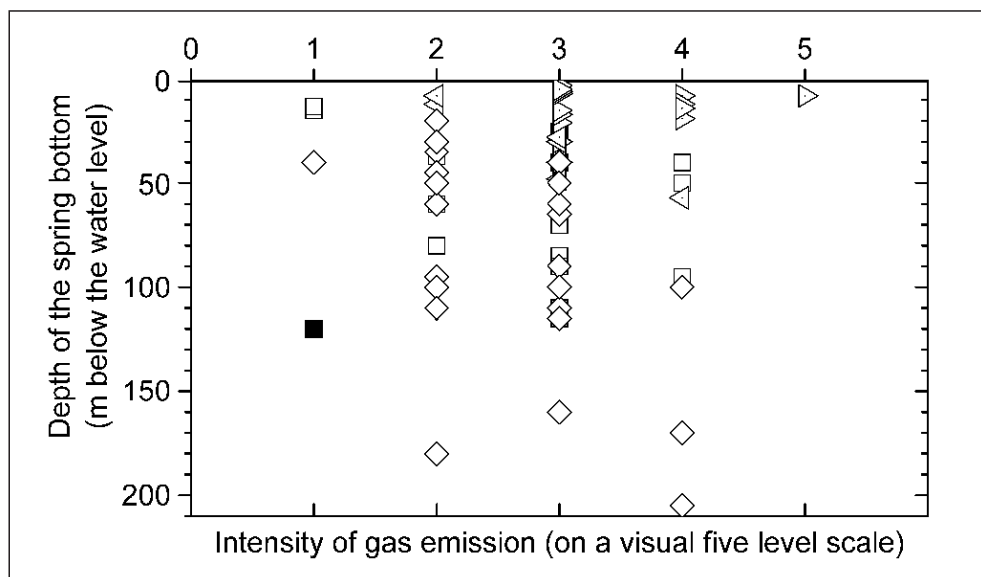
Sl. 6. Batimetrični 3D model Verjanske slatine. Izobate so na 10 cm globine. Pike označujejo mesta, številke pa intenzivnost izhajanja plina na petstopenjski lestvici (glej tab. 2).

Fig. 6. Bathymetric 3D model of Verjanska slatina. Isobaths mark 10 cm distance in depth. Dots mark location and numbers intensity of gas emissions at a five-level scale (see Tab. 2).



Sl. 7. Batimetrični 3D model izvira Žekš. Izobate so na 10 cm globine. Pike označujejo mesta, številke pa intenzivnost izhajanja plina na petstopenjski lestvici (glej tab. 2).

Fig. 7. Bathymetric 3D model of the spring Žekš. Isobaths mark 10 cm distance in depth. Dots mark location and numbers intensity of gas emissions at a five-level scale (see Tab. 2).



Sl. 8. Prikaz odnosa med globino dna izvira in intenzivnostjo izločanja plina glede na razvrstitev opazovanih točk na vizualni petstopenjski lestvici. Legenda simbolov je podana na sl. 2.

Fig. 8. Plot shows the relation between the depth of the spring bottom and the intensity of gas emissions as determined at a visual five-level scale. Legend of the symbols is shown on Fig. 2.

Glede na izdelane batimetrične 3D modele in 81 opazovanih točk izhajanja plina (sl. 8) nismo našli jasne povezave med globino dna izvira in intenzivnostjo izhajanja plina na vodni površini. Šibek odnos je lahko tudi posledica rabe subjektivne metode za oceno količine iztoka plina in uporabe rangov namesto absolutnih izmerjenih vrednosti.

Iztok plina v Stavešinskih mofetah Strmec so prvič merili na približno 60 m² veliki površini v letih 2002–2003 (VODNIK et al., 2006) ter nato še v 2005–2006 (OGOREVC, 2008). Ugotovili so, da je na območju z izrazitim dotokom geogenega CO₂ izhajalo med 244,8 in 964,8 mol/h/m² (kar znese 5726–22575 l/h/m² pri p = 1 atm in T = 12 °C) plina. Glede na opazovano izrazitost pojavov (obseg

kotanj, rastje, stalnost in izrazitost mehurčkov...) in primerjavo izgleda z mokrimi *mofetami* na Češkem (KÄMPF et al., 2013), kjer so tok plina tudi merili, količina iztoka verjetno upada od mofet Rihtarovci in Slepice, Ivanjševske slatine in Žekša, mofete ob Lokavski slatini, Poličke slatine, Ihovske slatine ter Radvenske slatine do Verjanske slatine. Slednja zaradi majhne količine prostega plina verjetno že spada med difuzne oblike razplinjevanja. Ta razvrstitev lahko služi kot osnovna informacija pri načrtovanju bioloških, geoloških ali geofizikalnih raziskav, kjer je različna jakost toka plina zaželena in pomembna.

Pregled definicij

Problematika rabe pojmov *mofeta*, *mineralna voda* in *slatina* zahteva poglobljeno terminološko in geoznantveno študijo, ki ni bila namen pričujočega prispevka. Da bi lahko preiskanih 11 izvirov ustrezno razvrstili, smo najprej pripravili kratek povzetek oziroma primerjavo podobnosti in razliki obstoječih definicij v tab. 4–6.

Glede na 24 zbranih definicij *mofete* (tab. 4) povzemamo, da s tem izrazom označujemo površinski pojav izhajanja hladnega plina, predvsem CO₂, ki je lahko vulkanskega ali nevulkanskega izvora. *Mofeta* je lahko suha, pri čemer sta opazna spremenjeno/značilno rastje in gola tla na območju najbolj intenzivnega iztekanja plina, ali mokra, kjer se v kotanjah nabira površinska ali padavinska voda z nizkim (kislim) pH. Intenzivnost izhajanja plina mora biti vsaj 2 na vizualni lestvici z razponom 1–5 (tab. 2).

Definicije *mineralne vode* se bistveno razlikujejo glede na namen rabe vode, npr. kot naravni pojav, za zdravljenje, za ustekleničene vode. Na področju geologije in hidrogeologije s tem izrazom označujejo predvsem vode z veliko količino skupnih raztopljenih snovi, pogosto tudi plina (KAČURA, 1980; INTERNET 4; MIOČ, 1996; JAVORNIK, 1998; PAVŠIČ et al., 2006; DRAGIŠIČ IN POLOMIČIČ, 2009; INTERNET 3), čeprav mejne vrednosti niso vedno enake (tab. 5). Podobne zahteve se uporabljajo v balneologiji (KIRSCHNER, 2005; BUDAPEST WATER SUMMIT, 2013). Nasprotno v industriji ustekleničenih voda uporabljajo izraz *naravna mineralna voda*, ki ne opredeljuje najnižje vsebnosti TDS, ampak določa nekatere druge pogoje, kot npr. stalnost sestave, jasno razlikovanje od pitne vode... (CCA, 1983; URADNI LIST RS, 2004, 2005; CENZON, 2014; EFBW, 2014; IBWA, 2016; GNI, 2016). Za potrebe našega prispevka smo kot

mineralne vode opredelili tiste, ki vsebujejo vsaj 1 g/l skupnih raztopljenih snovi ali nad 250 mg/l prostega CO₂ (CO₂)_g.

Slatina je izraz, ki v prevodu nima povsem ustrezne sopomenke. Pogosto se uporablja za izvire visoko mineralizirane vode, lahko z veliko plina (tab. 6), in kot sopomenka *mineralni vodi* (BAJEC et al., 1970; LAH, 2002; VASELLI et al., 2002; PAVŠIČ et al., 2006; DRAGIŠIČ & POLOMIČIČ, 2009) oziroma *kisli mineralni vodi* (BEZLAJ, 1995). V balneologiji z nemškim izrazom »die Sauerlinge« označujejo vode z veliko CO₂ (KIRSCHNER, 2005). Izraz *slatina* se uporablja še v industriji ustekleničenih voda (URADNI LIST RS, 2004, 2005, 2008) in prevaja s številnimi angleškimi izrazi kot npr. »carbonated water, soda water, sparkling water, fizzy water«, ki označujejo vode z visoko vsebnostjo CO₂. Ker se za izvire ponekod v Sloveniji uporablja tudi hidronim Slatina, ki pa ne označuje pojava vode s posebno kemijsko sestavo (BEZLAJ, 1995), to še dodatno prispeva k neenotni rabi izraza. Pri razvrstitvi izvirov smo kot *slatine* opredelili tiste podzemne vode, ki vsebujejo nad 250 mg/l prostega CO₂ (CO₂)_g.

Razvrstitev preiskanih izvirov

V tabeli 7 podajamo povzetek opazovanih lastnosti 11 izvirov v Slovenskih goricah, na podlagi katerih smo jih razvrstili med *mofete*, *mineralno vodo* in *slatine*.

Mofet je pet: mofeta ob Lokavski slatini, mofeta Rihtarovci, Strmec in Slepice ter Polička slatina. Izhaja hladni plin, pretežno CO₂ iz plašča (BRÄUER et al., 2016), z intenzivnostjo 3 ali več. V kotanjah se nabira večinoma nizkomineralizirana padavinska voda, ki je razmeroma kislja (pH = 4,5–6,8). Pri vseh *mofetah* razen pri Slepica in Lokavski slatini, ki se nahajata v gozdu brez po drasti, je opazna sprememba rastja.

Med *mineralne vode* smo uvrstili štiri izvire: Ihovsko, Ivanjševsko in Radvensko slatino ter Žekš, saj vsebujejo nad 1 g/l skupnih raztopljenih snovi in prosti plin. Pri vseh je izhajanje plina z intenzivnostjo do 4 na lestvici 1–5 omejeno na sam izvir oziroma vrtino, kajti v okolici ni opaziti spremenjenega rastja. pH vode je nekoliko višji kot pri *mofetah*, 5,5–8,9.

Ker s podatkom o vsebnosti CO₂ v preiskanih vodah ne razpolagamo, jih nismo mogli ovrednotiti kot *slatine*. Elektroprevodnost Verjanske

Tabela 4. Primerjava 24 definicij *mofete* glede na izvor in vrsto plina, povezavo z geotermalnimi sistemi ter spremembami okolja.
 Table 4. Comparison of 24 definitions of a *mofette* based on gas origin and type, connection to geothermal systems and changes of the environment.

Št. / No.	Vir / Reference	Izvor plina / Gas origin			Vsebuje / Contains				Povezana z geotermalni- mi sistemi / Connected to geothermal systems	Sprememba / Change of	
		Vulkanski / Volcanic	Nevulkanski / Non volcanic	Iz plašča / Mantle	Pline / Gases	CO ₂	Hladni / Cold CO ₂	Suhi/ Dry CO ₂		Ekosistema / Ecosystem	Tal / Soil
1	BAJEC et al., 1970	X			X	X					
2	COLLINS, 1986	X			X	X					
3	INTERNET 4, 1994	X			X	X					
4	HOCHSTEIN & BROWNE, 2000	X	X				X		X		
5	MINISSALE et al., 2000 (original DUCHI & MINISSALE, 1995)						X	X			X
6	LYNNE, 2003				X	X			X		
7	KIRSCHNER, 2005	X			X	X					
8	NEUENDORF et al., 2005				X						
9	PFANZ et al., 2007	X					X				
10	NÉDA et al., 2008	X						X			
11	VODNIK et al., 2006; MAČEK et al., 2009					X				X	
12	DRAGIŠIĆ & POLOMIČIĆ 2009	X			X	X					
13	KRÖLL, 2010; WEINLICH et al., 1998						X	X			
14	MOTYČKOVÁ et al., 2012	X			X	X			X		
15	RENNERT et al., 2012					X					
16	BUDAPEST WATER SUM- MIT, 2013					X					
17	KÄMPF et al., 2013		X	X	X	X				X	
18	MEHLHORN et al., 2014				X	X				X	X
19	INTERNET 1, 2015	X			X						
20	OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2015					X					X
21	BEULIG et al., 2015										
22	NICKSCHICK et al., 2015			X		X					
23	HOHBERG et al., 2015	X					X				
24	RENNERT & PFANZ, 2016	X		X		X				X	X

Tabela 5. Primerjava 14 definicij *mineralne vode* glede na vsebnost raztopljenih snovi in plina, stalnost sestave, razlikovanje od pitne vode, naravni izvor in čistost.

Table 5. Comparison of 14 definitions of a *mineral water* based on content of dissolved solids and gas, constant composition, distinction from drinking water, natural source and purity of water.

Št. / No.	Vir / Reference	Visoka vsebnost / High content of		Stalna sestava / Constant composition	Drugačna od pitne vode / Differs from drinking water	Naraven izvor / Natural source	Čistost kot na izvoru / Purity as at a source
		Skupne raztopljene snovi / Total dissolved solids	Plinov / Gases				
1	KAČURA, 1980	Ni nujno / Not necessarily	>1 g/l CO _{2(g)}		X		
2	CCA, 1983	>1000 g /l	>250 CO _{2(g)}	X		X	X
3	INTERNET 4, 1994	X	X			X	
4	MIOČ, 1996	>1 g/l TDS	>1 g/l CO _{2(g)}				
5	JAVORNIK, 1998	X					
6	URADNI LIST RS, 2004, 2005	Ni nujno / Not necessarily	Ni nujno / Not necessarily	X	X	X	X
7	KIRSCHNER, 2005	>1 g/l TDS				X	
8	PAVŠIČ et al., 2006	X	X				
9	DRAGIŠIČ & POLOMIČIČ, 2009	>1 g/l TDS	Ni nujno / Not necessarily		X		
10	BUDAPEST WATER SUMMIT, 2013	400–2500 mg/l TDS					
11	INTERNET 3, 2015	>1 g/l TDS	>250 mg/l CO _{2(aq)}			X	
12	CENZON, 2014	>250 ppm (~mg/l) TDS			X	X	X
13	EFBW, 2014	Ni nujno / Not necessarily	Ni nujno / Not necessarily	X	X	X	
14	IBWA, 2016; GNI, 2016	>250 ppm (~mg/l) TDS		X	X	X	X

Tabela 6. Primerjava 10 definicij *slatine* glede na izvor ter vsebnost raztopljenih snovi in plina.

Table 6. Comparison of 10 definitions of a *slatina* based on its source, and content of dissolved solids and gas.

Št. / No.	Vir / Reference	Naraven izvor / Natural source	Je mineralna voda / Is mineral water	Visoka vsebnost / High content of	
				Skupnih raztopljenih snovi / Total dissolved solids	Plinov / Gases
1	BAJEC et al., 1970			X	
2	BEZLAJ, 1995		X	X	
3	LAH, 2002			>0,5 % soli ali mineralov / salts or minerals	
4	VASELLI et al., 2002	X			X
5	URADNI LIST RS, 2004, 2005, 2008	X	X		>250 mg/l CO _{2(g)}
6	KIRSCHNER, 2005				>1000 oz. / or 500 mg/l CO _{2(aq)}
7	PAVŠIČ et al., 2006			X	X
8	DRAGIŠIČ & POLOMIČIČ, 2009	X	X		>250 mg/l CO _{2(g)}
9	INTERNET 2, 6, 2015	X	X		
10	INTERNET 5, 2016				X

Tabela 7. Razvrstitev 11 opazovanih izvirov med *mofete*, *mineralne vode* in *slatine*.Table 7. Classification of the 11 investigated springs into *mofettes*, *mineral waters* and *slatinas*.

Izvir / Spring	Značilnosti izvira / Characteristics of the spring			Mofeta / Mofette	Mineralna voda / Mineral water	Slatina / Slatina
	Prosti plin / Free gas	Spremenjeno rastje / Changed vegetation	Skupne raz- topljene snovi / Total dissolved solids >1 g/l			
Ihovska slatina	X		X (2,2 g/l)*		X	?
Ivanjševska slatina	X		X (3,5 g/l)*		X	?
mofeta ob Lokavski slatini	X		(0,69 g/l)**	X (suha / dry)		
Mofeta Rihtarovci	X	X	(0,56 g/l)**	X (suha / dry)		
Polička slatina	X	X	(0,03 g/l)*	X (mokra / wet)		?
Radvenska slatina	X		(2,0 g/l)*		X	?
Mofeta Strmec	X	X	(0,39 g/l)**	X (suha / dry)		
Mofeta Slepice	X		(0,06 g/l)**	X (mokra / wet)		?
Ujterska slatina			(0,01 g/l)**			
Verjanska slatina	X		(0,6 g/l)*			?
Žekš	X		(1,7 g/l)*		X	?

* izračunano na podlagi kemijskih analiz / calculated from chemical analyses

** izračunano z uporabo enačbe 1 in faktorja A=0,76. Tudi če A=1, vredosti ne presegajo 1 g/l. / Calculated using the Equation 1 and factor A=0.76. Even if A=1, the results do not exceed 1 g/l.

slatine je v pričakovanem razponu za podzemne vode na tem območju. Intenzivnost plina je zelo nizka, pH pa višji kot pri *mofetah*, zato menimo, da uvrstitev mednje ni upravičena, glede na mineralizacijo pa tudi ne ustreza *mineralni vodi*. Ujterska slatina je nizkomineralizirana podzemna voda brez opaznega izhajanja plina in ne ustreza nobeni od kategorij.

Zaključki

Ugotovili smo, da se preiskanih 11 izvirov zelo razlikuje po svojem izgledu in fizikalno-kemijskih lastnostih vode. Temperatura vode je nihala od 4,1 (Polička slatina) do 11,2 °C (Ihovska slatina), elektroprevodnost od 50 µS/cm (Polička slatina) do 3285 µS/cm (Ivanjševska slatina), pH vrednost od 4,4 (Slepice) do 8,9 (Ivanjševska slatina), ORP od -16,5 mV (mofeta ob Lokavski slatini) do 334,7 mV (Polička slatina), raztopljen kisik od 0,3 % (mofeta Strmec) do 73,4 % (mofeta Rihtarovci), z izjemo Ivanjševske slatine (121 %), kjer je meritev možna le na iztoku cevi iz zajetja. Izračunana količina skupnih raztopljenih snovi je bila od 31 mg/l (Polička slatina) do 3,5 g/l (Ivanjševska slatina). Spremenljivost izmerjenih vrednosti je vsaj deloma pogojena z možnostjo vdora sveže padavinske in/ali plitve, hladne podzemne vode v izvir.

Izdelali smo batimetrične 3D modele izvirnega območja za mofeti Slepice, Poličko slatino, Verjansko slatino in Žekš ter na tlorisih označili skupno 81 mest izhajanja plina. Ocenjena intenzivnost dotoka po subjektivni, vizualni petstopenjski lestvici z rangi 1–5 je od 1 pri Verjanski slatini do 5 pri največji mofeti Slepice. Izviri niso povsem okrogli, kar je lahko v določenih primerih posledica njihove rabe v preteklosti in zdaj neopaznih zagatnic. Daljša stranica dosega tudi čez 4 m, a večinoma je 1–2 m. Globina je do 2 m, le v primeru Žekša več. Povezave med globino dna izvira in intenzivnostjo izhajanja plina na vodni površini nismo našli.

Pregled definicij *mofete*, *mineralne vode* in *slatine* je povzel neenotnost izrazoslovja. Kot *mofete* smo označili stalni površinski pojav izhajanja hladnega plina, predvsem CO₂, z intenzivnostjo večjo kot 2 (po lestvici od 1 do 5). Za *suhe mofete* (mofeta Rihtarovci, mofeta Strmec, mofeta pri Lokavski slatini) je značilno spremenjeno rastje in lokalno gola tla. V *mokrih mofetah* (Polička slatina in Slepice) je v kotanjah prisotna nizko mineralizirana padavinska voda s kislim pH.

Ihovska, Ivanjševska in Radvenska slatina ter Žekš so izviri *mineralne vode*, ki vsebuje nad 1 g/l skupnih raztopljenih snovi in je bogata s prostim CO₂. Intenzivnost izhajanja plina je 2–4 na lestvici do 5.

Verjanska slatina ni *mineralna voda* niti *mofeta*, kajti intenzivnost izhajanja plina je 1. Mogoče je *slatina* z nad 250 mg/l prostega CO₂ (CO₂)_g, kar je pričakovano, a ne dokazano še za šest drugih izvirov. Ujterska slatina ne ustreza nobeni od teh definicij.

Mofettes in Slovenske gorice, Slovenia Short summary

Natural CO₂ springs named *mofettes* occur in volcanic and non-volcanic areas worldwide, and also occur in Slovenske gorice in Slovenia. There, a number of *mofettes* and several CO₂-rich *mineral waters* are known but have been rather poorly investigated. Most of the 11 springs included in the presented investigation (Fig. 1) emerge on the Badenian-Sarmatian clastic rocks of the Špilje Formation, some on the Lower Pannonian-Upper Pontian clastics of the Mura Formation, and the rest on the Quaternary sandy clay (for details see references in the first five sections of the paper). The latest research of these features (BRÄUER et al., 2016) indicates that these gasses originate predominantly in the Earth's mantle.

A field survey was performed between December 2014 and March 2015 at 11 sites as indicated in Table 1. Their GPS locations were recorded, the depth of the springs mapped on a 10 × 10 cm or 20 × 20 cm grid, and field physicochemical parameters of the water, when present, were measured. A visual, and therefore subjective, nominal scale was elaborated to differentiate among various intensities of degassing (Tab. 2), ranging between 1 and 5. Higher numbers denote increasing frequency, abundance and intensity of gas bubbles.

The results of the spring water measurements are presented in Table 3 and Figure 2 and differ noticeably. Water temperature was in the range of 4.1–11.2 °C, conductivity 50–3285 µS/cm, pH value 4.4–8.9, ORP -16.5–334.7 mV, dissolved oxygen 0.3–73.4 % (or 121 % for captured Ivanjševska slatina), and TDS from 31 mg/l to 3.5 g/l. Variations in the three measurements (Tab. 3) is largely attributable to the variable inflow of recent meteoric water and/or fresh, shallow groundwater into the springs.

This was supplemented by five bathymetric 3D models of natural springs as shown in Figures 3 to 7, where 81 degassing points are also shown. The shape of the springs is quite angular, which might be due to their capture in the past as drinking water resources. The maximum length of the side may exceed 4 m, but is more commonly 1–2 m; their depth very rarely exceeds 2 m. The intensity of individual degassing points varies from 1 at Verjanska slatina to 5 at the largest mofette of Slepice, but is largely between 2 and 4 (Fig. 8). We could not find a correlation between the depth of the spring (or the length of the water column) and the intensity of degassing at the water surface.

Tables 4 to 6 briefly summarize the main similarities of as many as 24 definitions of a *mofette*, 14 of a *mineral water*, and 10 of a *slatina*. We identified five *mofettes*, namely surface features with constant degassing of cold, mainly CO₂ gas with an intensity of 2 or more (on a scale 1–5). Three are *dry mofettes* (mofeta Rihtarovci, mofeta Strmec, and mofeta pri Lokavski slatini), exhibiting bare soil vents and characteristic vegetation. Two are *wet mofettes* (Polička slatina and Slepice), where the depressions are constantly filled with acidic (pH = 4.5–6.8) and low mineralised meteoric water (EC = 50–86 µS/cm). The hydrogeological term *mineral water* usually denotes high mineralized groundwaters, often also rich in gases (KAČURA, 1980; INTERNET 4, 1994; MIOČ, 1996; JAVORNIK, 1998; PAVŠIČ et al., 2006; DRAGIŠIĆ & POLOMIČIĆ, 2009; INTERNET 3), and similar definitions are reported in balneology (KIRSCHNER, 2005; BUDAPEST WATER SUMMIT, 2013). However, when talking about bottled waters the term *natural mineral water* is commonly used, which refers not to the lowest concentrations of certain parameters but entails rather the addition of other demands or parameters, such as small variations in the chemical composition of the groundwater, a clear distinction from drinking waters and other (CCA, 1983; URADNI LIST RS, 2004, 2005, 2008; CENZON, 2014; EFBW, 2014; IBWA, 2016; GNI, 2016). In this paper, we determined waters at Ihovska slatina, Ivanjševska slatina, Radvenska slatina, and Žekš as *mineral waters*, having more than 1 g/l of total dissolved solids and/or above 250 mg/l of free CO₂ (CO₂)_g. Therefore, these springs are rich in free gas with a flux intensity of 2–4.

A *slatina* is a Slovenian term that cannot be consistently or definitively translated. It usually denotes either high mineralized *mineral waters*,

often rich in gases, or acid *mineral waters* (BAJEC et al., 1970; BEZLAJ, 1995; LAH, 2002; VASELLI et al., 2002; PAVŠIČ et al., 2006; DRAGIŠIČ & POLOMIČIČ, 2009). In balneology, the German “die Säuerlinge” (KIRSCHNER, 2005) has a similar meaning. The English terms “carbonated water, soda water, sparkling water, fizzy water” refer to bottled waters with a high CO₂ content, and are therefore not directly comparable. We propose to use the term *slatina* for waters with more than 250 mg/l of free CO₂ (CO₂)_g. Since we did not measure the latter parameter, the seven potential such springs (Tab. 7) must be further analysed.

Verjanska slatina and Ujterska slatina are neither *mofettes* nor *mineral waters*.

Zahvala

Raziskava je bila sofinancirana s strani MIZŠ in ESC po pogodbi 3330-14-509001 ter ARRS programske skupine P1-0020 Podzemne vode in geokemija. Avtorici se zahvaljujeva izr. prof. dr. Mihaelu Brenčiču in dr. Tjaši Kanduč za skrben pregled prispevka in koristne nasvete pri oblikovanju poudarkov.

Viri in literatura

- ALBU, M., BANKS, D. & NASH, H. 1997: Mineral and thermal groundwater resources. Chapman & Hell, London, UK: 447 p.
- ARSO; 2016: Klimatski podatki za 30-letno obdobje (tabele). Internet: http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/gornja_radgona.htm (3.9.2016)
- BAGAR POVŠE, M., DEŠNIK, S., KRAMBERGER, L., TURK, V. & ZEMLJIČ, A. 2007: Med vrelni življenja. Turistično društvo Gornja Radgona, Murska Sobota.
- BAJEC, A., JURANČIČ, J., KLOPČIČ, M., LEGIŠA, L., SUHADOLNIK, S. & TOMŠIČ, F. 1970: Slovar slovenskega knjižnega jezika. Internet: <http://bos.zrc-sazu.si/sskj.html> (18. 4. 2015).
- BERGFELD, D., FRASER, G. & JANIK, C.J. 2001: Elevated carbon dioxide flux at the Dixie Valley geothermal field, Nevada; relations between surface phenomena and the geothermal reservoir. *Chemical Geology*, 177: 43–66, doi:10.1016/S0009-2541(00)00381-8.
- BEULIG, F., HEUER, V., AKOB, D.M., VIEHWEGER, B., ELVERT, M., HERRMANN, M., HINRICHS, K-U. & KÜSEL, K. 2015: Carbon flow from volcanic CO₂ into soil microbial communities of a wetland mofette, *Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology*, 9/3: 746–759, doi:10.1038/ismej.2014.148.
- BEZLAJ, F. 1995: Etimološki slovar slovenskega jezika: tretja knjiga P-S. Mladinska knjiga, Ljubljana: 355 p.
- BRÄUER, K., GEISSLER, W.H., KÄMPF, H., NIEDERMANN, S. & RMAN, N. 2016: Helium and carbon isotope signatures of gas exhalations in the westernmost part of the Pannonian Basin (SE Austria/NE Slovenia): Evidence for active lithospheric mantle degassing. *Chemical Geology*, 422: 60–70, doi:10.1016/j.chemgeo.2015.12.016.
- BUDAPEST WATER SUMMIT, 2013: Main types of mineral and medic water. Internet: <http://www.budapestwatersummit.hu/> (18. 4. 2015).
- CCA (COMMISSION DU CODEX ALIMENTARIUS), 1983: Normes Codex Pour les Eaux Minérales Naturelles. Commission du Codex Alimentarius Vol. XII, Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires (CAC (VOL. XII, 1st edn). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)/ Organisation mondiale de la santé (WHO), Rome.
- CENZON, M. 2014: Different Types Of Bottled Water Explained. Internet: <http://www.symptomfind.com/nutrition-supplements/different-types-of-bottled-water-explained/> (2. 9. 2016).
- CHIODINI, G., GRANIERI, D., AVONI, R., CALIRO, S., COSTA, A., MINOPOLI, C. & VILARDO, G. 2010: Non-volcanic CO₂ Earth degassing: case of Mefite d'Ansanto (southern Apennines), Italy. *Geophysical Research Letters*, 37/11, doi:10.1029/2010GL042858.
- COLLINS, W. 1986: Collins English Dictionary. Internet: <http://www.collinsdictionary.com/dictionary/english> (18. 4. 2015).
- DERRILL, M., KERRICK, D. M., SEWARD, T. M. & CALDEIRA, K. 1995: Convective hydrothermal CO₂ emission from high heat flow regions. *Chemical Geology*, 121/1–4: 285–293, doi:10.1016/0009-2541(94)00148-2.
- DOĞAN, T., SUMINO, H., NAGAO, K., NOTSU, K., TUNCER, M.K. & ÇELİK, C. 2009: Adjacent releases of mantle helium and soil CO₂ from active faults: Observations from the Marmara region of the North Anatolian Fault zone. *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*, 10/11: 1–11, doi:10.1029/2009GC002745.
- DRAGIŠIČ, V. & POLOMIČIČ, D. 2009: Hidrogeološki rečnik – Dictionary of Hydrogeology. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd: 570 p.

- EFBW 2014: Natural Mineral water. Internet: <http://www.efbw.eu/index.php?id=4> (2. 9. 2016).
- ETIOPE, G. 2009: Natural emissions of methane from geological seepage in Europe. *Atmospheric Environment*, 43: 1430–1443, [doi:10.1016/j.atmosenv.2008.03.014](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.014).
- EVANS, C. W., SOREY, L. M., COOK, C. A., KENNEDY, B. M., SHUSTER, D. L., COLVARD, E. M., WHITE, L. D. & HUEBNER, M. A. 2002: Tracing and quantifying magmatic carbon discharge in cold groundwaters: lessons learned from Mammoth Mountain, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 114/3–4: 291–312, [doi:10.1016/S0377-0273\(01\)00268-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00268-2).
- FODOR, L., JELEN, B., MARTON, E., RIFELJ, H., KRALJIĆ, M., KEVRIĆ, 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](https://doi.org/10.5474/geologija.2002.009).
- FODOR, L., BADA, G., CSILLAG, G., HORVATH, E., RUSZKICZAY-RUDIGERY, 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.
- GABOR, L. 2015: Pregled mofet na območju Slovenskih goric. Diplomsko delo. Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 58 p.
- GNI, 2016: Where Does Bottled Water Come From? *Geology - Geoscience News and Information*. Internet: <http://geology.com/articles/bottled-water.shtml> (2. 9. 2016)
- HOCHSTEIN, M. & BROWNE, P. 2000: Surface manifestations of geothermal systems with volcanic heat sources. In: SIGURDSSON, H. (ed.): *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego: 835–855.
- HÖBERG, K., SCHULZ, H.-J., BALKENHOL, B., PILZ, M., THOMALLA, A., RUSSEL, D.J. & PFANZ, H. 2015: Soil faunal communities from mofette fields: Effects of high geogenic carbon dioxide concentration, *Soil Biology and Biochemistry*, 88: 420–429, [doi:10.1016/j.soilbio.2015.06.017](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.017).
- HORVÁTH, F., MUSITZ, B., BALÁZS, A., VEGH, A., UHRIN, A., NADOR, A., KOROKNAI, B., PAP, N., TOTH, T. & WORUM, G. 2015: Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. *Geothermics*, 53: 328–352, [doi:10.1016/j.geothermics.2014.07.009](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.009).
- HOUNSLOW, A. W. 1995: *Water Quality data: Analysis and Interpretations*. Lewis Publishers, New York: 397 p.
- IBWA 2016: Types of water – bottled. International Bottled Water Association. Internet: <http://www.bottledwater.org/types/bottled-water> (2. 9. 2016)
- JAVORNIK, M. 1998: Veliki splošni leksikon v osmih knjigah: Peta knjiga Ma-Ož. DZS, Ljubljana: 2479–3094.
- JELEN, B. 2010: Tektonska karta predkenozojske podlage Mursko-zalskega bazena na slovenskem območju projekta T-JAM. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- JELEN, B. & RIFELJ, H. 2005: Inner geodynamic control on the Late Paleogene and Neogene stratigraphy in Slovenia. Abstract book, 12th Congress R.C.M.N.S. Patterns in Processes in the Neogene of the Mediterranean Region, Vienna. University of Vienna, Natural History Museum of Vienna: 116–118.
- JELEN, B. & RIFELJ, H. 2011: Površinska litostratigrafska in tektonska strukturna karta območja T-JAM projekta, severovzhodna Slovenija 1: 100.000. Internet: <http://www.geo-zs.si/podrocje.aspx?id=489> (1. 7. 2015)
- JELEN, B., RIFELJ, H., BAVEC, M. & RAJVER, D. 2006: Opredelitev dosedanjega konceptualnega geološkega modela Murske depresije. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 56 p.
- KAČURA, G. 1980: *Minerální vody Severočeského kraje*. Ústřední ústav geologický, Praha: 9–12.
- KÄMPF, H., BRAUER, K., SCHUMANN, J., HAHNE, K. & STRAUCH, G. 2013: CO₂ discharge in an active, non-volcanic continental rift area (Czech Republic): Characterisation ($\delta^{13}\text{C}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$) and quantification of diffuse and vent CO₂ emissions. *Chemical Geology*, 339: 71–83, [doi:10.1016/j.chemgeo.2012.08.005](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.08.005).
- KIRSCHNER, C. 2005: Glossar - Europäischer Heilbäderverband. Notamed Verlag, Brusels: 351 p.
- KLANJŠČEK, M. & RADOVAN, D. 2005: Navtični vodnik slovenskega morja in obale. Internet: <http://www.hidrografija.si/p1/3-2.php> (13. 4. 2015)
- KOKOL, A. 2008: Regionalna geografija lokalnih mineralnih izvirov na Radgonskem območju. Diplomsko delo, Filozofska fakulteta, Ljubljana: 104 p.
- KRALJ, P. 2007: Die Mineralwasserquellen von Benedikt. *Der Mineralbrunnen*, 7: 1–4.
- KRALJ, P. & KRALJ, P. 2000: Thermal and mineral waters in north-eastern Slovenia, *Environmental Geology*, 39/5: 488–500, [doi:10.1007/s002540050455](https://doi.org/10.1007/s002540050455).

- KRALJ, P., KRALJ, P., BIZJAK, M., MEDIĆ, M. & MARINKO, M. 1998: Lastnosti termalne vode v geotermalnem sistemu Termal I v Prekmurju, III. faza. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana.
- 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](https://doi.org/10.1007/s00254-008-1631-3).
- KRÖLL, R. 2010: Mofettes (dry CO₂ exhalations) along the Rhine on Hammerstein Island and in Wied near Datzeroth. *Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen*, 35: 61–72.
- LAH, A. 2002: Okoljski pojavi in pojmi: okoljsko izrazje v slovenskem in tujih jezikih z vsebinskimi pojasnili. Svet za varstvo okolja Republike Slovenije, Ljubljana: 116 p.
- LAN, T.F., YANG, T.F., LEE, H.F., CHEN, Y.C., CHEN, C.H., SONG, S.R. & TSAO, S. 2007: Composition and flux of soil gas in Liu-Huang-Ku hydrothermal area, northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geotherm Research*, 165: 32–45, [doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.015).
- LAPANJE, A. 2006: Izvor in kemijska sestava termalnih in termomineralnih vod v Sloveniji. *Geologija*, 49/2: 347–370, [doi:10.5474/geologija.2006.025](https://doi.org/10.5474/geologija.2006.025).
- LAPANJE, A. 2007: Nekaj pojasnil k pripombam dr. Polone Kralj na članek Izvor in kemijska Sestava termalnih in termomineralnih vod v Sloveniji. *Geologija*, 50/1: 215–220.
- LAPANJE, A. & RMAN, N. 2009: Termalna in termomineralna voda = Thermal and Thermomineral water. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 553–560.
- LAPANJE, A., BAEK, R., BUDKOVIČ, T., DOMBERGER, G., GOETZL, G., HRIBERNIK, K., KUMELJ, Š., LETOUZE, G., LIPIARSKI, P., POLTNIG, W. & RAJVER, D. 2007: Geotermalni viri severne in severovzhodne Slovenije. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 124 p.
- LEWICKI, J.L., EVANS, W.C., HILLEY, G.E., SOREY, M.L., ROGIE, J.D. & BRANTLEY, S.L. 2003: Shallow soil CO₂ flow along the San Andreas and Calaveras faults, California. *Journal of Geophysical Research*, 108/B4, [doi:10.1029/2002JB2141](https://doi.org/10.1029/2002JB2141).
- LUČIĆ, D., SAFTIĆ, B., KRIZMANIĆ, K., PRELOGOVIĆ, E., BRITVIĆ, V., MESIĆ, I. & TADEJ, J. 2001: The Neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatia. *Marine and Petroleum Geology*, 18: 133–147.
- LYNNE, B. Y. 2003: *The Geothermal Guide to Wai-O-Tapu Thermal Wonderland*. Publishing Press, 64 p.
- MAČEK, I., VIDEMŠEK, U., KASTELEC, D. & STOPAR, D. 2009: Geological CO₂ affect microbial respiration rates in Stavešinci mofette soils. *Acta Biologica Slovenica*, 52: 41–48.
- MAČEK, I. 2013: A decade of research in mofette areas has given us new insights into adaptation of soil microorganisms to abiotic stress. *Acta Agriculturae Slovenica*, 2: 209–217.
- MARKIČ, M. 2013: Zakaj nastopata zemeljski plin in nafta ravno na območju Lendave. *Mineralne surovine v letu 2013*, 10/1: 122–138.
- MEHLHORN, J., BEULIG, F., KUSEL, K. & PLANER-FRIEDRICH, B. 2014: Carbon dioxide triggered metal(loid) mobilisation in a mofette. *Chemical geology*, 382: 54–66, [doi:10.1016/j.chemgeo.2014.05.027](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.027).
- MINISSALE, A., MAGRO, G., MARTINELLI, G., VASELLI, O. & TASSI, G. F. 2000: Fluid geochemical transect in the Northern Apennines (central-northern Italy): fluid genesis and migration and tectonic implications. *Tectonophysics*, 319: 199–222.
- MIOČ, P. 1996: Letno poročilo – Projekt: Geološka topografija mineraliziranih vod. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, Ljubljana: 24 p.
- MIOČ, P. 1997: Geološka topografija mineraliziranih vod – III faza, Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, Ljubljana: 19 p.
- MIOČ, P. & MARKOVIĆ, S. 1998: Osnovna geološka karta SFRJ. Tolmač lista Čakovec 1: 100 000. Zvezni geološki zavod Beograd, Geološki zavod Ljubljana.
- MIOČ, P. & ŽNIDARČIČ, M. 1987: Osnovna geološka karta SFRJ. Tolmač lista Maribor in Leibniz 1: 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd, Geološki zavod Ljubljana.
- MOTYČKOVÁ, H., ŠIROVÁ – MOTYČKOVÁ, K., MOTYČKA, V. & ŠÍR, J. 2012: *Geologické zajímavosti České republiky*. Academia, Průvodce, Praha: 364 p.
- NÁDOR, A., LAPANJE, A., TÓTH, G., RMAN, N., SZÖSC, T., PRESTOR, J., UHRIN, A., RAJVER, D., FODOR, L., MURÁTI, J. & SZÉKELY, E. 2012: Transboundary geothermal resources of the Mura-Zala basin : a need for joint thermal aquifer management of Slovenia and Hungary. *Geologija*, 55/2: 209–223, [doi:10.5474/geologija.2012.013](https://doi.org/10.5474/geologija.2012.013).
- NARAVOVARSTVENI ATLAS, 2013. Internet: <http://www.naravovarstveni-atlas.si/nvajavni/DefaultNva.aspx> (24. 4. 2015).
- NÉDA, T., SZAKÁCS, A., COSMA, C. & MÓCSY, I. 2008: Radon Concentration measurments

- in mofettes from Harghita and Covasna Countries, Romania. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99/12: 1819–1824, [doi:10.1016/j.jenvrad.2008.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.07.007).
- NEUENDORF, K. K. E., MEHL, J. & JACKSON, J. A. 2005: Glossary of Geology. American Geological Institute, Alexandria: 779 p.
- NICKSCHICK, T., KAMPF, H., FLECHSIG, C., MRLINA, J. & HEINICKE, J. 2015: CO₂ degassing in the Hartouov mofette area, western Eger Rift, imaged by CO₂ mapping and geoelectrical and gravity surveys, *International Journal of Earth Science*, 104/8: 2107–2129, [doi:10.1007/s00531-014-1140-4](https://doi.org/10.1007/s00531-014-1140-4).
- NOVAK, D. 1974–1977: Hidrogeološke raziskave mineralne vode pri Lenartu – več faz. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana.
- NOSAN, A. 1973: Termalni in mineralni vrelci v Sloveniji. *Geologija*, 16: 6–81.
- OGOREVEC, B. 2008: Vpliv vode v tleh na tok geogene CO₂ iz tal v atmosfero. Diplomsko delo, Biotehniška fakulteta, Ljubljana: 39 p.
- OXFORD UNIVERSITY PRESS 2015: Oxford Dictionaries. <http://oxforddictionaries.com/> (12. 4. 2015).
- PAVŠIČ, J., PLENIČAR, M., STRMOLE, D., KRALJ, P. & GRM, M. 2006: Geološki terminološki slovar. ZRC SAZU, Ljubljana: 331 p.
- PAVŠIČ, J. & HORVAT, A. 2009: Eocen, oligocen in miocen v osrednji in vzhodni Sloveniji = The Eocene, Oligocene and Miocene in Central and Eastern Slovenia. In: PLENIČAR, M., OGOREVEC, B., & NOVAK, M. (eds.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 373–426.
- PEZDIČ, J. 1991: Izotopi v termomineralnih vodnih sistemih; Doktorska disertacija. Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Ljubljana: 157 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*, 1: 319–240.
- PEZDIČ, J. 2003: Origin and migration of gases in the Pannonian sedimentary basin. *Proceedings of ICGG7*: 47–49.
- PFANZ, H., VODNIK, D., WITTMANN, C., ASCHAN, G., BATIČ, F., TURK, B. & MAČEK, I. 2007: Photosynthetic performance (CO₂-compensation point, carboxylation efficiency, and net photosynthesis) of timothy grass (*Phleum pratense* L.) is affected by elevated carbon dioxide in post-volcanic mofette areas. *Environmental and Experimental Botany*, 61/1: 41–48, [doi:10.1016/j.envexpbot.2007.02.008](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.02.008).
- PLENIČAR, M. & NOSAN, A. 1958: Paleogeografija Panonskega obrobja v Sloveniji. *Geologija*, 4: 94–110.
- RENNERT, T., EUSTERHUES, K., DE ANDRADE, V. & TOTSCHKE, K. U. 2012: Iron species in soils on a mofette site studied by Fe K-edge X-ray absorption near-edge spectroscopy, *Chemical Geology*, 332–333: 116–123, [doi:10.1016/j.chemgeo.2012.09.046](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.09.046).
- RENNERT, T. & PFANZ, H. 2016: Hypoxic and acidic – Soils on mofette fields. *Geoderma*, 280: 73–81, [doi:10.1016/j.geoderma.2016.06.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.019).
- RMAN, N. 2016: Hydrogeochemical and isotopic tracers for identification of seasonal and long-term over-exploitation of the Pleistocene thermal waters. *Environmental monitoring and assessment*, 188/4: 242–262, [doi:10.1007/s10661-016-5250-2](https://doi.org/10.1007/s10661-016-5250-2).
- RMAN, N. & KANDUČ, T. 2015: Isotopic composition and geochemistry of mineral water springs and mofettes, a case study of Slovenia. In: KRAJCAR BRONIĆ, I., HORVATINČIĆ, N. & OBELIĆ, B. (ur.): *ESIR Isotope Workshop XIII*, Ruđer Bošković Institute, Zagreb
- RMAN, N., LAPANJE, A. & RAJVER, D. 2012: Analiza uporabe termalne vode v severovzhodni Sloveniji. *Geologija*, 55/2: 225–242, [doi:10.5474/geologija.2012.014](https://doi.org/10.5474/geologija.2012.014).
- RMAN, N., LAPANJE, A., PRESTOR, J. & O'SULLIVAN, M. J. 2016: Mitigating depletion of a porous geothermal aquifer in the Pannonian sedimentary basin. *Environmental Earth Science*, 75: 723, [doi:10.1007/s12665-016-5634-1](https://doi.org/10.1007/s12665-016-5634-1).
- ROGIE, J. D., KERRICK, D. M., CHIODINI, G. & FRONDI, F. 2000: Flux measurements of nonvolcanic CO₂ emission from some vents in central Italy. *Journal of Geophysical Research*, 105: 8435–8445, [doi:10.1029/1999JB900430](https://doi.org/10.1029/1999JB900430).
- SAFTIĆ, B., VELIĆ, J., SZTANO, O., JUHAZS, G. & IVKOVIĆ, Ž. 2003: Tertiary Subsurface Facies, Source Rocks and Hydrocarbon Reservoirs in the SW Part of the Pannonian Basin. *Geologica Croatica*, 56: 101–122.
- SAUER, U., SCHÜTZE, C., LEVEN, C., SCHLÖMER, S. & DIETRICH, P. 2013: An integrative hierarchical monitoring approach for detecting and characterizing CO₂ releases. *Energy Procedia*, 37: 4257–4267. [doi:10.1016/j.egypro.2013.06.328](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.328).
- SENEKOVIČ, M. 2011: Mineralne vode na območju Lenarta v Slovenskih goricah. Diplomsko delo. Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 87 p.
- SZÖSC, T., RMAN, N., SÜVEGES, M., PALCSU, L., TÖTH, G. & LAPANJE, A. 2013: The application of isotope and chemical analyses in

- managing transboundary groundwater resources. *Applied geochemistry*, 32: 95–107, doi:10.1016/j.apgeochem.2012.10.006.
- ŠLEBINGER, C. 1955: O sulfidih v pomurskih slatinah ter njihovem pomenu za nastanek slatin. *Geologija*, 3: 226–230.
- ŠRAM, D., RMAN, N., RIŽNAR, I. & LAPANJE, A. 2015: The three-dimensional regional geological model of the Mura-Zala basin, north-eastern Slovenia. *Geologija*, 58/2: 139–154, doi:10.5474/geologija.2015.011.
- TÓTH, G., RMAN, N., ROTÁR-SZALKAI, Á., KERÉKGYÁRTÓ, T., SZÖSC, T., LAPANJE, A., CERNAK, R., REMSÍK, A., SCHUBERT, G. & NÁDOR, A. 2016: Transboundary fresh and thermal groundwater flows in the west part of the Pannonian Basin. *Renewable & sustainable energy reviews*, 57: 439–454, doi:10.1016/j.rser.2015.12.021.
- URADNI LIST RS; 2004: Pravilnik o naravni mineralni vodi, izvirski vodi in namizni vodi. Uradni list, št. 50/2004.
- URADNI LIST RS; 2005: Pravilnik o spremembah in dopolnitvah Pravilnika o naravni mineralni vodi, izvirski vodi in namizni vodi. Uradni list, št. 75/2005.
- URADNI LIST RS; 2008: Zakon o kmetijstvu (ZKmet-1). Uradni list, št. 45/2008.
- VASELLI, O., MINISSALE, A., TASSI, F., MAGRO, G., SEGHEDEI, I., IOANE, D. & SZAKACS, A. 2002: A geochemical traverse across the Eastern Carpathians (Romania): constraints on the origin and evolution of the mineral water and gas discharges. *Chemical Geology*, 182: 637–654.
- VODNIK, D., PFANZ, H., MAČEK, I., KASTELEC, D., LOJEN, S. & BATIČ, F. 2002: Photosynthesis of cocksbur [Echinochloa crus-galli (L.) Beauv.] at sites of naturally elevated CO₂ concentration. *Photosynthetica*, 4: 575–579.
- VODNIK, D., KASTELEC, H., PFANZ, H., MAČEK, I. & TURK, B. 2006: Small-scale spatial variation in soil CO₂ concentration in a natural carbon dioxide spring and some related plant responses. *Geoderma*, 133: 309–319, doi:10.1016/j.geoderma.2005.07.016.
- VODNIK, D., VIDEMŠEK, U., PINTAR, M., MAČEK, I. & PFANZ, H. 2009: The characteristic of soil CO₂ fluxes at a site with natural CO₂ enrichment. *Geoderma*, 150/1–2: 32–37, doi:10.1016/j.geoderma.2009.01.005.
- VRABEC, M., PLENIČAR, M., ŠMUC, A. & BUSER, S. 2009: Geološki razvoj Slovenije – povzetek. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 23–40.
- VRZEL, J. 2012: Hidrogeološka analiza odnosa med plitvim in globokim vodonosnikom na Radenskem območju. Diplomsko delo, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 62 p.
- WEINLICH, FH., TESAR, J., WEISE, SM., BRÄUER, K. & KÄMPF, H. 1998: Gas flux distribution in mineral springs and tectonic structure in north-west Bohemia. *Journal of Czech Geological Society*, 43/1–2: 91–110.
- ŽLEBNIK, L. 1974: Hidrogeološke razmere v Nuskovi na Goričkem. *Geologija*, 17: 477–491.
- ŽLEBNIK, L. 1975: Hidrogeološke raziskave mineralne vode v Radencih v letu 1974: Letno poročilo o rezultatih raziskovalne naloge. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana: 25 p.
- ŽLEBNIK, L. 1978a: Terciarni vodonosniki v Slovenskih goricah in na Goričkem. *Geologija*, 21/2: 311–324.
- ŽLEBNIK, L. 1978b: Letno poročilo: Karta mineralnih in termalnih vod Slovenije v merilu 1:200.000, II.faza, Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana.
- ŽLEBNIK, L. 1980: Hidrogeološke raziskave termomineralne vode v Radencih: Letno poročilo. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana: 14 p.
- ŽLEBNIK, L. 2009: Pregled raziskav in zajetij mineralne vode v Radencih od leta 1965 naprej. *Radenski vestnik*, posebna izdaja ob 140-letnici Radenske 1869 – 2009: 31–33.
- Internetni viri:
- INTERNET 1: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mofetta> (18.2.2015)
- INTERNET 2: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Slatina> (22.12.2015)
- INTERNET 3: https://sl.wikipedia.org/wiki/Mineralna_voda (22.12.2015)
- INTERNET 4: <http://www.britannica.com/> (22.12.2015)
- INTERNET 5: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbonated_water (3.9.2016)
- INTERNET 6: https://en.wikipedia.org/wiki/Sour_water (22.12.2015)



Hydrogeochemical and isotopic characterization of Pesnica River, Slovenia

Hidrogeokemične in izotopske značilnosti reke Pesnice

Tjaša KANDUČ^{1*}, Zoran SAMARDŽIJA^{1b}, Nataša MORI³, Andreja JEREČIČ³, Ines LEVAČIČ⁴, Miha KRAČUN⁴, Johanna A. ROBINSON^{1,2}, Stojan ŽIGON¹, Željko BLAŽEKA⁴ & David KOČMAN¹

¹Department of Environmental Sciences, ^{1b}Department for Nanostructured Materials, Jožef Stefan Institute, Jamova cesta 39, SI–1000 Ljubljana, Slovenia; e-mail: tjasa.kanduc@ijs.si*, zoran.samardzija@ijs.si, johanna.a.robinson@ijs.si, stojan.zigon@ijs.si, david.kocman@ijs.si

²Jožef Stefan International Postgraduate School, Jamova cesta 39, SI–1000 Ljubljana, Slovenia

³Department of Organisms and Ecosystem Research, National Institute of Biology, Večna pot 111, SI–1000 Ljubljana, Slovenia; e-mail: natasa.mori@nib.si, andreja.jerebic@nib.si

⁴Institut za ekološki inženiring d.o.o., Ljubljanska ulica 9, SI–2000 Maribor, Slovenia; e-mail: ines.levacic@iei.si, miha.kracun@iei.si, zeljko.blazeka@iei.si

Prejeto / Received 11. 10. 2016; Sprejeto / Accepted 9. 11. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Key words: River Pesnica, hydrogeochemical composition, stable isotopes, carbon, biogeochemical processes

Ključne besede: reka Pesnica, hidrogeokemijska sestava, stabilni izotopi, ogljik, biogeokemijski procesi

Abstract

The surface water geochemistry and carbon cycling studied here depend mainly on geological composition of the river catchment. The investigated surface waters in the river Pesnica catchment that are heavily hydromorphologically altered (reservoirs, channelization, land melioration systems) represent waters influenced by chemical weathering of carbonates and of mostly clastic rocks (claystone, sandstones, marlstones and siltstones). The objectives of our study were to analyze hydrogeochemical and isotopic composition of dissolved ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) and particulate carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$) with characterization of suspended matter and evaluate biogeochemical processes in Pesnica River in Slovenia before and after the retention. Surface waters are generally close to saturation regarding calcite and dolomite, dissolved CO_2 is 49 to 1000 times oversaturated relative to atmosphere. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ was in the range from -14.8 to -4.2 ‰ and shows following biogeochemical processes in river system: degradation of organic matter, dissolution of carbonates and biological activity, which was confirmed with SEM microscopy and EDXS microanalysis. Results of SEM/EDXS showed that suspended matter is composed of K, Mg and Ca from locations Pesnica 1 and Pesnica 2 (above retention Perniško lake). Sample from Pesnica 3 (below retention) shows higher biological activity, while sample from Pesnica 4 (tributary of Pesnica, drainage channel Biš) contains a lot of particles of microporous structure and fiber structure, which are probably of anthropogenic origin. $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ is changing from -29.5 to -27.6 ‰ and showed different stages of degraded terrestrial material. More negative $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ are shown at location at drainage channel Biš and show higher terrestrial input in river system as locations 1, 2 and 3 Pesnica, which have higher $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ values. This first results about suspended matter in Pesnica watershed serve for evaluation of anthropogenic influences specially in relation with further influences and longer time planning of sustainable river water management.

Izvleček

Geokemija površinskih voda in kroženje ogljika v naši študiji v glavnem zavisita od geološke podlage v porečju. Raziskane površinske vode v porečju Pesnice, ki je hidromorfološko močno preoblikovano (vodni zadrževalniki, urejanje struge, melioracije), predstavljajo vode, na katere vpliva kemijsko preperevanje karbonatov in v glavnem klastičnih kamnin (glinavcev, peščenjakov, laporovcev in meljevcev). Namen naše raziskave je bil analizirati hidrogeokemično in izotopsko sestavo raztopljenega in partikulatnega ogljika skupaj s karakterizacijo suspendirane snovi in oceno biogeokemijskih procesov v porečju Pesnice v Sloveniji pred zadrževalnikom in za njim. Površinske vode so večinoma blizu nasičenja glede na kalcit in dolomit, raztopljen CO_2 je od 49 do 1000 krat prenasiten relativno na atmosfero. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ je bil v razponu od -14.8 do -4.2 ‰ in kaže na sledeče biogeokemijske procese v rečnem sistemu: razgradnja organske snovi, raztapljanje karbonatov in biološka aktivnost, kar je bilo potrjeno s SEM mikroskopijo in EDXS mikroanalizo. Rezultati SEM/EDXS so pokazali, da je suspendirana snov

iz Pesnice 1 in Pesnice 2 (nad zadrževalnikom Perniško jezero) sestavljena iz alumosilikatov s K, Mg in Ca. Vzorec iz Pesnice 3 (pod zadrževalnikom) kaže na veliko biološko aktivnost (diatomeje), medtem ko vzorec iz Pesnice 4 (pritok Pesnice, drenažni kanal Biš) vsebuje veliko delcev mikroporozne strukture in vlaknatih struktur, ki so po vsej verjetnosti antropogenega izvora. $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ se spreminja od -29.5 do -27.6 ‰ in kaže na različne stopnje razgrajenega terestričnega materiala. Bolj negativne vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ opazimo na lokaciji v drenažnem kanalu Biš in kažejo na večji terestrični vnos v rečni sistem kot lokacije Pesnice 1, 2 in 3, ki imajo višje vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$. Ti prvi rezultati o suspendirani snovi v porečju Pesnice služijo za evalvacijo antropogenih vplivov, posebno v povezavi s prihodnjimi vplivi in dolgoročnim načrtovanjem trajnostnega upravljanja s porečjem.

Introduction

It is well known that rivers reflect the biogeochemical processes occurring in their catchment areas (MEYBECK, 1981; MEYBECK, 1987; POPESCU et al., 2015; LI et al., 2016). Understanding the organic and inorganic carbon cycles in river systems is important because it helps to understand the biogeochemical processes in a river and its catchment basin (KARIM & VEIZER, 2000; BARTH et al., 2003; SAMEER et al., 2016). Several studies evaluating biogeochemical processes in Slovenian rivers have been carried out in the past ten years, contributing substantially to a general understanding of their interactions with their catchments (KANDUČ & OGRINC, 2007; KANDUČ et al., 2008; ZAVADLAV et al., 2013; KANDUČ et al., 2013).

Suspended organic matter is known to be complex mixture of molecules such as carbohydrates, amino acids, fatty acids and phenols, particles from wastewaters and industrial water, soil organic matter and biological material like phytoplankton and plant parts (HOPE et al., 1994). Suspended matter in rivers is derived mostly from soil and plant material, so suspended organic matter ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$) in rivers can be used to determine the contribution of terrestrial vegetation and soil matter in the river ecosystem (HEDGES, 1992).

Pesnica is a river that was extensively regulated in the 60's when it was channeled and when multipurpose retention basins were built to mitigate floods (LEITINGER, 2012). Nowadays, droughts in combination with severe loads of nutrients and other pollutants from households and agriculture adversely affect the flora and fauna in the area (MARKOLI, 2012).

The main objective of our study was to understand the hydrogeochemical characteristics and prevailing biogeochemical processes in the Pesnica catchment waters using geochemical and stable carbon isotopes analysis, respectively.

Geological and geomorphological setting

River Pesnica is located in northeastern Slovenia (Fig. 1). It is a left tributary of River Drava, and is the main watercourse in Slovenske gorice. The river originates above Pesnica (in Austria) at an altitude of 300 m; at town Ormož (altitude 190 m) it flows out to the Drava River (Fig. 1). Its length is 69 km, of which 65 km being in Slovenia (STATISTICAL OFFICE OF REPUBLIC OF SLOVENIA, 2002). Its catchment area comprises 539 km². Its mean average discharge between 1926 and 1965 was 6.72 m³/s. It has a mixed snow/rain river regime with high water levels in March and November and low in August and September. In Pesnica catchment area, 3 gauging stations are monitored by the Slovenian Environmental Agency (SEA): Ranca, Gočova, Zamušani I Kobold, 2012).

Land cover in Pesnica catchment is dominated by agriculture areas (~75 %), followed by forests and semi-natural areas (~23 %) and with less than 2% of artificial surfaces (CLC, 2012).

Since Pesnica flows through a lower bushy environment, it has a low specific runoff (10.6 l/s/km²; gauging station Zamušani) and a runoff coefficient of 32.2 % (gauging station Zamušani).

In past years it was found, that mainly in summer, the discharge of Pesnica is mostly below 0.5 m³/s (URBANEK, 1994). Since it flows through an intensively agricultural area, it contains large amount of atrazine and steroid organic substances, together with a high concentration of nitrates in past decade. Pollution with sewage sludge was moderate, and in recent years the river's ecological status has improved (URBANEK, 1994).

Pesnica River is heavily hydromorphologically altered (from Zgornja Kungota to outflow). For the purposes of flood prevention, several reservoirs have been constructed to retain the water: Pernica and tributaries were artificial lakes were constructed for water retention.

Drainage channel at settlement Biš-the municipality Trnovska vas, is a right hand tributary of Pesnica River (P4 in Fig. 1).

Geologically, Pesnica catchment area belongs to the Panonian basin and is of Tertiary and Quaternary ages. The catchment is composed of Miocene and Pliocene sediments (siltstones, marlstones, claystones, dolomite/calcite) and quaternary sediments. The area of the Panonian basin was split into more tectonic units with the Slovenske gorice as the largest tectonic unit. In the Pesnica catchment more faults were found in different directions, belonging to the category of tectonic faults. The most important are: Globovnica, Pesnica, Dravinja faults (named after the tributaries that flow through them). Surface water creates channels, in which the rocks are the most fractured (MIOČ & ŽNIDARČIČ, 1989; PERKO et al., 2001). Following Miocene and Quaternary sediments are present in the River Pesnica watershed:

Miocene sediments (M_2^1) that outcrop up in the northeastern part of the catchment are composed of conglomerate, sandstone and marl.

M_2^2 – Miocene sediments are composed of gravel, sand, marl, limestone and sandstone.

M_3^1 – In the lower part of the catchment sandy marl sediments prevail and within them are mica, sandstone, claystones and marlstones. Gravels are composed of siliciclastic and other metamorphic and magmatic rocks.

M_3^2 – Miocene sediments are located in the eastern part of Pesnica catchment and are composed of sandy clays, sandy clay marls, sands and sandy gravels.

Pliocene sediments are located in the southern part of the River Pesnica catchment (Pliocene) and are composed of clay, sand, conglomerate and clayey marl (MIOČ & ŽNIDARČIČ, 1989).

Quaternary sediments are located along surface water flow in the valley and are composed of clastic material (gravels, sands, marls, clays).

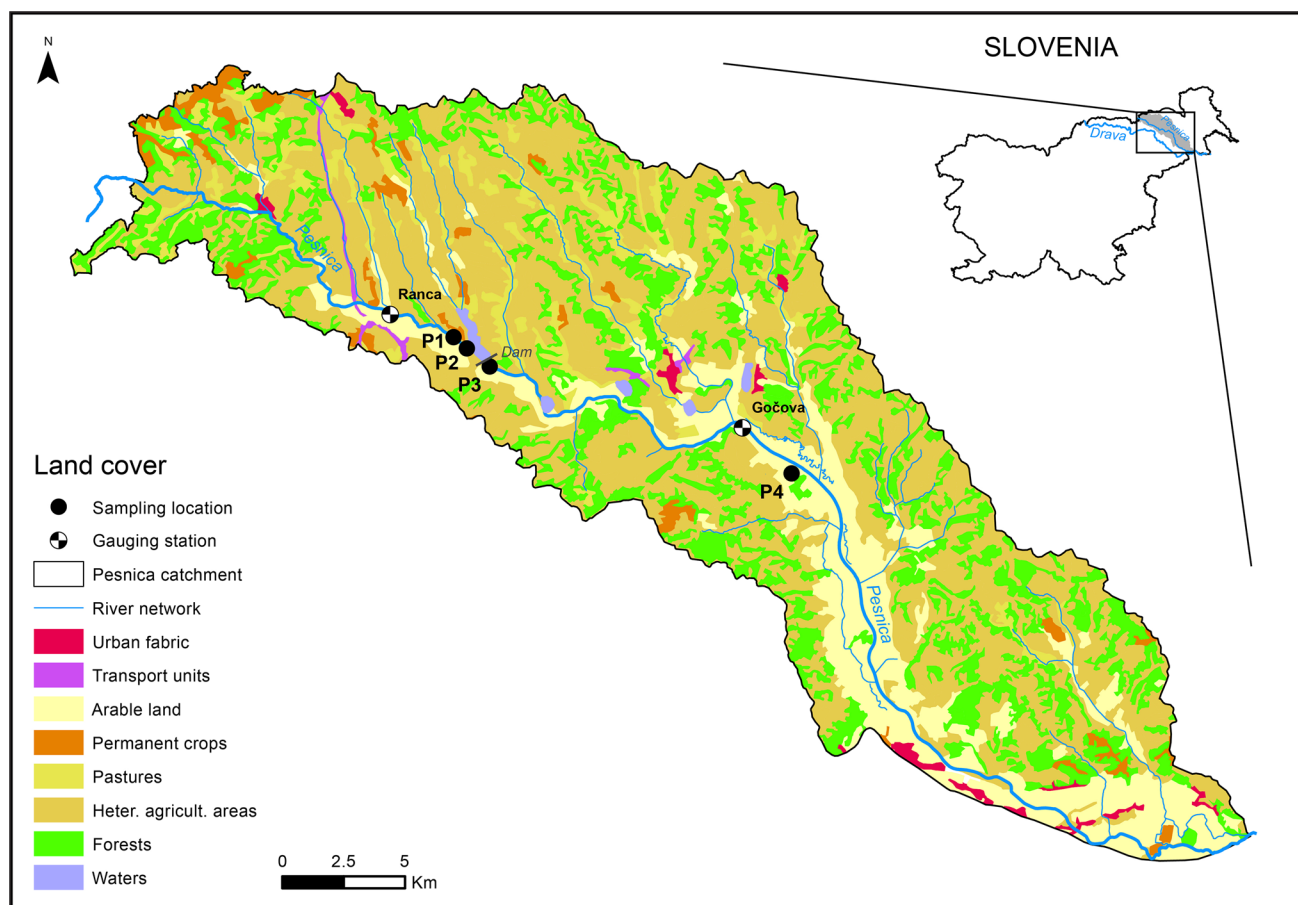


Fig. 1. Land use map of River Pesnica catchment area (CORINE LAND COVER 2012)

Materials and Methods

In order to determine how artificial reservoirs influence biogeochemical processes in the river system, water was sampled at the inflow and outflow of one of the accumulation lakes (Perniško jezero) during the crop growing season. In addition, a small drainage channel nearby Biš village was chosen to investigate how an area dominated by intensive agriculture contributes to the biogeochemical processes of Pesnica River.

Discharge data (Miha Supek, personal communication) were obtained from the Environmental Agency of the Republic of Slovenia (Tab. 1). Samples were collected four times in each month from February to September (except July) 2016 at four gauging stations: 1 (before dam), 2 (before dam), 3 (after dam), 4 (drainage channel Biš). Temperature and dissolved oxygen (DO) of surface waters were measured with a WTW Multi 340, Cellox 325. pH was measured with a Seven Compact pH/ion Metler Toledo and electroconductivity with an Ultrameter II MYRON L COMPANY 6 PFCE, serial 6218180, both in the laboratory after sampling.

Sample aliquots collected for cation, anion and alkalinity analyses were passed through a 0.20 μm nylon filter into HDPE bottles (30 ml) and kept refrigerated until analyzed. Samples for $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ analysis were passed through a 0.45 μm nylon filter and stored in glass serum bottles filled with no headspace and sealed with septa caps.

Alkalinity was measured using Gran titrations (CLESCERI et al., 1998). Cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) and anions (SO_4^{2-} , Cl^- , and NO_3^-) were measured by ion chromatography (Metrohm, 761 Compact IC).

The stable isotope composition of dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) was determined with a Europa Scientific 20-20 continuous flow IRMS (isotope ratio mass spectrometer) with an ANCA-TG preparation module. Phosphoric acid (100 %) was added (100–200 μl) to a septum-sealed vial which was then purged with pure He. The water sample (5 ml) was injected into the septum tube and headspace CO_2 was measured (modified after KANDUČ, 2006). In order to determine the optimal extraction procedure for surface water samples, a standard solution of Na_2CO_3 (Carlo Erba) with a known $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of -10.8 ± 0.2 ‰ was prepared with a concentration of 0.66 g/l.

Samples for characterization of suspended matter from each location (Fig. 1) were collected (September 2016 sampling) using standard representative sampling techniques (SCHUSTER & REDDY, 2001) in HDPE bottles. From each location, 3 l of surface water were sampled for microscopic (SEM/EDXS-scanning electron microscopy/energy-dispersive X-ray spectroscopy) analyses (suspended matter characterization) and for isotopic composition of carbon in suspended matter ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$). Surface water samples were filtered through a Whatman GF/F (pore size 0.7 μm) glass fiber filter. The isotopic composition of carbon in suspended matter was determined using a Europa 20-20 continuous flow IRMS-SL preparation module. The filter was treated with 1M HCl to dissolve any carbonate present. Approximately 1 mg of sample was scrapped from the GF/F filter and dried at 60 °C. The isotopic composition of carbon was determined after combustion of the capsules in a hot furnace at 1000 °C. IAEA CH3 and IAEA CH6 standards were used to relate the analytical results to the VPDB. Sample reproducibility for carbon was ± 0.2 ‰.

All stable isotope results for carbon are expressed in the conventional delta (δ) notation, defined as per mil (‰) deviation from the reference standard VPDB. Precision of working standards was ± 0.2 ‰ for $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$.

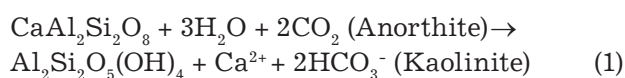
Samples of suspended matter from Pesnica catchment area from September sampling were examined to study the morphology of particles and their element composition, using a field-emission-gun scanning electron microscope (FEGSEM) JEOL JSM 7600-F equipped with Oxford Instruments INCA energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDXS) with 20-mm² silicon-drift detector (SDD). SEM/EDXS analyses were performed at 20kV accelerating voltage, 15 mm working distance and 100 s acquisition time. The internal INCA EDS standard database was used for the analyses.

Thermodynamic modeling was used to evaluate pCO_2 (partial pressure) and the saturation state of calcite ($\text{SI}_{\text{calcite}}$) and dolomite ($\text{SI}_{\text{dolomite}}$) using pH, alkalinity and temperature as inputs to the PHREEQC speciation program (PARKHURST & APPELO, 1999). Version 2.16.03 Phreeqc for Windows was used to calculate $\text{SI}_{\text{calcite}}$, $\text{SI}_{\text{dolomite}}$ and pCO_2 .

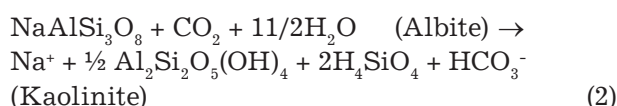
Results and discussion

Theoretical background of dissolution of minerals

Dissolved Ca^{2+} and Mg^{2+} are largely supplied by the weathering of carbonates, with smaller contributions from silicate weathering, as indicated by the relatively high HCO_3^- and low Si concentrations. Most of the water samples in our study deviate from a 2:1 molar ratio of HCO_3^- (Fig. 2A) and are the consequence of weathering of clastic rocks composed of clay minerals as follows (1-5):

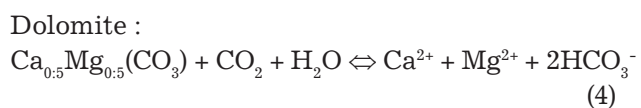
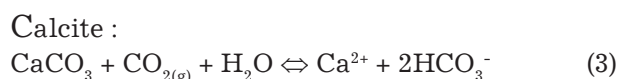


In the case of weathering anorthite, only Ca^{2+} is present in carbonate reactions (precipitation of calcite).



In case of weathering of albite, Na^+ and HCO_3^- are in 1:1 stoichiometry ratio. The origin of K^+ can be mica shist.

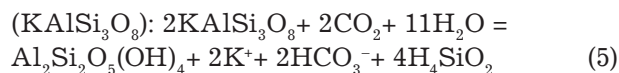
Weathering of calcite and dolomite is presented below:



The carbon dioxide content of rain and soil water is particularly important in weathering processes (GAILLARDET et al., 1999). The chemical composition of rainwater changes markedly after entering the soils (GAILLARDET et al., 1999). The upper part of the soil is a zone of intense biochemical activity. One of the major biochemical processes of the bacteria is the oxidation of organic material, which leads to an increase of carbon dioxide in the soil gas (GAILLARDET et al., 1999). Above the zone of water saturation, the soil gases may contain 10 to 40 times as much as carbon dioxide as the free atmosphere (reference value for partial pressure in atmosphere is 316 ppm (CLARK & FRITZ, 1997)). This CO_2 gives rise to a variety of weathering reactions,

for example the congruent dissolution of calcite (CaCO_3) in limestone: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$

and the incongruent reaction with K-spar:



The amount of CO_2 dissolved according to reaction (3) depends mainly on the temperature and its partial pressure. For example, for an atmospheric carbon dioxide pressure of 10^{-2} atmosphere and for a soil atmosphere of nearly pure carbon dioxide, the amount of calcium that can be dissolved (at 25 °C) until saturation is 65 and 300 ppm, respectively. The calcium and hydrogencarbonate ions released into soil water and groundwater eventually reach the river system. The water resulting from reaction (5) contains hydrogencarbonate, potassium, and dissolved silica in the ratios 1:1:2, and the new mineral, kaolinite, is the solid weathering product. The dissolved constituents of reactions (calcite) and (K-feldspar) eventually reach the river systems. The global silicate weathering fluxes and associated CO_2 consumption fluxes have been freshly estimated on the basis of data on the 60 largest rivers of the world (GAILLARDET et al., 1999). Only active physical denudation of continental rocks was found to be able to maintain high chemical weathering rates and significant CO_2 consumption rates.

General geochemical characteristics of river water

Mean daily discharge data (Q), parameters measured in the field (T-temperature, D.O.-dissolved oxygen (mg/l)), geochemical and isotopic data of water (Pesnica catchment area) are presented in Table 1.

Most of the studied rivers in Slovenia (KANDUČ et al., 2008) have a $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}:\text{HCO}_3^-$ ratio 2:1 indicating that geological composition (carbonates prevail) controls the composition of river waters. In Pesnica River catchment (studied locations Pesnica 1, Pesnica 2, Pesnica 3 and Pesnica 4) clastic rocks prevail (Fig. 1) meaning that most of the cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) are originated in clastic rocks (e.g. sandstones, claystones, marls) and also limestone, but to a minor extent.

Table 1. Field and laboratory measurement data (T, pH, conductivity, DO), discharge data (Q), major geochemistry data (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, total alkalinity after Gran, SO₄²⁻, NO₃⁻), stable isotopic composition of dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$), stable isotopic composition of particulate organic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$).

No.	Location	Date	Q (m ³ /s)	T (°C)	O ₂ (mg/l)	pH	Cond (μS/cm)	Cl ⁻ (mM)	NO ₃ ⁻ (mM)	SO ₄ ²⁻ (mM)	Na ⁺ (mM)	K ⁺ (mM)	Ca ²⁺ (mM)	Mg ²⁺ (mM)	TA (mM)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ (‰)	S _{calc.}	S _{idol.}	pCO ₂ (bar)	pCO ₂ (ppm)	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (mM)
1	Pesnica 1	16.2.16	6.20	5.25	n.a.	7.21	n.a.	0.33	0.19	0.25	0.42	0.05	2.27	0.50	3.88	-13.7	n.a.	-0.2	0.5	-1.96	109648	2.77
2	Pesnica 2	16.2.16	6.20	5.25	n.a.	7.22	n.a.	0.42	0.14	0.25	0.44	0.06	2.33	0.50	3.79	-14.2	n.a.	-0.2	0.48	-1.98	104713	2.83
3	Pesnica 3	16.2.16	6.20	5.20	n.a.	7.14	n.a.	0.9	0.13	0.29	0.51	0.06	2.31	0.51	3.66	-13.7	n.a.	-0.29	-1.26	-1.91	123027	2.82
4	Pesnica 4 (Biš)	16.2.16	6.22	5.10	n.a.	7.01	n.a.	0.27	0.46	0.14	0.16	0.02	1.31	0.38	1.77	-13.5	n.a.	-0.94	0.3	-2.09	81283	1.69
1	Pesnica 1	18.3.16	0.91	4.35	n.a.	7.15	n.a.	0.35	0.05	0.34	0.54	0.05	3.28	0.79	4.85	-11.4	n.a.	-0.13	-1	-1.84	144544	4.07
2	Pesnica 2	18.3.16	0.91	4.35	n.a.	7.20	n.a.	0.36	0.05	0.34	0.57	0.05	3.37	0.80	5.65	-14.8	n.a.	0.14	-1.77	-1.90	125893	4.17
3	Pesnica 3	18.3.16	0.91	4.35	n.a.	7.30	n.a.	0.35	0.05	0.33	0.53	0.05	3.15	0.77	5.20	-12.3	n.a.	-0.15	-2.06	-1.80	158489	3.91
4	Pesnica 4 (Biš)	18.3.16	2.99	6.00	n.a.	7.40	n.a.	0.28	0.06	0.13	0.20	0.01	1.86	0.65	1.49	-14.2	n.a.	-0.48	-0.74	-2.56	27542	2.50
1	Pesnica 1	14.4.16	0.25	13.60	n.a.	7.12	n.a.	0.46	0.04	0.33	0.86	0.06	3.04	0.83	5.10	-11.6	n.a.	0.05	0.13	-1.72	190546	3.87
2	Pesnica 2	14.4.16	0.25	13.60	n.a.	7.11	n.a.	0.47	0.05	0.32	0.89	0.06	3.13	0.83	5.20	-11.4	n.a.	0.06	0.01	-1.70	199526	3.96
3	Pesnica 3	14.4.16	0.25	13.60	n.a.	7.13	n.a.	0.40	0.00	0.32	0.65	0.06	1.74	0.79	4.50	-7.3	n.a.	-0.2	-2.14	-1.77	169824	2.53
4	Pesnica 4 (Biš)	14.4.16	1.47	15.90	n.a.	7.15	n.a.	0.20	0.00	0.04	0.19	0.011	2.01	0.77	3.80	-13.1	n.a.	-0.18	-0.77	-1.83	147911	2.78
1	Pesnica 1	16.5.16	1.69	14.00	n.a.	7.23	n.a.	0.29	0.06	0.28	0.41	0.05	1.76	0.53	3.40	-13.7	n.a.	-0.2	-1.26	-1.99	102329	2.29
2	Pesnica 2	16.5.16	1.69	14.00	n.a.	7.29	n.a.	0.33	0.07	0.29	0.52	0.06	2.61	0.64	3.50	-13.4	n.a.	0.02	-1.26	-2.04	91201	3.25
3	Pesnica 3	16.5.16	1.69	14.00	n.a.	7.31	n.a.	0.19	0.03	0.16	0.25	0.03	1.29	0.31	3.20	-7.1	n.a.	0.0	-1.44	-2.10	79433	1.60
4	Pesnica 4 (Biš)	16.5.16	4.16	14.00	n.a.	7.35	n.a.	0.19	0.25	0.114	0.12	0.01	1.27	0.38	1.24	-13.9	n.a.	-0.66	-2.61	-2.81	15488	1.65
1	Pesnica 1	13.6.16	0.18	17.10	17.60	7.50	n.a.	0.47	0.07	0.27	0.93	0.10	3.02	0.73	5.05	-12.3	n.a.	0.47	-0.24	-2.08	83176	3.75
2	Pesnica 2	13.6.16	0.18	17.10	18.70	7.52	n.a.	0.48	0.07	0.27	0.99	0.09	2.90	0.70	5.09	-12.1	n.a.	0.54	-0.53	-2.16	69183	3.60
3	Pesnica 3	13.6.16	0.18	17.10	21.20	7.58	n.a.	0.29	0.00	0.21	0.46	0.08	1.38	0.06	2.81	-4.2	n.a.	0.04	-0.23	-2.40	39811	1.44
4	Pesnica 4 (Biš)	13.6.16	0.64	17.10	17.00	7.59	n.a.	0.12	0.00	0.03	0.17	0.01	2.01	0.78	4.34	-13.1	n.a.	0.35	-1.6	-2.23	58885	2.79
1	Pesnica 1	15.8.16	0.634	17.3	21.50	7.40	n.a.	0.47	0.07	0.27	0.48	0.06	1.54	0.35	4.80	-11.8	n.a.	-0.19	-0.5	-1.69	204174	1.89
2	Pesnica 2	15.8.16	0.634	17.5	23.30	7.30	n.a.	0.40	0.01	0.21	0.34	0.05	0.84	0.28	2.70	-7.2	n.a.	-0.66	-0.5	-1.93	117499	1.12
3	Pesnica 3	15.8.16	0.058	17.6	26.40	7.20	n.a.	0.32	0.00	0.17	0.27	0.07	0.50	0.38	4.40	-8.1	n.a.	-0.98	-0.79	-2.25	56234	0.88
4	Pesnica 4 (Biš)	15.8.16	n.a.	17.7	19.70	7.3	n.a.	0.10	0.00	0.02	0.08	0.00	1.01	0.41	1.60	-13.4	n.a.	-0.19	-0.78	-1.92	120226	1.42
1	Pesnica 1	2.09.16	1.086	18.80	47.20	7.41	500	0.4748	0.07	0.41	0.47	0.05	2.11	0.43	6.69	-13.0	-27.6	0.39	-0.95	-1.85	141254	2.54
2	Pesnica 2	2.09.16	1.086	19.60	47.00	7.45	512	0.4687	0.10	0.38	0.47	0.04	2.08	0.43	5.74	-12.8	-27.8	0.32	-0.6	-1.92	120226	2.52
3	Pesnica 3	2.09.16	0.179	22.40	60.20	7.22	314	0.3690	0.05	0.27	0.29	0.06	0.96	0.28	2.97	-9.8	-28.5	-0.85	-0.64	-1.50	316228	1.24
4	Pesnica 4 (Biš)	2.09.16	n.a.	17.30	15.50	7.25	398	0.1509	0.00	0.09	0.09	0.00	1.05	0.46	4.19	-13.4	-29.5	-0.22	-1.89	-1.92	120226	1.52

n.a.-not analyzed

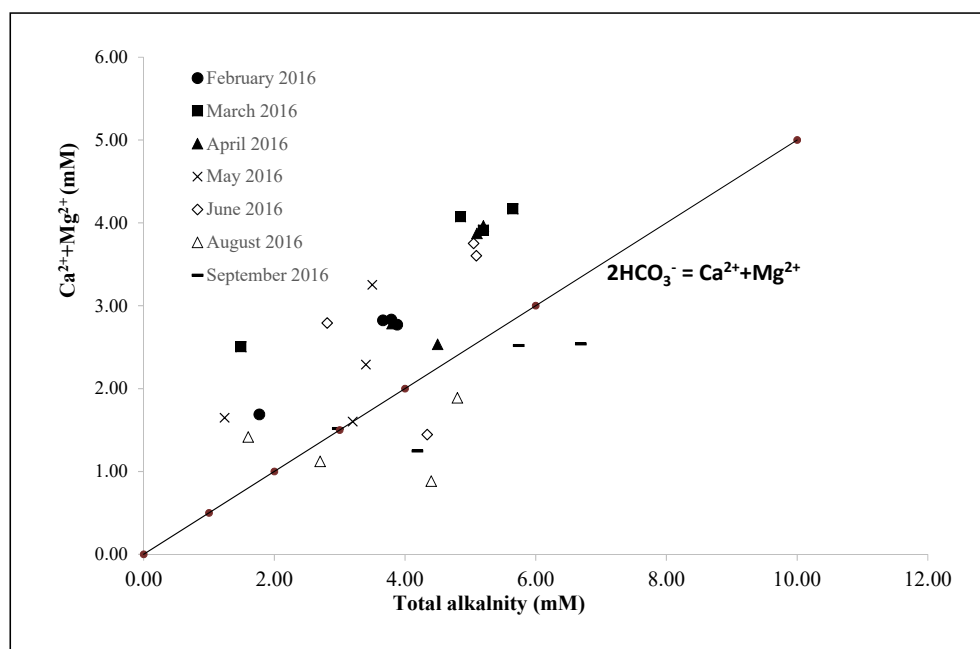


Fig. 2A. $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ ratio versus alkalinity with lines 1:2 indicating weathering of carbonates; deviation from the 1:2 line indicates weathering of clay minerals (albite, anortite) and mica schist (origin of K^+), which mostly contribute to alkalinity rather than to weathering of calcite/dolomite.

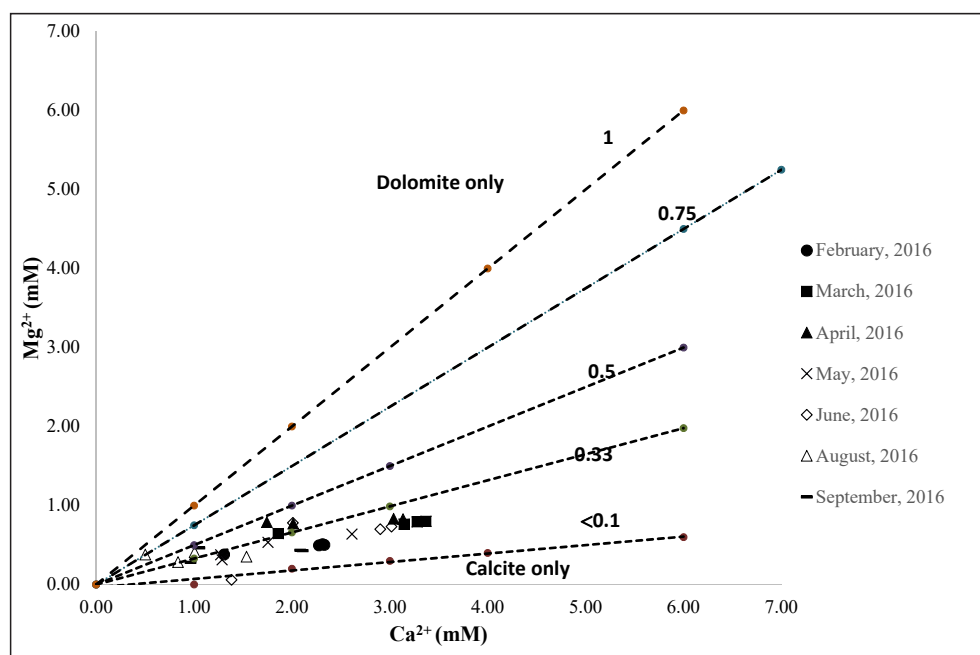


Fig. 2B. Mg^{2+} and Ca^{2+} concentrations indicating the dominance of dolomite or calcite in the Pesnica catchment

The relation of Mg^{2+} versus Ca^{2+} indicates the relative contributions of calcite and carbonate to weathering intensity in the Pesnica catchment. Most of the samples indicate that weathering of calcite is dominant over the entire Pesnica River catchment (Fig. 2B). A $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratio of around 0.33, typical for weathering of calcite with magnesium, is characteristic at all investigated locations in River Pesnica, only some samples having $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ of around 0.5. A $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratio of 0.33 is also characteristic of rivers comprising the Danube catchment, e.g., Sava River and its tributaries, Tisa River, Ilz River and Inn River (KANDUČ et al. 2007; SZRAMEK et al. 2007; KANDUČ et al. 2013).

Thermodynamic modelling (pCO_2 , $\text{SI}_{\text{calcite}}$, $\text{SI}_{\text{dolomite}}$)

From Fig. 3 it can be seen that the highest pCO_2 was observed in September 2016 with a value of 316227.8 ppm (-1.50 bar) at location Pesnica 3 and the lowest value of 15488.2 ppm (-2.81 bar) at location Pesnica 4 (Fig. 3 A, Table 1). pCO_2 concentrations in the river system depend mainly on conditions, such as temperature, pH and alkalinity. High concentrations of CO_2 can arise from higher groundwater discharge and/or respiration in streams because of the input of organic matter. All the samples were supersaturated with CO_2 with respect to the atmosphere ($10^{-3.5}$ bar = 316 ppmv) according to thermodynamic conditions in the investigated period in 2016 (Fig. 3A).

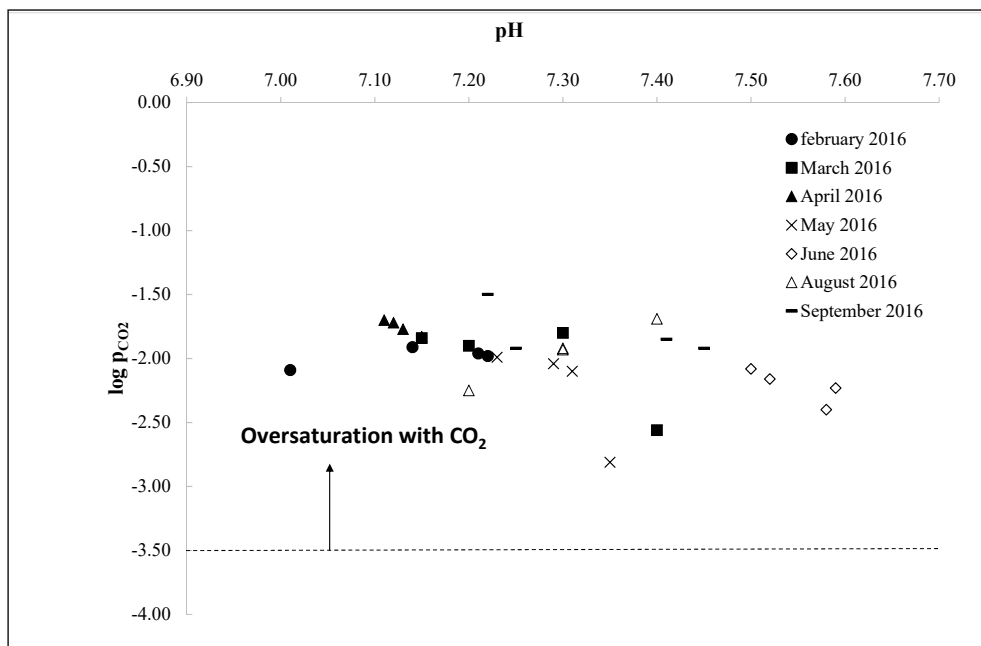


Fig. 3A. $p\text{CO}_2$ versus pH in river water system. All samples have $p\text{CO}_2$ values greater than atmospheric ($10^{-3.5}$ bar = 316 ppmv) causing increase in calcite saturation B. Saturation index of calcite ($\text{SI}_{\text{calcite}}$) versus dolomite ($\text{SI}_{\text{dolomite}}$) in river water system. Saturation for calcite/dolomite is defined as $\log \text{IAP/K}=0$.

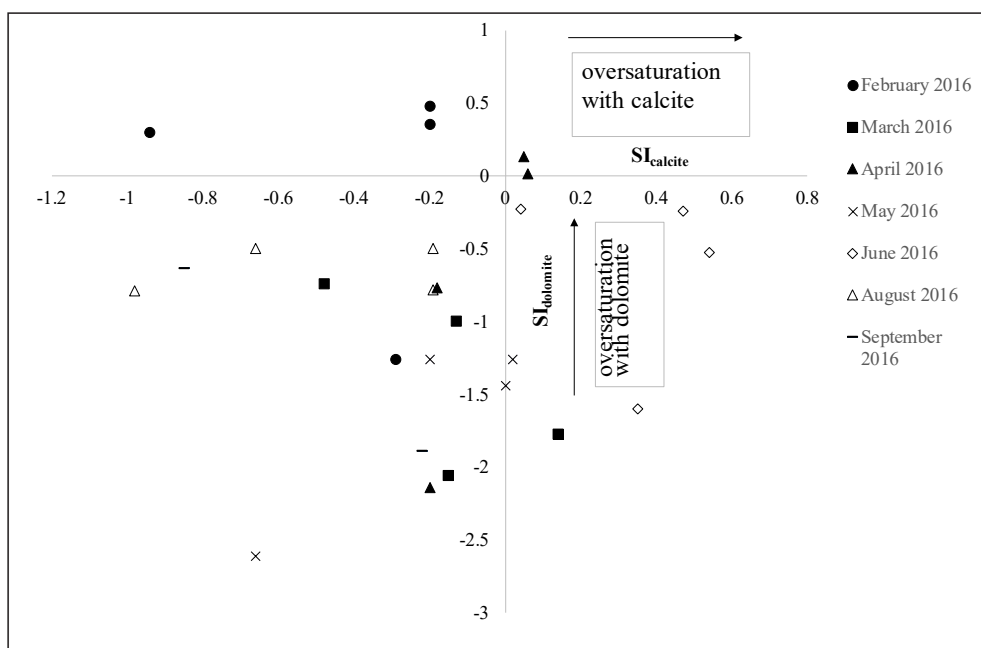


Fig. 3B. Saturation indices of calcite ($\text{SI}_{\text{calcite}}$) versus dolomite ($\text{SI}_{\text{dolomite}}$) in a river water system. Saturation for calcite/dolomite is defined as $\log \text{IAP/K}=0$.

All samples in River Pesnica catchment were undersaturated with calcite and dolomite, only some samples in September 2016 season were oversaturated with calcite (Fig. 3B). $\text{SI}_{\text{calcite}}$ ranged from -0.98 to 0.54 and $\text{SI}_{\text{dolomite}}$ ranged from -2.61 to 0.48. It has been clearly shown that most of the investigated rivers in the world constitute sources of CO_2 to the atmosphere (MAYORGA et al., 2005). Oversaturation with $\text{SI}_{\text{calcite}}$ is traced only in April at locations 1 and 2 before dam and oversaturation with dolomite only in June.

Isotopic composition of dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) and particulate organic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$)

Values of the isotopic composition of dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) can help decipher the contributions of organic matter decomposition, carbonate mineral dissolution, equilibration with atmospheric CO_2 to DIC and in-stream biological processes (KANDUČ et al., 2007). Figure 4 shows $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ versus alkalinity for Pesnica river water from February 2016. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in Pesnica catchment ranges from -14.8

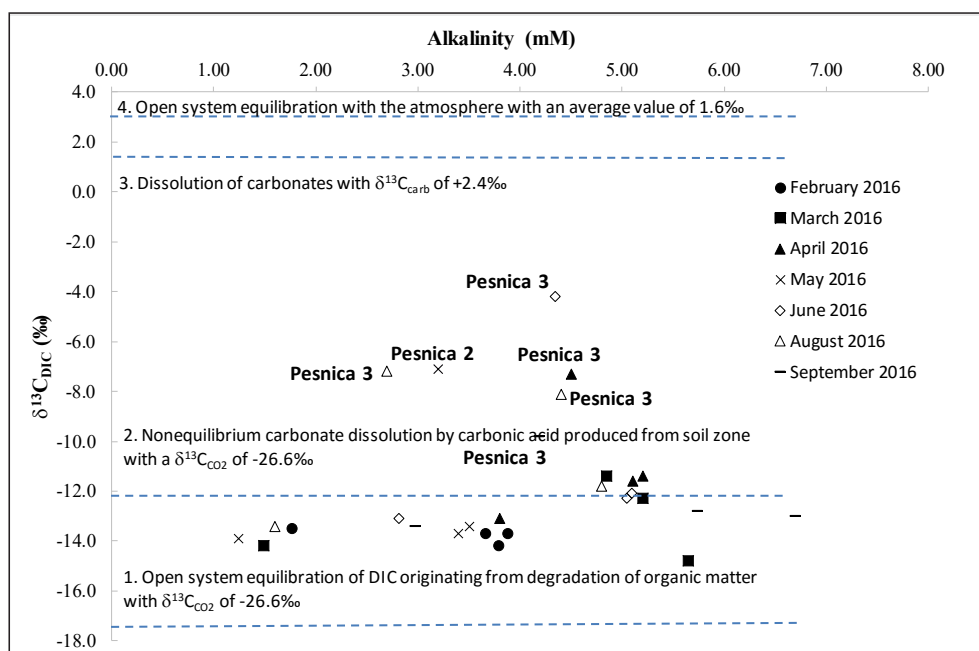


Fig. 4. Seasonal variation of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values versus alkalinity in Pesnica river water system, with lines indicating biogeochemical processes in river water. These include (see equilibration lines): 4. Open system equilibration with the atmosphere with an average value of 1.6 ‰. 3. Dissolution of carbonates according to the average $\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$ (+2.4 ‰, KANDUČ et al., 2013) of all measured samples composing the recharge area of river water, causing $+1\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$ enrichment in ^{13}C in DIC (ROMANEK et al., 1992). 2. Nonequilibrium carbonate dissolution by carbonic acid produced from soil zone CO_2 , 1. Open-system equilibration of DIC with soil CO_2 originating from degradation of organic matter with $\delta^{13}\text{C}_{\text{soil}} = -26.6\text{‰}$.

to -4.2‰ (Table 1). An average $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ value of -26.6‰ (KANDUČ et al., 2013) was assumed to represent the isotopic composition of DOC that was transferred to DIC (Dissolved Inorganic Carbon) by in-stream respiration. Open-system equilibration of DIC with CO_2 enriches DIC in ^{13}C by about 9 ‰ (MOOK et al., 1974), which corresponds to the value of -17.6‰ shown in Figure 4. Non-equilibrium dissolution of carbonates, with one part of DIC originating from soil CO_2 (-26.6‰), and the other from carbonates with an average $\delta^{13}\text{C}_{\text{Ca}}$ of $+2.4\text{‰}$, leads to an intermediate $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ value of -12.1‰ (KANDUČ et al., 2012). Given the isotopic composition of atmospheric CO_2 (-7.8‰ , LEVIN et al., 1987) and the equilibrium fractionation with $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of $+9\text{‰}$, DIC in equilibrium with the atmosphere should have a $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of about $+1\text{‰}$ (Fig. 4). Biogeochemical processes such as dissolution of carbonates and open-system equilibration with the atmosphere can be neglected in the Pesnica catchment since river water is composed mostly of clastic rocks (sandstones, marls, claystones).

Higher values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ are observed at Pesnica 3 location (March, 2016) and slightly more negative values $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ at Pesnica 2 (above the Pernica lake). From Figure 4 it can be seen that most of the samples from Pesnica River catchment fall around the line of nonequilibrium carbonate dissolution by carbonic acid produced from the soil zone with $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ of -26.6‰ . Samples from Pesnica 3 (retention) have $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values less negative up to -4.2‰ (June

2016) indicating that respiration can alter $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ to more positive $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values in-stream, especially in summer months (Fig. 4). Controls of longitudinal variation in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in rivers have been studied by ROACH et al., 2016. At location Pesnica 2 (before dam) and Pesnica 3 (after dam) $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values are less negative indicating CO_2 reduction in river system and enrichment with ^{13}C isotope (Fig. 4).

According to the model of DEVOL & HEDGES (2001), suspended matter (particulate in continuation) may be divided into three fraction (KANDUČ, 2010 & REFERENCES THEREIN). Isotopic composition of carbon in particulate organic matter ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$) was measured only in September and ranged from -29.5 to -27.6‰ . At Biš location more negative $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ (-29.5‰) was observed in comparison to characteristic degraded organic matter (-26.6‰). For comparison, the $\delta^{13}\text{C}$ value of particulate organic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$) in the main channel of the Kamniška Bistrica River, a pre-alpine gravel-bed river with prevailing intensive agriculture in the catchment, varies from -28.6 to -25.4‰ and from -29.9 to -25.2‰ in the tributaries (KANDUČ et al., 2013). Phytoplankton binds CO_2 from DIC in water leading to a ^{13}C fractionation of around -20‰ , producing biomass with $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ ranging from -32.0 to -45.0‰ . At the River Pesnica catchment $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ ranges from -27.6 to -29.5‰ , meaning that photosynthetic activity was not so significant at our investigated locations.

Composition of suspended matter differentiates by SEM/EDXS

The composition of suspended matter differentiates from Pesnica catchment area at investigated locations: Pesnica 1, Pesnica 2 (above Pernica lake), Pesnica 3 (below the Pernica lake) and Pesnica 4- drainage channel Biš (Fig. 1). At Pesnica 1 and Pesnica 2 sampling sites (Figs. 5A, B) we can observe that aluminosilicates (K, Al, Si) prevail in suspended matter, while at sampling location Pesnica 3 we observe high biological activity (diatoms) (Fig. 5C-b) and at Pesnica 4 (drainage channel Biš) inorganic fibers prevail (Fig. 5D), which could be of anthropogenic origin. All SEM Figures have corresponding spectra, meaning that elements: Al, Si, O, K, Na, Mg prevail with traces of Ti and Fe representing detrital geological material composed of alumi-

nosilicates (e.g. anorthite, albite, mica schist). From Fig. 5B with a corresponding spectrum, a pattern similar to that in Figure 5A is seen. Figure 5C-a with a corresponding graph shows that suspended matter is composed of diatoms; spherical structures are also observed. The spectrum shows that material is composed of Si, Al, O, Fe, K, Ca, Na, Mg (Fig. 5C-c). Diatoms are composed of Si-oxide, while spherical structures with corresponding spectrum have a microporous structure and are composed of Fe, Si, O, Ca. Fig. 5D with corresponding spectrum represents suspended matter composed of Si, O, Fe, Mg, Na, K, Ca with traces of Zn and Fe (Fig. 5D). Fibrous and microporous particles that were observed and analysed under higher magnification are composed of Al, Si, Fe and P, which could be attributed to anthropogenic input in the river system.

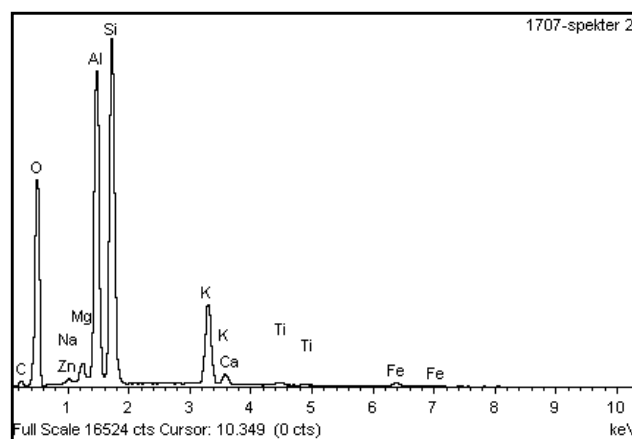
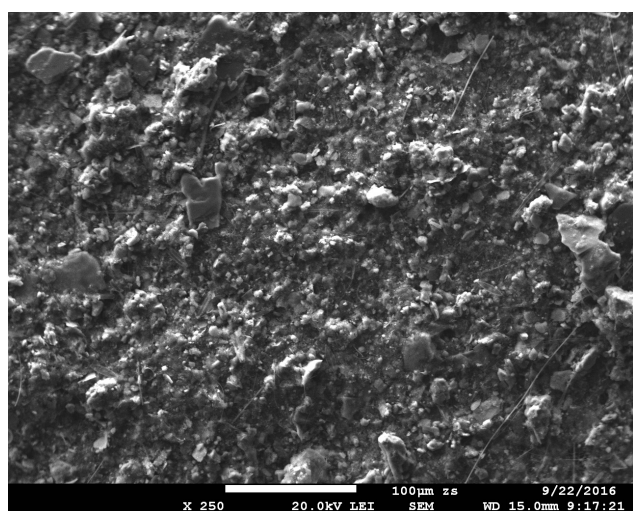


Fig. 5A. SEM micrograph and corresponding EDXS analysis/spectrum of samples of suspended matter at Pesnica 1.

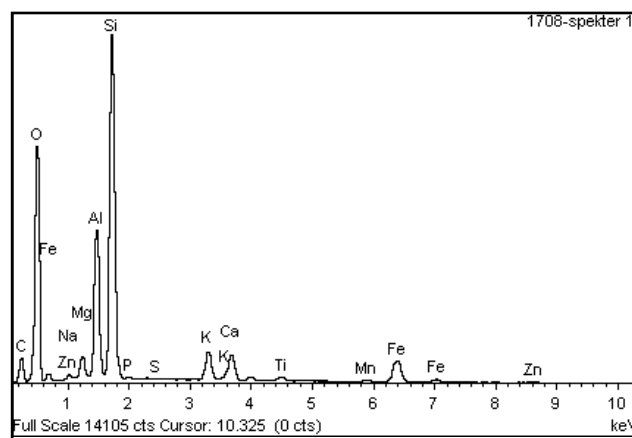
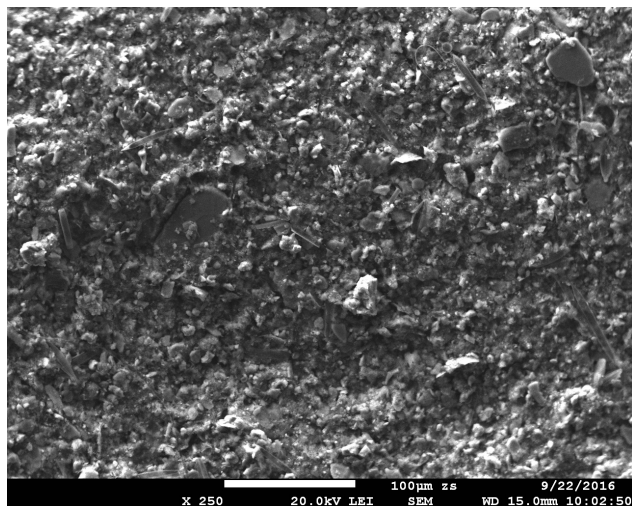


Fig. 5B. SEM micrograph and corresponding EDXS analysis/spectrum of samples of suspended matter at Pesnica 2 (above reservoir).

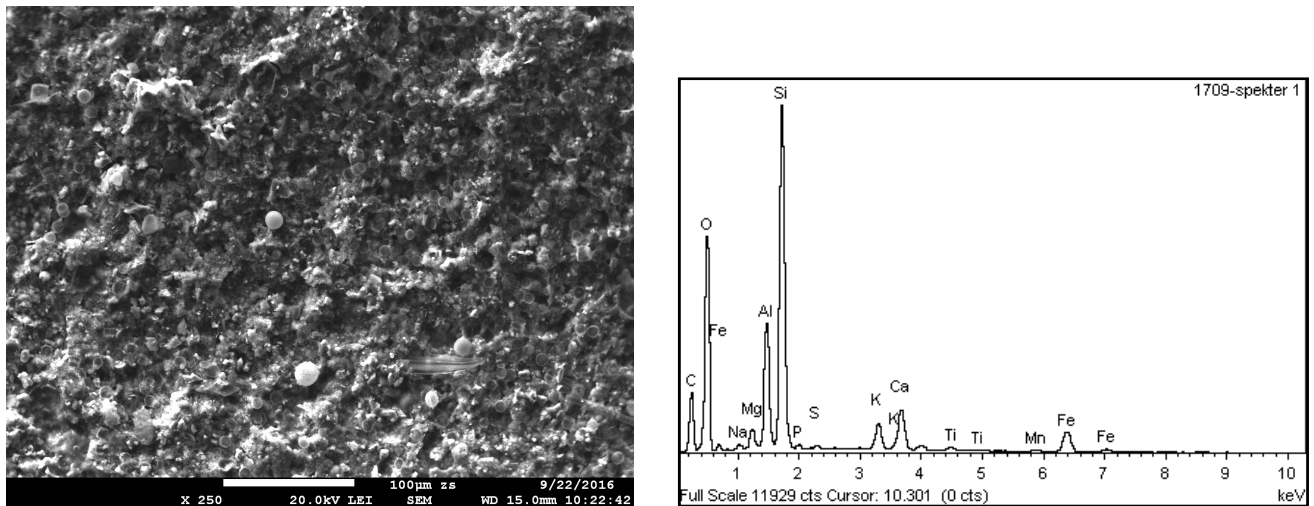


Fig. 5C-a. SEM micrograph and corresponding EDXS analysis/spectrum of samples of suspended matter at Pesnica catchment area from location Pesnica 3 (below the reservoir, retention).

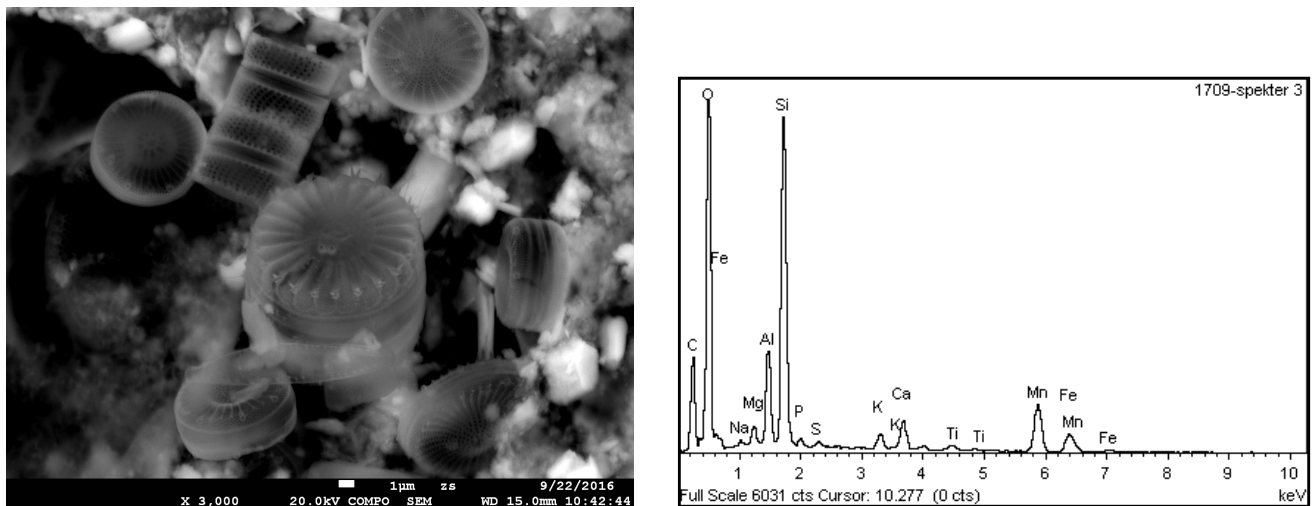


Fig. 5C-b. SEM micrograph and corresponding EDXS analysis/spectrum of samples of suspended matter at Pesnica catchment area from location Pesnica 3 (below the reservoir, retention).

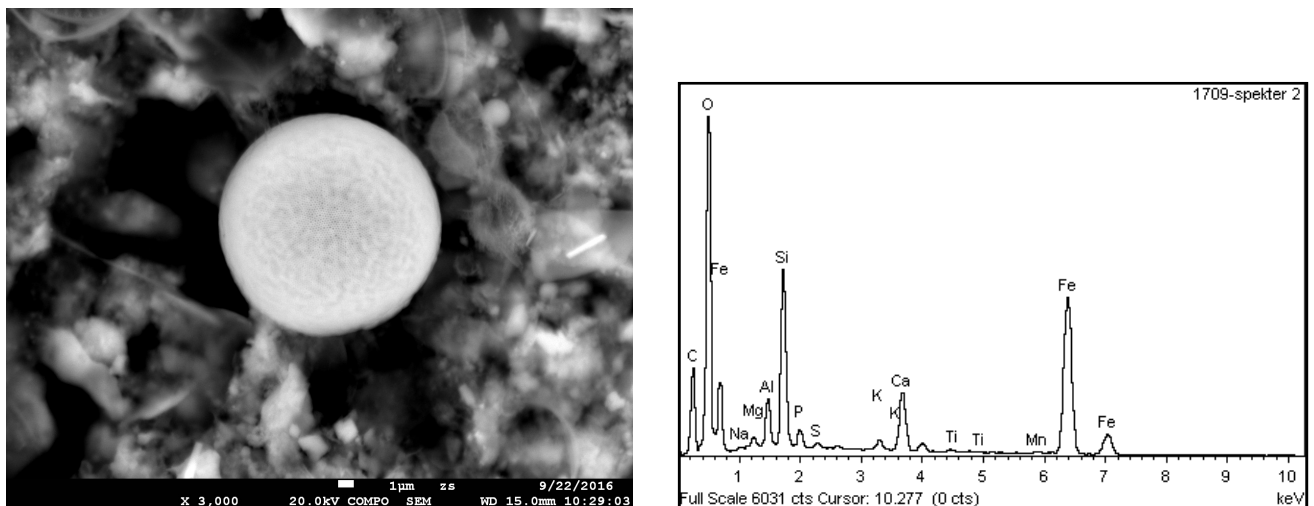


Fig. 5C-c. SEM micrograph and corresponding EDXS analysis/spectrum of samples of suspended matter at Pesnica catchment area from location Pesnica 3 (below the reservoir, retention).

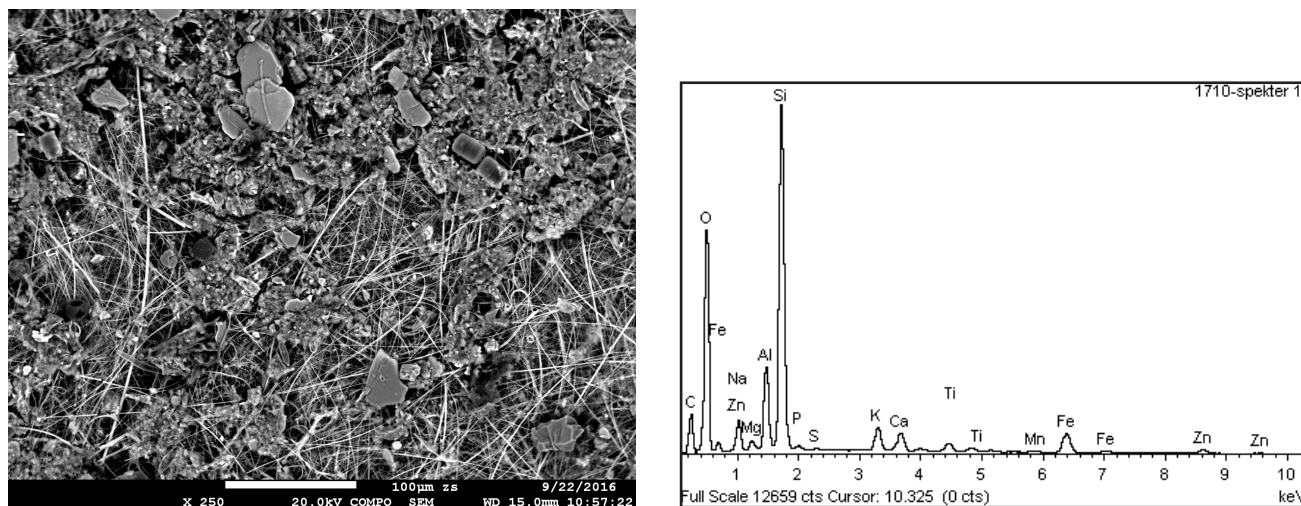


Fig. 5D. SEM micrograph and corresponding EDXS analysis/spectrum of samples of suspended matter at Pesnica catchment area from location Pesnica 4 (drainage channel Biš).

Conclusion

Pesnica River water solute chemistry is dominated by HCO_3^- , Ca^{2+} and Mg^{2+} . Seasonal (spring, summer and autumn) concentrations of total alkalinity ranged from 1.24 to 6.69 mM. From a geochemical point of view, we found out that dissolution of clastic material influences the geochemical composition of river water. Most locations of surface water were near equilibrium with respect to calcite ($\text{SI}_{\text{calcite}}$ from -0.98 to 0.54) and dolomite ($\text{SI}_{\text{dolomite}}$ from -2.61 to 0.48) in all sampling seasons or, otherwise, generally undersaturated. According to the calculated pCO_2 values, surface water is a source of CO_2 to the atmosphere. pCO_2 in Pesnica catchment ranged from 15488 to 316228 ppm. Alkalinity and isotopic composition of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values were used to trace carbon cycling in surface waters. Seasonal $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values (from February 2016 to September 2016) ranged from -14.8 to -4.2 ‰ indicating different biogeochemical processes in Pesnica River catchment. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values around and below -12 ‰ indicate that the most important process in Pesnica River catchment in our study is degradation of organic matter. At a location below the reservoir Pernica lake (Pesnica 3 location), higher $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values have been observed since April 2016. The highest value of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of -4.2 ‰ was observed in June 2016. This was due to the presence of large amounts of algae from phytoplankton and phytobenthos in reservoir upstream of the sampling location, as confirmed using SEM microscopy. $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ ranged from -29.5 to -27.6 ‰ and indicated different degree of

suspended material at investigated locations.

Microscopic SEM/EDXS analyses revealed that at Pesnica 1 and 2 detrital clastic material prevails in the samples, while at location Pesnica 3 phytoplanktonic and/or phytobenthic algae prevail, presumably originating from Pernica Lake, while at location near drainage channel Biš, particles originating from wetland plants are observed in addition to degraded organic material.

These first results on suspended matter in the River Pesnica catchment provide first data, that will help in evaluation of anthropogenic impacts, especially in relation to future impacts and for long term planning for sustainable management (e.g. regulation of river channel, deforestation and agriculture activity). The application of stable isotopes in river management studies is useful tracer for determining the origin of dissolved solutes and evaluation of biogeochemical processes, and has been widely used in other catchments in Slovenia (e.g. Sava River, Kamniška Bistrica River, Krka River, Idrijca River).

Acknowledgements

This research was conducted in the framework of the project L2-6778 and program research founding P2-0084 and P1-0143 funded by the Slovenian Research Agency (ARRS). Sincere thanks to Roger Pain for improving the English of the manuscript.

References

- BARTH, J.A.C., CRONIN, A.A., DUNLOP, J. & KALIN, R.M. 2003: Influence of carbonates on the riverine carbon cycle in an anthropogenically dominated catchment basin: evidence from major elements and stable carbon isotopes in the Lagan River (N. Ireland). *Chemical Geology*, 200: 203–216.
- CLESCERI, L.S., GREENBERG, A.E. & EATON, A.D. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th edition. APHA, AWWA, WEF, Baltimore.
- CORINE LAND COVER 2012: <http://gis.arso.gov.si/geoportala/catalog/search/resource/details>
- DEVOL, A.H. & HEDGES, J.I. 2001: Organic matter nutrients in the mainstem Amazon River. In: McCLAIN, M.E., VICTORIA, R.L. & RICHEY, J. E. (eds.): *The biogeochemistry of the Amazon Basin*. Oxford University Press, Oxford: 275–306.
- GAILLARDET, J., DUPRÉ, B., LOUVAT, P. & ALLÈGRE, C.J. 1999: Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical geology*, 159: 3–30.
- HEDGES, J.I. 1992: Global biogeochemical cycle: progress and problem. *Marine chemistry*, 39: 67–93.
- HOPE, D., BILLET, M.F. & CRESSER, M.S. 1994: A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environmental pollution*, 84: 301–304.
- KANDUČ, T. 2006: Hydrogeochemical characteristics and carbon cycling in the River Sava catchment in Slovenia. Ph.D. Thesis, University of Ljubljana (in Slovene), Ljubljana: 141 p.
- KANDUČ, T. 2010: Characterization of suspended matter in river systems: river Sava in Slovenia case study = Značilnosti suspendirane snovi v rečnih sistemih: primer reke Save v Sloveniji. *Geologija*, 54/1: 55–66, [doi:10.5474/geologija.2011.004](https://doi.org/10.5474/geologija.2011.004).
- KANDUČ, T., SZRAMEK, K., OGRINC, N. & WALTER, L.M. 2007: Origin and cycling of riverine inorganic carbon in the Sava River watershed (Slovenia) inferred from major solutes and stable carbon isotopes. *Biogeochemistry*, 86: 137–154.
- KANDUČ, T. & OGRINC, N. 2007: Hydrogeochemical characteristics of the River Sava watershed in Slovenia = Hidrogeokemične značilnosti porečja reke Save v Sloveniji. *Geologija*, 50/1: 157–177, [doi:10.5474/geologija.2007.013](https://doi.org/10.5474/geologija.2007.013).
- KANDUČ, T., KOCMAN, D. & OGRINC, N. 2008: Hydrogeochemical and stable isotope characteristics of the River Idrijca (Slovenia), the boundary watershed between the Adriatic and Black Seas. *Aquatic Geochemistry*, 14: 239–262.
- KANDUČ, T., MORI, N., KOCMAN, D., STIBILJ, V. & GRASSA, F. 2012: Hydrogeochemistry of alpine springs from North Slovenia: insights from stable isotopes. *Chemical geology*, 300–301: 40–45.
- KANDUČ, T., ŠTURM, BURNIK, M. & MCINTOSH, J. 2013: Chemical dynamics and evaluation of biogeochemical processes in Alpine River Kamniška Bistrica, North Slovenia, *Aquatic Geochemistry*, 19: 323–346, [doi:10.1007/s10498-013-9197-4](https://doi.org/10.1007/s10498-013-9197-4).
- KARIM, A. & VEIZER, I. 2000: Weathering process in the Indus River basin: implications from river in carbon, sulphur, oxygen and strontium isotopes. *Chemical geology*, 120: 133–177.
- KOBOLD, M. 2012: Hidrološki letopis Slovenije 2009, Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija Republike Slovenije za okolje.
- LEVIN, I., KROMER, B., WAGENBACK, D. & MINNICH, K.O. 1987: Carbon isotope measurements of atmospheric CO₂ at a coastal station in antarctica. *Tellus* 39, B B: 89–95.
- LEITINGER, V. 2012: Hidrogeografske značilnosti porečja reke Pesnice s pudarkom na vodno-gospodarskih ureditvah. Diplomsko delo, Univerza na Primorskem, Koper: 92 p.
- LI, Y., ZHANG, H., TU, C., FU, C., XUE, Y. & LUO, Y. 2016: Sources and fate of organic carbon and nitrogen from land to ocean: Identified by coupling stable isotopes with C/N ratio. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 181: 114–122.
- MARKOLI, T. 2012. Kvaliteta vode v akumulacijskih jezerih na reki Pesnici, Diplomsko delo, Univerza v Mariboru, Maribor: 87 p.
- MAYORGA, E., AUFDEMKAPE, A.K., MASIELLO, C.A., KRUSCHE, A.V., HEDGES, J.I., QUAY, P.D., RICHEY, J.E. & BROWN, T.A. 2005: Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazon rivers. *Nature*, 436: 538–541. [doi:10.1038/nature03880](https://doi.org/10.1038/nature03880).
- MIOČ, P. & ŽNIDARČIČ, M. 1989: Osnovna geološka karta 1:100.000, Tolmač za lista Maribor in Leibniz-L33-56, L33-44, Zvezni geološki zavod, Beograd: 60 p.
- MEYBECK, M. 1981: River transport of organic carbon to the ocean. V *Flux of organic carbon to the Oceans*, Edited by Likens G.E., Mackenzie, F.T., Richey J.E., Seddell, J.R. Turekian K.K.U.S.D.O.E. CONF-8009140: str. 219–269.

- MEYBECK, M. 1987: Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, 287: 401-428.
- MOOK, W.G., BOMMERSON, J.C. & STAVERMAN, W.H. 1974: Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. *Earth Planet Sci Lett*, 22: 169-176.
- PARKHURST, D.L. & APPELLO C.A.J. 1999: User's guide to PHREEQC (version 2) – a computer program for speciation, batch – reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigation Report 99-4259.
- PERKO, D. & ORAŽEN ADAMIČ, M. (eds.) 2001: Slovenija: pokrajina in ljudje. Ljubljana, Mladinska knjiga.
- POPESCU, R., MIMMO, T., DINCA, O.R., CARICI, C., COSTINEL, D., SANDRU, C., IONETE, R.E., STEFANESCU, I. & AXENTE, D. 2015: Using stable isotopes in tracing contaminant sources in an industrial area: A case study on the hydrological basin of the Olt River, Romania.
- ROACH, K.A., RODRIGUEZ, M.A., PARADIS, Y. & CABANA, G. 2016: Controls of longitudinal variation in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in rivers: A global meta-analysis. *Aquatic ecology* in press.
- ROMANEK, C.S., GROSSMAN, E.L. & MORSE, J.W. 1992: Carbon isotopic fractionation in synthetic aragonite and calcite: effects temperature and precipitation rate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 419-430.
- SAMEER, K.T., SANTOSH, K.R. SUKESH, K.B., ARIL, K.G. & NEGI, H. 2016: Stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$) and geochemical characteristics of geothermal springs of Landakh and Himahal (India): Evidence for CO_2 discharge in north-west Himalaya. *Geothermics* 64: 314-330.
- SCHUSTER, P.F. & REDDY, M.M. 2001: Particulate Carbon (PC) and Particulate Nitrogen (PN). In: *Water and Sediment Quality in the Yukon River Basin, Alaska, During Water Year 2001*, Open-File Report 03-427, National Research Program, USGS, available online: <http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr03427/>.
- STATISTICAL OFFICE OF REPUBLIC OF SLOVENIA (STATISTIČNI URAD RS) 2002: Reke dolge nad 25 km in njihova padavinska območja.
- SZRAMEK, K., MCINTOSH, J.C., WILLIAMS, E.L., KANDUČ, T., OGRINC, N. & WALTER, L.M. 2007: Relative weathering intensity of calcite versus dolomite in carbonate-bearing temperature zone watersheds: carbonate geochemistry and fluxes from catchment within the St. Lawrence and Danube river basin. *Geochem. Geophys. Geosys.* 8/4:1-26, [doi:10.1029/2006GC001337](https://doi.org/10.1029/2006GC001337).
- URBANEK, J. 1994: Pesnica, In *Encyclopedia Slovenia* No. 8, pp. 314, Mladinska knjiga, Ljubljana,
- ZAVADLAV, S., KANDUČ, T., MCINTOSH, J. & LOJEN, S. 2013: Isotopic and chemical constraints on the biogeochemistry of dissolved inorganic carbon and chemical weathering in the karst watershed of Krka River (Slovenia). *Aquatic geochemistry*, 19: 3:209-230, [doi:10.1007/s10498-013-9188-5](https://doi.org/10.1007/s10498-013-9188-5).



Tri-dimensional Model of the Radovna Glacier from the Last Glacial Period

Tridimenzionalni model Radovniškega ledenika iz zadnje poledenitve

Luka SERIANZ

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

Prejeto / Received 29. 6. 2016; Sprejeto / Accepted 10. 11. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Key words: Quarternary, glaciation, Radovna Valley, 3D model, geomorphological mapping

Ključne besede: kvartar, poledenitev, dolina Radovne, 3D model, geomorfološko kartiranje

Abstract

The Radovna River Valley is located in the northwest of Slovenia, in the Julian Alps, and bounded by two plateaus – Pokljuka in the south and Mežakla in the north. Typical geological and geomorphological shapes in the valley indicate several glacial stages in the Pleistocene. As a result of glacial activity and river outflow, typical glacial and river terraces can be observed throughout the valley, especially in its lower and middle regions. The paper deals with the Radovna Glacier from the last glacial period, the existence of which is evidenced by certain remaining geomorphological features in the valley. Little investigative research on the Radovna Glacier, on its activity and extent, has been done in recent decades; the little that has been done has only featured the glacier as a secondary or incidental subject of research on the neighbouring Dolinka and Bohinj Glaciers. Both numerical modelling and field surveying were used for the reconstruction model, with work based on previous experiences and observations of hydrogeological conditions in the Radovna Valley. However, it must be emphasized that the model is only validated based on a few remaining traces of the glacier's activity.

Izvleček

Dolina reke Radovne se nahaja v severozahodnem delu Slovenije, v Julijskih Alpah med Poključko planoto na jugu in planoto Mežakla na severu. Značilne geološke in geomorfološke oblike v dolini kažejo na pojavljanje poledenitev v različnih obdobjih v pleistocenu. Danes se v celotni dolini, predvsem pa v njenem srednjem in spodnjem delu, nahajajo številne ledeniško-rečne terase. V članku je predstavljen Radovniški ledenik iz zadnje poledenitve, katerega sledovi so pripomogli k rekonstrukciji nekdanjega okolja. V zadnjih desetletjih je bilo o obstoju in obsegu Radovniškega ledenika izvedenih le nekaj raziskav. Večinoma je bil ta omenjen v raziskavah sosednjih ledenikov, predvsem Dolinskega in Bohinjskega ledenika. Za rekonstrukcijski model, ki temelji predvsem na preteklih opazovanjih hidrogeoloških razmer v dolini, sta bila uporabljena numerično modeliranje in terensko kartiranje. Model je zaradi slabo ohranjenih sledov ledenika v veliki meri poenostavljen, a bo v prihodnje lahko služil kot osnova za nadaljnje podrobnejše raziskave.

Introduction

The Radovna River Valley is located in the northwest of Slovenia, in a mountainous region of the Julian Alps. It is a typical U-shaped alpine valley extending in the northwest/southeast direction and bounded by two carbonate plateaus, Pokljuka in the south and Mežakla in the north. From a geographical perspective it is divided into three parts: Spodnja Radovna (Lower), Srednja Radovna (Middle) and Zgornja Radovna (Upper). Within the latter (Upper) it is subdivided into the

Kot Valley and the Krma Valley. The Radovna Valley was formed in the late Pleistocene, mainly through glacial activity and river erosion. The shape of the valley is the result of Radovna Glacier activity; in literature and papers it is also referred to as the Radovina Glacier (MELIK, 1963). Fluvial processes also had an important role in the geomorphological forming of the Radovna Valley. Postglacial waters with high discharge levels and energy coefficients were particularly important, as accumulation and erosion processes play an important role in typical glacio-fluvial terraces

construction on both banks of the Radovna River (SERIANZ, 2013). However, due to lower average annual temperatures in the Quaternary period, which could be some 4–15 °C lower than the typical average today (SINGH et al., 2011), the upper parts of mountains in the region were also covered in snow during the summer. Subsequently, snow accumulation increased and eventually froze and turned to ice. The ice sheets slid across the valleys all the way to the equilibrium line where, due to enormous pressure, they began to melt. In Slovenia, all mountains as well as valleys in the Julian Alps – Karavanke, Kamnik-Savinja Alps (MELIK, 1963), Trnovski Gozd (ŽEBRE et al., 2013) and Snežnik (ŠIFRER, 1959) – were covered with ice in the Würmian glaciation stage. The paper presents a paleo-reconstructed 3D model of the Radovna Glacier from the last glacial period in the Würm. The concept of 3D model is based on previous hydrogeological investigations in the Radovna Valley (SERIANZ, 2013; SERIANZ, 2015; TORKAR & BRENČIČ, 2015; TORKAR, 2010).

The purpose of this paper is to:

- interpret the origin of the geomorphological features in the valley,
- confirm the existence of the glacier from the last glacial period,
- evaluate the extent of the glacier.

Pleistocene glaciations

The first theories that glaciers extended out of the Alps and onto the forelands were developed during the first half of the 19th century. VENETZ (1861) first presented the idea that glaciers approached the forelands in several stages. The idea gained credibility with PENCK & BRÜCKNER'S (1909) theory of four glaciation stages, borne out by a particular sequence of landforms in Europe called glacial series. These glacial periods were named Günz (MIS 16), Mindel (MIS 12), Riss (MIS 6) and Würm (MIS 2–4; 5a–d) after small rivers in Bavaria, while the most recent definition of glaciation stages is defined according to marine isotope stage (MIS) timescale. The well-known and widely accepted expansion theory of PENCK & BRÜCKNER (1909) was later modified and extended by three further glacial stages: Donau (EBERL, 1930), Biber (SCHAEFER, 1957) and Haslach (SCHREINER & EBEL, 1981). Each glaciation period was followed by an interglaciation period with typical postglacial waters. During the interglacial period the temperatures rose and the ice started to melt, which resulted in postglacial wa-

ters with a typically high energy index. According to PENCK & BRÜCKNER'S (1909) theory, three interglacials were observed (KUKLA, 2005; GIBBARD & VAN KOLFSCHOTEN, 2004): Günz-Mindel (MIS 13–15), Mindel-Riss (MIS 11) and Riss-Würm (MIS 5e). Variable climatic dynamics resulted in typical geomorphological structures in the Alps. These structures provide the most valuable data for paleo-glacial reconstruction and are an essential part of Quaternary investigations.

Three paleo-glaciers were observed in the Triglav range: the Dolinka Glacier, the Bohinj Glacier and the Radovna Glacier (RAKOVEC, 1928; MELIK, 1930; RAKOVEC, 1936). Among them only the extent of the Bohinj Glacier was attempted to be reconstructed (BAVEC, 2006). Some researchers attempted to provide evidence of activity of the Radovna Glacier (RAKOVEC, 1943) and evaluate its extent. It is assumed that the Radovna Glacier extended in the direction from Zgornja Radovna toward Krnica (DROBNE et al, 1975). MELIK (1963) thought that the Radovna Glacier was most active in Würm, where the most significant reconstruction of the valley's shape took place. However, such definition is very general, as the Würm covered roughly the period between 115 ka and 10 ka. Greatest glacial extension in Würm was represented by the Last Glacial Maximum (LGM). LGM is defined according to the marine isotope stage MIS 2 and is placed between 30 ka and 18 ka (IVY-OCHS et al, 2008). The altitude of the snow line during the LGM has been estimated at roughly 1300 m a.s.l. (MELIK, 1954; PENCK & BRÜCKNER, 1909: proposed 1350 m a.s.l.). Similarly, modelled geothermal data from several boreholes in Slovenia indicates temperatures are today some 7 °C higher than during the LGM. (BAVEC & TULACZYK, 2002; after ŠAFANDA & RAJVER, 2001). That would put the snow line in the Julian Alps at an altitude of 1300 – 1400 m a.s.l.

Evidence of the Radovna Glacier

It is assumed that the Radovna Glacier covered the whole of the Radovna Valley, ending in the village of Zgornje Gorje, where it was, at one point in the Würm, connected to the bigger Bohinj Glacier (NOVAK & BAVEC, 2013). Also, layers of fine grained glaciolacustrine deposits found in the Middle Radovna confirm the existence of the Radovna Glacier. In the former exploitation area in Srednja Radovna the maximum thickness of this deposits is estimated to have been 23.6 m (Iskra, 1982). Data from boreholes drilled

in the Gabrje area show some glaciolacustrine sediments also in the deepest sections of the glaciofluvial deposits (DROBNE, 1975). Radovna Glacier terminal moraine is located in the village of Zgornje Gorje. A typically shaped structure, known by its local name of Obočnica, could only have been formed by a massive amount of energy that only a glacier could produce. Along with the terminus, only a few moraine sediments can be found in the Radovna Valley. ŠIFRER (1952) stated that some moraine sediments can be found near the local forest road that runs from Stara Pokljuka to the Repečnikov rovt, at a maximum altitude of 960 m a.s.l. The same author mentioned some moraine sediments located near Krištanj, between Stara Pokljuka and Spodnja Radovna. However, this part of Stara Pokljuka was never covered by ice sheets at altitudes higher than 990 m a.s.l. (ŠIFRER, 1952). By the same token, some evidences of glacial activity are preserved in the higher reaches of the Pokljuka plateau (ŠIFRER, 1952). It is possible that these sediments belong to the small glaciers in Pokljuka plateau, which was covered with ice during the Würm glacial stage.

Furthermore, the moraine sediments occur in Stresena dolina, but only to a maximum altitude of 1150 m a.s.l. Moreover, some glacier sediments located at the Oblek meadow at altitudes of 1110–1180 m a.s.l. are mentioned in the existing literature (ŠIFRER, 1952). GAMS (1992) reported on moraine sediments near the local Zgornja Radovna-Mojstrana road. This part of the observation area, called Kosmačev preval, represents the transition valley raised above the altitudes of the Radovna Valley floor. It is assumed that at this point the Radovna Glacier was connected with the Dolinka Glacier. The latter probably covered the entire Upper Sava Valley, with accumulation areas in Tamar, Vršič and Vrata. PENCK & BRÜCKNER (1909) also claimed that the Radovna and Dolinka Glaciers were in contact. An ice mass from Krma and Kot might have damned up the Dolinka Glacier, which fact can be inferred by the steep terrain towards the Radovna Valley. MELIK (1954), however, rejected this hypothesis on the grounds that this part of the Radovna valley was too narrow. By definition (BENN & EVANS, 1998) the Radovna Glacier was a valley glacier where ice was discharged from an ice field into a deep bedrock valley. Debris could still have been deposited onto the foreland as a result of both gravity and flowing water where glacier margins were in the stage of advancing or retreating. As a

result, unequivocal evidences of the glacier's activity in the Radovna Valley rarely remains preserved or are obscured below thick layers of alluvial sediments. Consequently, it was not possible to draw up a reliable chronology of the various stages in the lifetime of the Radovna Glacier.

Methods

Conceptual model

It is assumed that almost all evidence of the existence of the Radovna Glacier may well have been destroyed or lie obscured below thick layers of alluvial sediments. In order to describe and locate the spatial distribution of the existing geomorphological indicators of glacial activity presented in the Radovna Valley a conceptual model was implemented (Fig. 1). The conceptual model was based on data from collected literature on the geomorphological and hydrogeological characteristics of the observation area and referenced in this paper. The most important geomorphological features are terraces consisting of glaciofluvial sediments. Granulometry of the sediments is crucial for determining the origin of erosion and accumulation. In order to achieve an integrated interpretation hydrogeological characteristic of deposit layers in the valley were also taken into account (e.g. permeability). Owing to the scarcity of evidence of the Radovna Glacier, implementing an extended conceptual model was key to achieving a satisfactory reconstruction scenario.

Fieldwork

Using existing data reviews from existing literature and the application of different cartographic bases, each location along the Radovna Valley was examined (shown in the chapter "Results and discussion: Fig. 4"). Geomorphological mapping was performed in the Radovna Valley in order to determine the glacier bed and its potential extent. The first fine records of terraces were mapped in the Srednja Radovna and Spodnja Radovna. Mapping was based on the spatial relationships between interpreted terraces and the surrounding natural topography. Additionally, in order to identify the terraces that were the result of glacier activity and those formed by river accumulation a simple sedimentological record of uncovered terrace profiles was assembled, which included measurements of compactness, grain size and orientation of clasts. This record makes it possible to reconstruct a glacier profile,

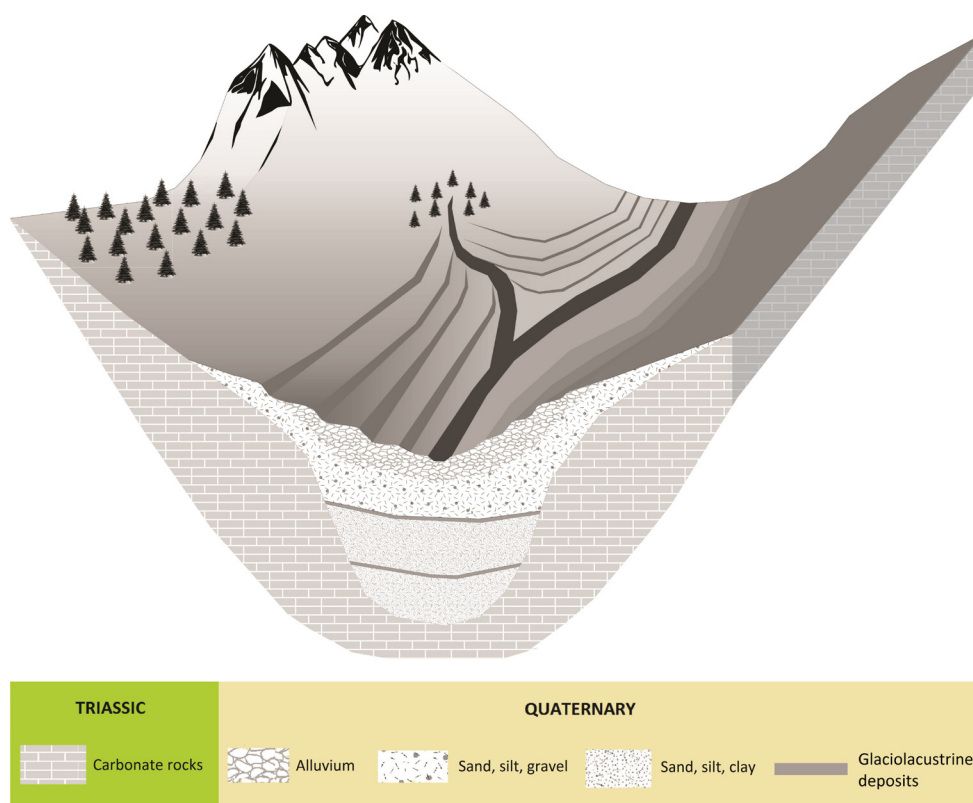


Fig. 1. Geological conceptual model of the Radovna Valley.

despite the fact that moraine sediments are not well preserved. Furthermore, moraine sediments were also mapped using the simple method of following contacts.

2D and 3D modelling and boundary conditions

The idea for a 3D geomorphological model was based on analysis performed using the Quantum GIS open source geographic information system (QGIS, 2015) with the GNU General Public license. QGIS is composed of a collection of software that enables the creation, visualization, querying and analysis of geospatial data. However, the quality of such a program cannot be compared to other licensed programs for 3D spatial data modelling that includes various statistical tools for the analysis and distribution of input data. Statistical tools available in QGIS allow the spatial analysis, but as it turns out, the design and application of the initial and boundary conditions require several adjustments. Hence, QGIS allows for 3D visualization that is limited to only relatively low resolution for modelled data.

The cartographic base used for the modelling was obtained from the freely-accessible USGS EarthExplorer (USGS, 2012) database. The location of the Radovna Glacier terminus was already known and represents the initial condition of the model. Determining the glacier head and

bed required a slightly different approach. When determining the glacier head and accumulation area it was necessary to take into account the fact that ice cannot accumulate on slope-grades of greater than 60° . Slopes were calculated in QGIS based on DEM cartographic data. Slopes greater than 60° , where ice accumulation is impossible due to gravity were modelled (Fig. 2). The result of modelled slopes identified possible areas where ice could have accumulated and slid through the valleys. The glacier bed was determined based on sediment granulometry in the glaciofluvial terraces. In order to set the coordinates for spatial modelling, several points were selected on those glaciofluvial terraces which were later interpret as a glacier bed. The glacier bed served as the basis for the construction of the 3D mathematical model of the Radovna Glacier. The mathematical model is based only on the mechanical properties of the ice and the established equation for calculating the longitudinal profile of the glacier. The results of the modelling were later compared with the data from the field. In order to provide a more illustrative model of the conditions in the last glacial period a final 3D model also includes the ice caps of the Pokljuka, Bohinj and Dolinka Glaciers. The actual extent of the Bohinj Glacier in the 3D model is simply the result of theoretical interpolation and may differ from previously identified conditions (BAVEC, 2006).

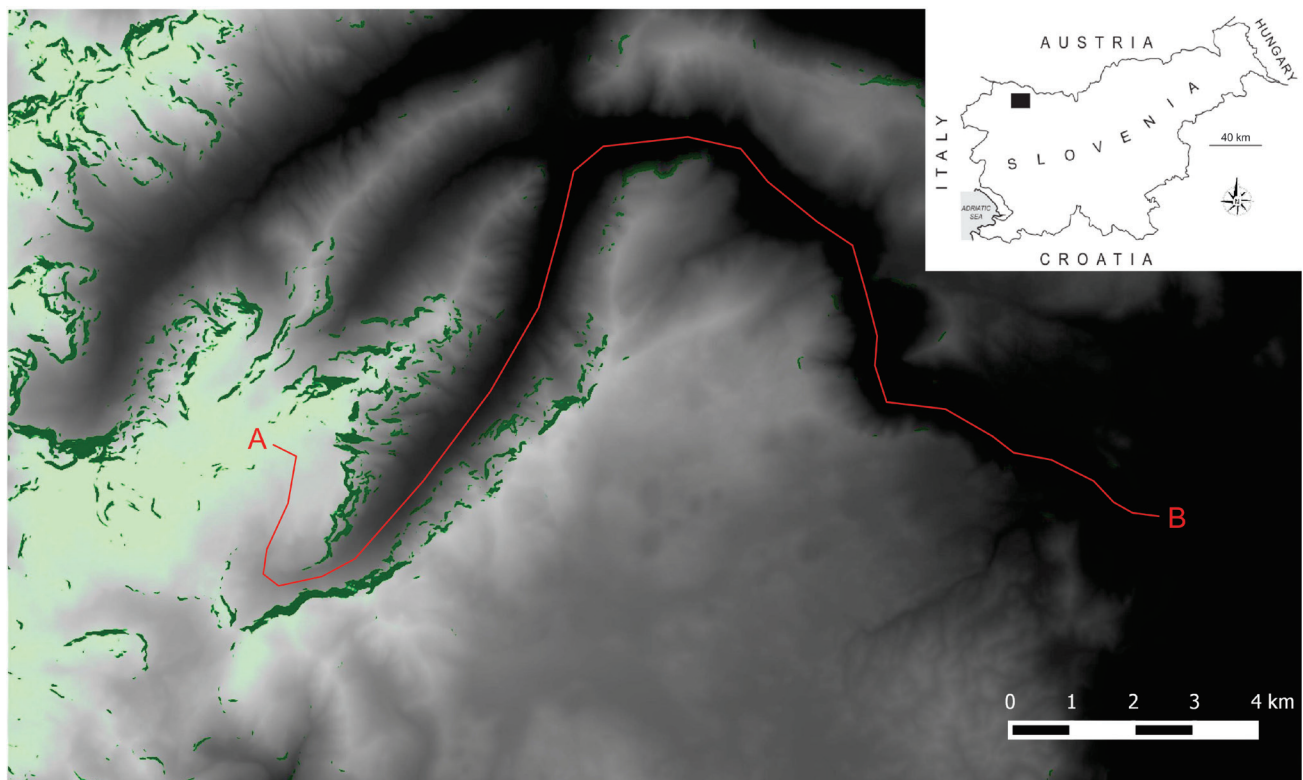


Fig. 2. Modeled values of slope above 60° (green contour) with intersection line for 2D model.

Determination of equilibrium-line altitude (ELA)

Equilibrium-line altitude or ELA represents the altitude where total annual accumulation is perfectly in balance with total ablation (BENN & EVANS, 1998). Therefore, ELA is an important descriptive factor in every glacial system (Fig. 3). Fluctuations in the ELA can serve as an important indicator of a glacier's response to changes in climate and allows the reconstruction of past climates. A variety of methods have been devised to estimate the steady-state ELA of vanished glaciers and to provide a means of reconstructing former climates in glaciated regions (BENN & EVANS, 1998). The most rigorous of these methods are based on a 3D model of the glacier surface using the ratio of accumulation to ablation areas. Two indirect methods were used to determine the ELA of the Radovna Glacier. The first, the toe to headwall altitude ratio (THAR) represents the empirical relationship between the highest (glacier head) and the lowest (glacier toe) border of the glacier and is used for a simple calculation of the ELA. MEIERDING (1982) found ratios of 0.35 and 0.40 produced the best results for glaciers in Colorado, USA. However, for the valley glaciers, values of 0.50 were proposed (MEIERDING, 1982). The second method is based on accumulation area ratios (AAR), which are based on the

assumption that the accumulation area of a glacier represents some fixed proportion of the total glacier area. This can be approximated from a topographic map by locating the altitude on the glacier surface that places 0.65 of the glacier area in the accumulation zone. Several studies performed on modern glaciers have shown that the accumulation area represents approximately 65 % of the glacier (MEIERDING, 1982). However, values of 0.67 were proposed (GROSS et al., 1977) for investigations of the Alpine glaciers.

Theoretical calculations

The most common method for reconstructing the extend of paleo-glaciers is based on the mechanical characteristics of ice sheets and shear stress ratios, and is independent of field data (BENN & HULTON, 2010). NYE (1952) compared the theoretical and measured longitudinal profile of the Unteraar glacier in Switzerland. He concluded that the relationship between theoretical and measured profiles was quite satisfactory using ice shear stress τ of 77 kPa. However, Nye (1952a) proposed values of ice τ between 49 kPa and 151 kPa for alpine glaciers. The τ values increase from toe to head. The model is built on the assumption that ice becomes deformed due to the weight and surface gradient of the ice only upon reaching a specified yield stress level. Given that

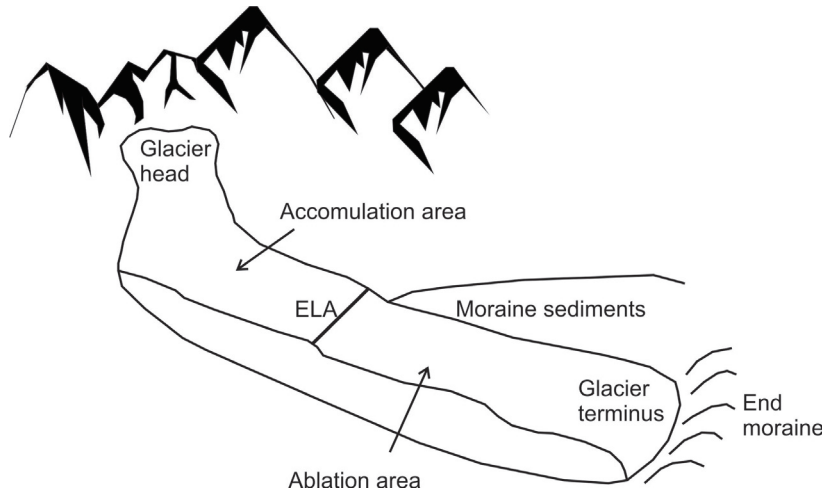


Fig. 3. Concept of the Glacier Anatomy (INTERNET 1).

assumption, the next equation (1) was introduced (NVE, 1952b):

$$\tau = \rho g h \sin \alpha \quad (1)$$

The equation is based on the assumption that the basal shear stress per unit area τ , at the base of an ice sheet is a product of ice thickness h , ice density ρ ($\sim 900 \text{ kg/m}^3$), acceleration due to gravity g (9.81 m/s^2) and glacier surface slope α . If true, the $\sin \alpha$ should be roughly inversely proportional to the depth of the ice and the horizontal axis x in the direction of the glacier's extending (Equation 2):

$$\sin \alpha = \left(\frac{dh}{dx} + \beta \right) \quad (2)$$

where β is the slope of the glacier bed.

Hence, we have a non-linear equation solved using only small values of β (Equation 3):

$$\frac{dh}{dx} + \beta = \frac{\tau}{\rho g h} \quad (3)$$

Solving out equation (3) we have (Equation 4):

$$\frac{h^2}{2} = \frac{\tau}{\rho g} x + C \quad (4)$$

Where the initial condition is presented by $h=0$ at $x=0$, hence the constant of integration C is equal to 0. Therefore, a simple equation for the calculation of ice thickness is derived:

$$h = \sqrt{\frac{2\tau}{\rho g} x} \quad (5)$$

However, for purposes of this article a different solution for equation (1) was presented as in equation (6):

$$\tau = \rho g H \frac{dh}{dx} \quad (6)$$

Where H is the glacier thickness, h is the ice surface elevation, and x is the horizontal coordinate with the x -axis parallel to the upward gradient glacier flow toward the glacier head (BENN & HULTON, 2010).

This equation (1) can be expressed numerically by discretizing the surface gradient as in equation (7):

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x} \quad (7)$$

where Δx is a specified distance interval along the x -axis. Thus, equation (7) can be rewritten so that the ice surface elevation at step $i+1$ is equation (8) (BENN & HULTON, 2010):

$$h_{i+1} = h_i + \left(\frac{\tau_y}{H} \right)_i \frac{\Delta x}{\rho g} \quad (8)$$

where $H=h-B$, B is the elevation of the glacier bed and τ_y . If we derive the previous equation differently, so as to calculate the ice thickness and shear stress for the mid-point of the interval i to $i+1$ (VAN DER VEEN, 1999) the following equation is derived:

$$h_{i+1}^2 - h_{i+1}(B_i + B_{i+1}) + h_i(B_{i+1}H_i) - \frac{2\Delta x \bar{\tau}_y}{\rho g} = 0 \quad (9)$$

where the overbar indicates that the yield stress is average for the interval.

As the shear stress significantly varies down gradient only average values for shear stress were used as input values in the model. The longitude profile of the Radovna Glacier was tested at shear stresses of 50, 100 and 150 kPa. For purposes of the modelling, however, only shear stress of 50 kPa and 100 kPa were used, because it was determined that the model would exceed the assumed glacier's thickness at a modelled shear stress of 150 kPa.

Results and discussion

Geomorphological conditions

Glaciofluvial terraces

Based on observations and several investigations in the Radovna Valley, it can be assumed that its geomorphological characteristics are largely the result of glacier activity and river outflow. Therefore the river channel was formed directly in the glaciofluvial sediments. Both accumulation and erosion resulted in the construction of river terraces. Today, a series of terraces can be observed along the middle and lower part of the Radovna Valley. The average height of the terraces is estimated at between 5 and 10 m. The younger terraces near the river channel have a small slope but are well preserved, while with the distance from the river channel the slopes increase. However, the oldest terraces stand higher than the younger terraces, even though they are almost totally eroded or covered with gravel. The morphology of the river terraces shows typical glacial and alluvial deposits, while in the upper part of the valley, where only processes of erosion were observed, there are no terraces. It is assumed that the riverbed gradient and river discharges were so high that terrace construction was impossible. According to that line of thinking a simple hypothesis can be proposed – that the shape of the valley floor has not significantly changed since the retrograding stage of the last glacier. As the highest terraces contain glacier sediments it is considered that only processes of river erosion were present during the first phase of the interglacial period. Therefore, it is believed that the upper or highest terrace represents the bed of the Radovna Glacier.

A series of terraces can be observed near the Zmrzlek spring in Srednja Radovna (Fig. 4, point a). The highest terraces are filled with glacial sediments, while the lowest contain only gravel. The terraces near the Lipnik spring were

also investigated in detail (Fig. 4, point b). A fresh profile was uncovered in the upper terrace, which contains horizontally laminated fine silt fractions in the upper horizon. It would seem that the river did not have any particular influence on the given profile. Furthermore, two terraces in Jela (Fig. 4, point c) were investigated in detail. These contain gravel with some fine sandy fractions, while a transverse terrace profile near the local Hotune – Voje road contains mostly gravel that can locally pass into a conglomerate. To conclude, four terraces were indicated in the Radovna Valley. The first three terraces contain alluvial sediments, mostly gravel and sand. However, the highest terrace contains glacial sediments, mostly silt, sand and clay. As a result it can be assumed that the highest terraces were formed by glacial activity and might indicate the altitude of the last glaciation bed.

Moraine sediments

Geomorphological mapping was performed at several locations along the Radovna Valley, starting in Zgornja Radovna. The most remote location in the valley, where the moraine sediment was indicated, lies in the valley between Kot and Vrata (Fig. 4, point h). A local road climbs from the narrow valley bed up to the small plateau. A small hill is located immediately at the top, to the east, between the road and the Mežakla plateau. It is covered with moraine sediments. South of the hill the topology is directed very steeply down to the Radovna Valley. Typical geomorphology may indicate contact between two glaciers. The steep slopes rising out of the Radovna Valley can be interpreted as the result of lateral erosion from ice sliding in the direction of Kot and Krma.

Furthermore, the whole of Stresena dolina in Srednja Radovna was mapped (Fig. 4, point g). A local forest road, which runs from the bottom of the valley up to the Pokljuka plateau, uncovers glacial sediments. On the other side of the valley location near Oblek (Fig. 4, point f) was mapped, where some glacial sediment was also found. The area near Krištanec (Fig. 4, point e), between Lipne peči and Stara Pokljuka in Spodnja Radovna has been significantly transformed through a number of sediment-gravitational processes. It is assumed that these processes might obscure the evidence of glacial activity. However, typical glacial sediment was indicated in the forest road profile near Krištanec. The investigated

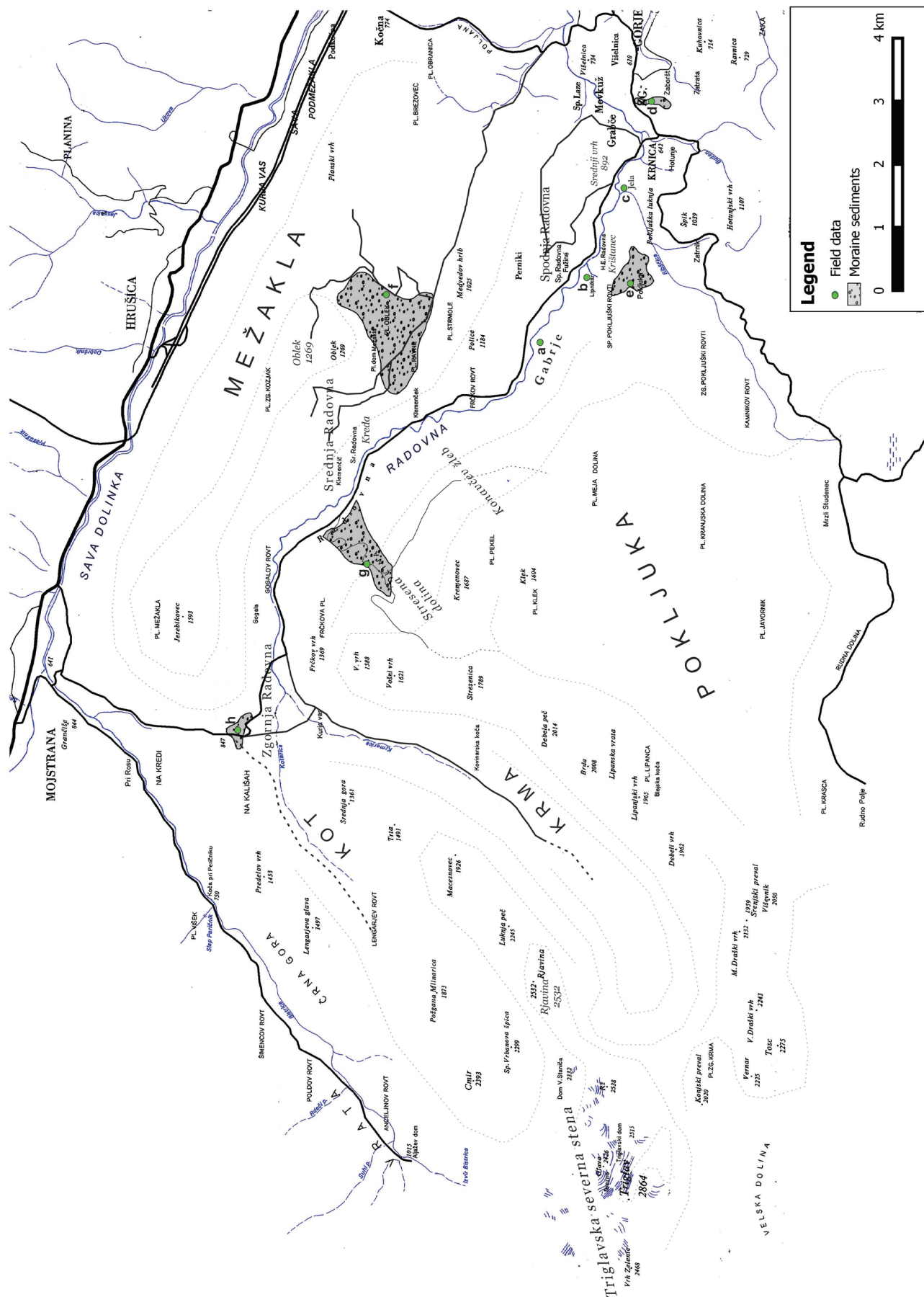


Fig. 4. Topographic map of the study area with locations of field investigations and delineated moraine sediments.

profile was followed at an altitude of 800 m a.s.l. Remarkable evidence of glacial presence is located in the village of Zgornje Gorje. A small topographic rise presents a terminal moraine of the former glacier. However, lateral glacial moraines are rarely preserved in the valley. The most pronounced is the outmost terminal moraine of the Radovna Glacier, located in the village of Zgornje Gorje (Fig. 4, point d).

2D model and validation

A longitudinal 2D profile of the glacier was calculated as the basis for the 3D spatial model. The Radovna Glacier's longitudinal profile was tested for two different shear stresses (τ) typical for Alpine glaciers, at 50 kPa and 100 kPa. Results show that ice thickness increases rapidly with distance from the terminus. In the village of Krnica the ice is already roughly 140 m thick. At its thickest the Radovna Glacier could reach thicknesses of 300–446 m. The surface of the Radovna Glacier displays a smaller dip in the middle, while the dip increases constantly from the terminus. Furthermore, the 2D profile (Fig. 5) shows that the glacier's maximum thickness (446 m at $\tau = 100$ kPa and 300 m at $\tau = 50$ kPa) is located at a distance of 11 to 12 km from the terminus. This represents the area between the Jerebikovec (1593 m a.s.l.) and Frčkov

vrh (1369 m a.s.l.), or right at the contact point of the ice masses, which slid from the Krma Valley and the Kot Valley. Here, the dip of glacier bed is small, while in the Kot and Krma valleys, parallel to the Rjavina ridge (2532 m a.s.l.), the dip of the glacier bed grows substantially all the way to the Kredarica (2539 m a.s.l.). Here the ice starts to become proportionally thinner with the greater dip of the glacier bed. Both the field data and existing literature indicate that the glacier did not exceed altitudes greater than 900 m a.s.l. at Krištanec, 1110 m a.s.l. at Oblek and 1150 m a.s.l. in Stresena dolina. Taking this into account it is clear that the calculated longitudinal profile of the glacier at $\tau = 100$ kPa was most appropriate. From this profile of the glacier it is evident that the thickness of the ice rapidly increases in the initial distances from the glacier terminus. Already at the village of Krnica, the ice surface reached altitudes of 140 m higher than the level of the Radovna River today. At a distance of about 1300 m from the terminus the glacier surface raised up to the altitude of 810 m a.s.l., – roughly 80 m lower than Srednji vrh.

3D model

3D modelling was performed in order to optimize the visualization of the glacier extent. Two 3D models are presented, calculated using two dif-

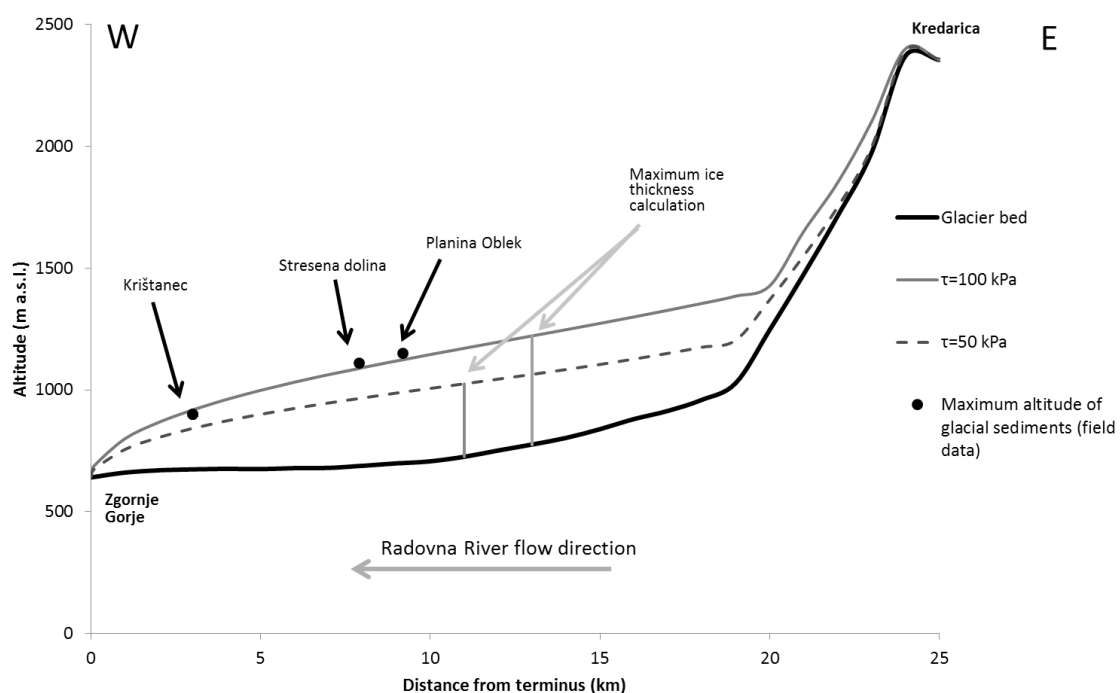


Fig. 5. Longitudinal profile of the Radovna Glacier with topographical units versus the distance from glacier terminus in the village Zgornje Gorje.

ferent shear stress values, of 50 kPa and 100 kPa (Fig. 6). Comparing the theoretical calculations with field data indicates that the $\tau = 100$ kPa model is more relevant for the field data scenario. Equilibrium altitude line (ELA) was also calculated using two methods: (1) toe to headwall altitude ratio (THAR), and (2) accumulation area ratio (AAR). The THAR method locates the ELA at an altitude of 1498 m a.s.l. The second (AAR) method suggests an altitude of 1150 m a.s.l. Total glacier area was calculated to be 58 km²; given AAR=0.65 the accumulation area of the Radovna Glacier should cover an area of 37.7 km². Therefore, the given catchment area of the Radovna Valley is entirely appropriate for a glacier of such dimensions. The glacier covered two valleys in the upper part of Radovna, Kot and Krma. Accordingly, the extent of the accumulation area was interpreted. The first accumulation

area was located all the way under the southern wall of Mount Triglav, Kredarica and Mount Rjavina, from where the ice sheets slid into the Krma Valley. The second accumulation area was located on the smaller slopes above the northern wall of Mount Triglav, where a small ice sheet called the Triglav Glacier remains today. It is assumed that this local area above the northern wall of Mount Triglav represented one of the largest accumulation areas of ice during the Würmian glaciation. The ice slid into the Vrata Valley and extended into the Mojstrana, where it was connected with one of the largest Pleistocene glaciers in Slovenia, the Dolinka Glacier, named after the Sava Dolinka River. The typical pyramidal horns and ridges of the upper part of Mount Triglav can still be observed today, as the result of several active glaciers sliding into the surrounding valleys.

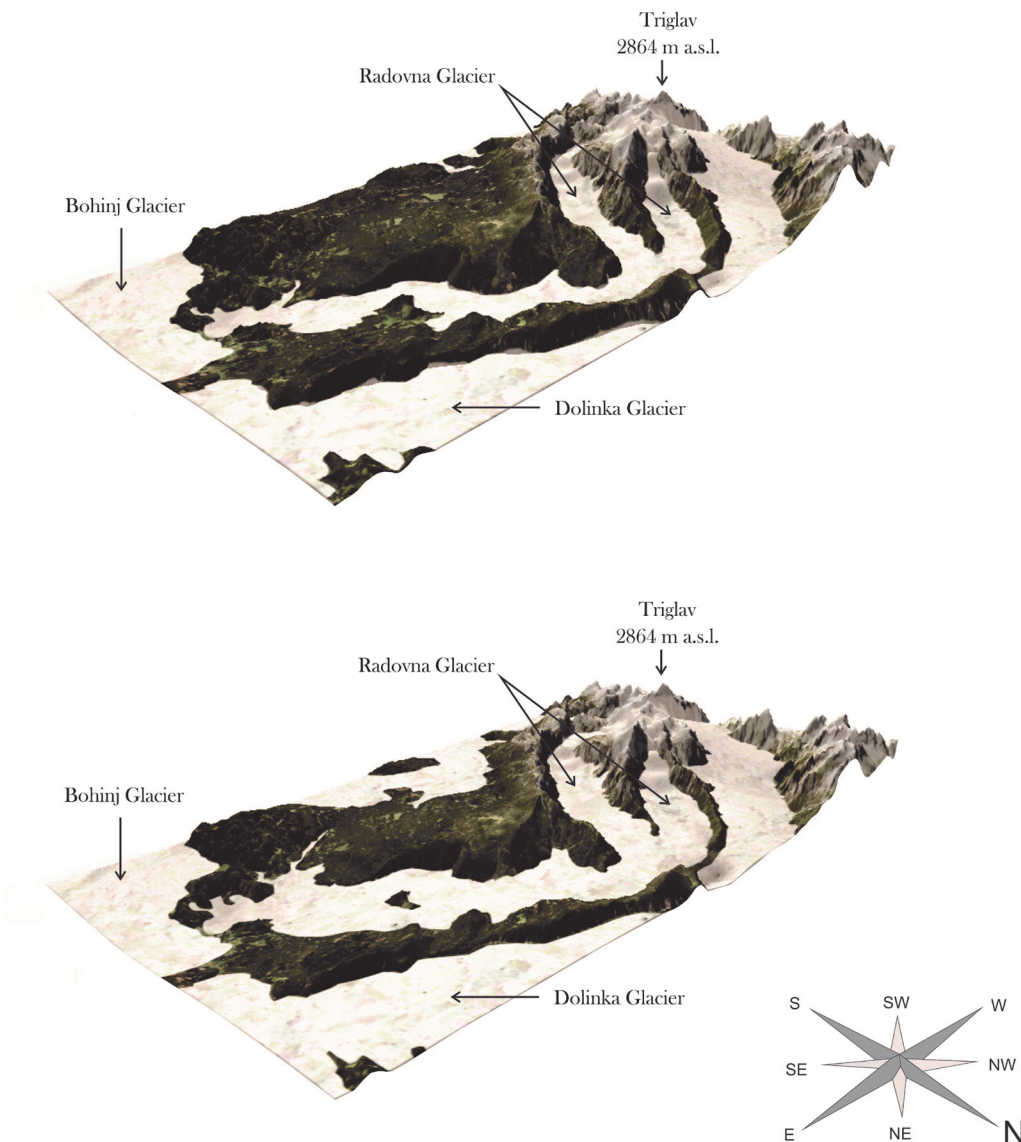


Fig. 6. 3D model of the Radovna Glacier in last glacial period with the modelled shear stress 50 kPa (upper figure) and 100 kPa (lower figure).

Conclusion

The 3D geomorphological model of the Radovna Glacier presented herein constitutes a basis for further investigation of the glacier extent. This is the first integrated investigation into the very existence and scope of the Radovna Glacier. The open source QGIS program has proved as a valuable tool in the given modelling approach and process. By the same token, the creation and implementation of a conceptual model is essential, because the selection of input data and boundary conditions is central to gaining a better understanding of the issue at hand. As a result it can be concluded that the Radovna Glacier did exist. Its accumulation area extended from the Triglav massive all the way through Krma and Kot. Glacier extending some 25 km covered the whole part of Radovna Valley. At some distance from the terminus the ice reached thicknesses of more than 400 m; however, with no field data available the model could not be validated on this point. The thickness of the ice in this model was calculated independently of any field data.

Thick layers of glaciofluvial sediments cover the valley floor, which may indicate an extensive period of Pleistocene glaciation; PENCK & BRÜCKNER's theory (1909) of four glaciations stages may also be valid in the case of Radovna glaciation. The reconstruction of the glacier leaves some questions unanswered, answers to which may hold the key to identifying past glaciation at the catchment. A scenario whereby glaciers moved across the Pokljuka plateau may well still remain a distinct possibility. The fact that typical geomorphological features are present in the upper reaches of Stresena dolina and Pokljuška soteska lends credence to such a scenario. Ice sheets may have extended from Klečica (1889 m a.s.l.) to Stresena dolina and from the Klek meadow (1604 m a.s.l.) through Konavčev žleb (ŠIFRER, 1952). Furthermore, ice sheets may have covered the upper, steeper regions of the Triglav summit, where some typical pyramidal horns and ridges can still be observed.

Acknowledgments

The author is grateful to Matic Rifi for his assistance with field investigations, dr. Nina Rman for her help with the context and structure of the paper, dr. Miloš Bavec and Assoc. Prof. dr. Mihael Brenčič for their review of the paper.

References

- BAVEC, M. & TULACZYK S. M. 2002: Matematični model kot pomoč pri oceni obsega mlajšepleistocenskega dolinskega ledenika v Zgornjem Posočju = New simple mathematical model to help evaluating the extent of the late-Quaternary valley glacier in the Upper Soča Region (NW Slovenia). *Geologija*, 45/1: 255–268, [doi:10.5474/geologija.2002.019](https://doi.org/10.5474/geologija.2002.019).
- BAVEC, M. 2006: Razsežnost in dinamika Bohinjskega ledenika v poznem Pleistocenu = The extent and the dynamics of the Late Pleistocene Bohinj glacier. In: Zbornik povzetkov: 35–36, 2. slovenski geološki kongres, Idrija, 26.–28. september 2006.
- BENN, D.I. & HULTON, N.R.J. 2010: An Excel™ spreadsheet program for reconstructing the surface profile of former mountain glaciers and ice caps. *Comp Geosci*, 36: 605–610.
- BENN, D. I., & EVANS, D. J. A. 1998: *Glaciers & glaciation*. London, Arnold: 734 p.
- DROBNE, F. 1975: Geološke in geotehnične raziskave k idejni študiji »Akumulacija Radovna«. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana: 43 p.
- EBERL, B. 1930: *Die Eiszeitenfolge im nördlichen Alpenvorland*. Augsburg: Benno Filser Verlag.
- GAMS, I. 1992: Prispevek k mladokvartarni geomorfologiji v Zgornjesavski dolini = A contribution to the young Quaternary geomorphology in the Upper Sava Valley. *Geografski zbornik*, 32: 5–49.
- GIBBARD, P. & VAN KOLFSCHOTEN, T. 2004: The Pleistocene and Holocene Epochs. In: GRADSTEIN, F. M., OGG, J. G., SMITH, A.G. & GILBERT, A. (eds.): *A Geologic Time Scale 2004*: 441–452, incl. 10 Pls.
- GROSS, G., KERSCHNER, H. & PATZELT, G. 1977: Methodische untersuchungen über die Schneegrenze in Alpinen Gletschergebieten. *Zeitschr. Gletsch. Glazialgeol.*, 12: 223–251.
- ISKRA, M. 1982: Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji in izračunu zaloga jezerske krede na območju odkopa v Srednji Radovni. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana: 22 p.
- IVY-OCHS, S., KERSCHNER, H., REUTHER, A., PREUSSER, F., HEINE, K., MAISCH, M., KUBIK, P. W. & SCHLUCHTER, C. 2008: Chronology of the last glacial cycle in the European Alps. *J. quat. sci.*, 23 (6-7): 559–573, [doi:10.1002/jqs.1202](https://doi.org/10.1002/jqs.1202).
- KUKLA, G. 2005: Saalian supercycle, Mindel/Riss interglacial and Milankovitch's dating. *J. quat. sci.*, 24/14-15: 1573–83, [doi:10.1016/j.quascirev.2004.08.023](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.08.023).

- MEIERDING, T. C. 1982: Late pleistocene glacial equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range: A comparison of methods. *Quat. Res.*, 18/3: 289–310.
- MELIK, A. 1954: Nova glaciološka dognanja v Julijskih Alpah. *Geografski Zbornik*, 2: 5–49.
- MELIK, A. 1930: Bohinjski ledenik. *Geografski vestnik*, 1–4: 39 p.
- NOVAK, M. & BAVEC, M. 2013: Geološke značilnosti Bleda in okolice = Geological characteristics of Bled and its environs. *Scopolia*, Suppl., 6: 1–31.
- NYE, J. F. 1952a: A comparison between the theoretical and the measured long profile of the Unteraar Glacier. *J. Glaciol.*, 2: 103–107.
- NYE, J. F. 1952b: A method of calculating the thickness of ice sheets. *Nature*: 169(4300): 529–530.
- PENCK, A. & BRÜCKNER, E. 1909: Die Alpen in Eiszeitalter 3. C. H. Tauchnitz, Leipzig: 717–1199.
- RAKOVEC, I. 1928: Postglacialne terase Blejskega jezera v zvezi z njegovo morfogenezo. *Geografski Vestnik*, IV: 21 p.
- RAKOVEC, I. 1936: Triglavsko pogorje v ledeni dobi. *Proteus*, 3s: 133–137.
- RAKOVEC, I. 1943: O razvoju porečja v Blejskem kotu in nastanku Vintgarja. *Zbornik Prirodoslovnega društva III*: 87 – 94.
- SCHAEFER, I. 1957: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Augsburg und Umgebung 1: 50,000. Bayerisches Geologisches Landesamt München.
- SCHREINER, A. & EBEL, R. 1981: Quartärgeologische Untersuchungen in der Umgebung von Interglazialvorkommen im östlichen Rheingletschergebiet (Baden-Württemberg). Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland.
- SERIANZ, L. 2013: Hidrogeologija izvira Zmrzlek v dolini reke Radovne. Diplomsko delo, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana: 37 p.
- SERIANZ, L. 2015: Hidrogeološka analiza vodne bilance reke Radovne = Hydrogeological analysis of river Radovna water balance. Magistrsko delo, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana: 70 p.
- SINGH, V. P., SINGH, P. & HARITASHYA, U. K. 2011: Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Dordrecht: Springer, <http://site.ebrary.com/id/10480367>.
- ŠAFANDA, J. & RAJVER, D. 2001: Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia. *Global and Planetary Change*, 29, 3/4: 241–257.
- ŠIFRER, M. 1959: Obseg pleistocenske poledenitve na Notranjskem Snežniku. *Geografski Zbornik*: 27–83.
- TORKAR, A. 2010: Hidrogeologija doline reke Radovne. Diplomsko delo, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana: 68 p.
- TORKAR, A. & BRENČIČ, M. 2015: Spatio-temporal distribution of discharges in the Radovna River valley at low water conditions. Prostorsko-časovna porazdelitev pretokov v dolini reke Radovne v obdobju nizkih vod. *Geologija* 58/1: 47–56, [doi:10.5474/geologija.2015.003](https://doi.org/10.5474/geologija.2015.003).
- USGS (United States Geological Survey), 2012: »EarthExplorer«. Internet: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (29.3.2016).
- VAN DER VEEN, C.J. 1999: Fundamentals of Glacier Dynamics. Balkema, Rotterdam: 462 pp.
- VENETZ, I. 1861: Mémoire sur l'extension des anciens glaciers. Zurich: s.n.
- QGIS, 2015: Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Development Team. Internet: <http://qgis.osgeo.org> (29.3.2016).
- ŽEBRE, M., STEPIŠNIK, U., KODELJA, B. & MORRIS, M. 2013: Sledovi pleistocenske poledenitve na Trnovskem gozdu. *Dela*, 39: 157–170.
- Internet resource:
INTERNET 1: <http://climatica.org.uk/moraines-piles-dirt-record-glacier-fluctuations> (17.6.2016)



Ocena količinskega stanja podzemnih voda za Načrt upravljanja voda 2015-2021 v Sloveniji

Groundwater quantitative status assessment for River Basin Management Plan 2015-2021 in Slovenia

Mišo ANDJELOV, Peter FRANTAR, Zlatko MIKULIČ, Urška PAVLIČ, Vlado SAVIČ,
Petra SOUVENT & Jože UHAN

Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: miso.andjelov@gov.si;
peter.frantar@gov.si; zlatko.mikulic@gov.si; ursa.pavlic@gov.si; vlado.savic@gov.si;
petra.souvent@gov.si; joze.uhan@gov.si

Prejeto / Received 29. 9. 2016; Sprejeto / Accepted 18. 11. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Ključne besede: telo podzemne vode, obnovljiva količina podzemne vode, razpoložljiva količina podzemne vode, količinsko stanje podzemne vode, Slovenija

Key words: groundwater body, renewable groundwater, available groundwater, groundwater quantitative status, Slovenia

Izvleček

V članku predstavljamo metodološki razvoj ocenjevanja količinskega stanja podzemnih voda v Sloveniji in rezultate v ocenjevalnem obdobju 2010-2013, ob upoštevanju novega referenčnega tridesetletnega vodno-bilančnega obdobja 1981-2010. Količinsko stanje podzemne vode je v ocenjevalnem obdobju v vseh plitvih vodonosnikih 21 vodnih teles podzemne vode Slovenije ocenjeno s skupno oceno kot dobro, s srednjo do visoko stopnjo zaupanja. Metodologija ocenjevanja količinskega stanja podzemnih voda je razširjena z upoštevanjem procesov celotnega hidrološkega cikla in rezultatov modeliranja napajanja vodonosnikov oz. količinskega obnavljanja podzemne vode v Sloveniji. Uporabljen je koncept trajnostne rabe podzemne vode z zahtevo po dolgoročnem ohranjanju količin brez povzročanja nesprejemljivih okoljskih in drugih posledic. Zakonodajna izhodišča za ocenjevanje vplivov odzemanja podzemne vode na obnovljive in razpoložljive količine podzemne vode uvajajo novo metodologijo, ter opuščajo zastareli rudarski koncept »računanja zalog podzemne vode«.

Abstract

The improved methodological approach of the groundwater quantitative status assessment in Slovenia and the results of the assessment period 2010-2013, taking into account the new reference thirty-year period 1981-2010, are presented. Within the assessment period quantitative status in all shallow alluvial aquifers of 21 groundwater bodies in Slovenia is assessed as good, with a medium to high level of confidence. Groundwater quantitative status assessment methodology considers the processes of the whole hydrological cycle and the results of groundwater recharge modelling. The methodology incorporates the concept of sustainable groundwater use to preserve the quantities not causing environmental and other harm (unacceptable environmental and other consequences). Legislative baseline for assessing the impacts of groundwater abstraction on renewable and available quantities of groundwater introduces new methodology by abandoning obsolete mining concept of "calculation of groundwater reserves".

Uvod

Podzemno vodo so v preteklem stoletju pogosto obravnavali in količinsko ocenjevali na način, kot so ocenjevali zaloge mineralnih surovin. Strokovne kritike takega pristopa so znane že iz prve polovice 20. stoletja (LEE, 1915; SAVARENSKY, 1933), ko je znameniti ruski akademik A. P. Karpinsky že leta 1931 zapisal: »Podzemna voda ni le mineral-

na surovina...«. Tovrstne kritike so se z različnimi predlogi dopolnitev tega pristopa nadaljevale tudi v drugi polovici preteklega stoletja (KARANTH, 1987; ZEKTSER, 2000). Kljub temu se je »rudarski pristop« računanja zalog podzemne vode v nekaterih državah srednje in južne Evrope in v republikah nekdanje Sovjetske zveze zelo uveljavil in kasneje prešel celo v zakonodajne dokumente.

Tudi v Sloveniji so količine podzemne vode v prejšnjem stoletju ocenjevali po principih klasifikacije in kategorizacije zalog mineralnih surovin. Enoten način ugotavljanja, evidentiranja in zbiranja podatkov o »rezervah rudnin in talnih voda« je bil zasnovan na nekdanjem Zveznem geološkem zavodu v Beogradu in predpisan z zakonom (URADNI LIST SFRJ, 1977) in pravilnikom takratne zvezne države (URADNI LIST SFRJ, 1979). Zakonska razširitev koncepta klasifikacije in kategorizacije rudnih zalog na področje ocenjevanja količin podzemnih voda se je odrazila tudi terminološko: za vodonosnik so uporabljali izraz »nahajališče«, količine podzemne vode pa so opisovali kot »rezerve talne vode«. Količine podzemne vode so glede na stopnjo raziskanosti razvrščali v bilančne kategorije A, B in C1 ter v potencialne kategorije C2, D1 in D2. Pri tem pa je bila »bilančnost« povezana z ekonomsko oceno rentabilnosti eksploatacije, »potencialnost« pa naj bi usmerjala nadaljnje temeljne raziskave. Po tej metodologiji so bile količine podzemne vode v Sloveniji »klasificirane in kategorizirane« vse do leta 1995, ko je takratni Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko izdelal zadnjo tovrstno oceno zalog podzemne vode (KRANJC KUŠLAN, 1995).

Konceptualno spremembo na področju ocenjevanja vodnih virov je z zahtevo po trajnostni rabi naravnih virov prineslo t.i. Brundtlandino poročilo Svetovne komisije za okolje in razvoj (WCED, 1987). Koncept trajnostne rabe podzemne vode z zahtevo po dolgoročnem ohranjanju količin brez povzročanja nesprejemljivih okoljskih in drugih posledic je vgrajen tudi v okvirno direktivo o vodah (EU, 2000). Na prehodu v novo tisočletje je okvirna direktiva o vodah postavila nova zakonodajna izhodišča za ocenjevanje količinskega stanja podzemnih voda oz. za ocenjevanje vplivov odzemanja podzemne vode na njene razpoložljive količine, ki so opredeljene kot razlika med napajanjem vodonosnikov in količino podzemne vode za ohranjanje ekološkega stanja površinskih voda in kopenskih ekosistemov (URADNI LIST RS, 2003; 2005; 2009a; 2009b, 2016).

Prvi poskus delne ocene količinskega stanja podzemnih voda v Sloveniji, ki je sledil zahtevam nove okvirne direktive o vodah, je bil leta 2006 izveden na Agenciji RS za okolje (ARSO) s podatki državnega hidrološkega monitoringa površinskih in podzemnih voda desetletnega obdobja ob koncu preteklega stoletja (ANDJELOV et al., 2006; 2008), ter kasneje razširjen z upoštevanjem

procesov celotnega hidrološkega cikla in rezultatov modeliranja napajanja vodonosnikov oz. količinskega obnavljanja podzemne vode v Sloveniji (ANDJELOV, 2009; UHAN, 2010). Upoštevanje principa hidrološkega cikla in začetek uporabe regionalnega vodno-bilančnega modela je pomemben mejnik na področju ocenjevanja količin podzemnih voda v Sloveniji (UHAN, 2015). Pričujoči članek predstavlja metodološki razvoj in rezultate ocene količinskega stanja podzemne vode v Sloveniji glede na referenčno tridesetletno obdobje 1981-2010.

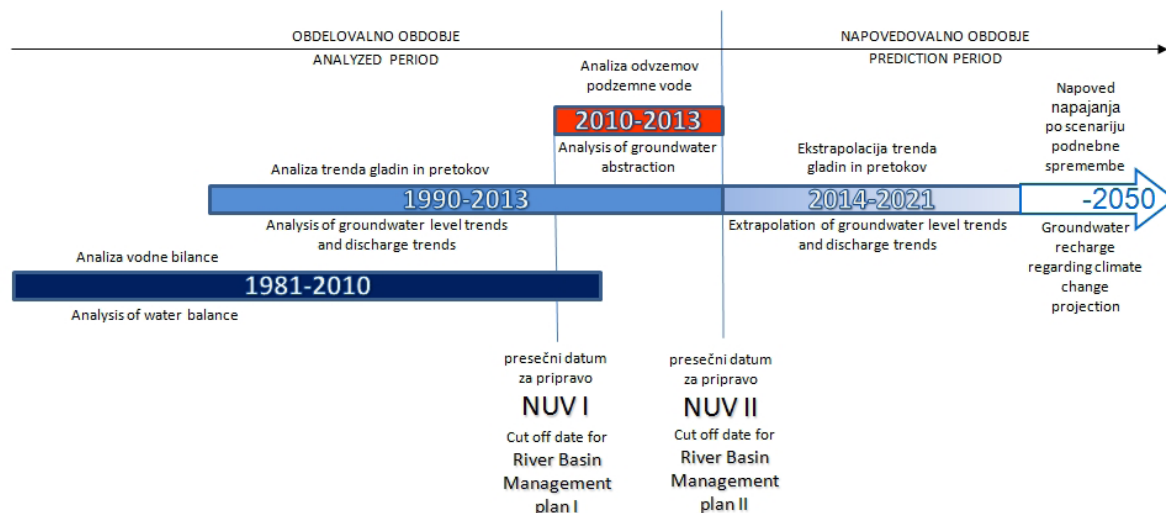
Metodologija ocenjevanja količinskega stanja podzemnih voda

Okvirna direktiva o vodah (OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2000) je uvedla splošna načela ocenjevanja količinskega stanja podzemnih voda, ki temeljijo na uravnoteženosti med količinskim obnavljanjem, potrebami ekosistemov po vodi in odvzemanjem vode. Evropska komisija je ta splošna načela postopno dopolnjevala s smernicami in ostalimi dokumenti skupne strategije implementacije okvirne direktive o vodah. V teh dokumentih so bili predlagani splošni metodološki pristopi. Z metodološkimi smernicami o monitoringu in ocenjevanju stanja podzemne vode (EUROPEAN COMMISSION, 2007; 2009) je bil uveden splošni večparametrski koncept štirih razvrstitvenih preizkusov, ki naj bi ga države članice Evropske unije z dopustnimi prilagoditvami posebnim razmeram uporabile za nacionalno oceno količinskega stanja podzemnih voda z vodno-bilančnim referenčnim obdobjem 1981-2010 (sl. 1).

Vpliv na napajanje vodonosnikov

Vpliv odzemanja podzemne vode na napajanje vodonosnikov se ocenjuje preko analize gladin podzemne vode in pretokov izvirov ter preko vodne bilance, ki je izhodišče za oceno obnovljivih in razpoložljivih količin podzemne vode.

Trendi časovnih vrst letnih povprečij gladin podzemnih voda ter malih letnih in malih mesečnih pretokov izvirov (HÖLLER, 2004) so bili ocenjeni s statističnimi neparametričnimi metodami. Prisotnost trenda, sprememb in naključnosti v časovnih vrstah referenčnega obdobja 1990-2013 je bila ocenjena s standardnimi statističnimi preizkusi za časovne vrste hidroloških podatkov (CHIEW & SIRIWARDENA, 2005), s poudarkom na Spearmanovem koeficientu korelacije rangov in



Sl. 1. Časovni okvir ocenjevanja količinskega stanja podzemnih voda za pripravo Načrta upravljanja voda (NUV II) 2015-2021. Fig. 1. Time frame of groundwater quantitative status assessment for the River basin management plan II (2015-2021).

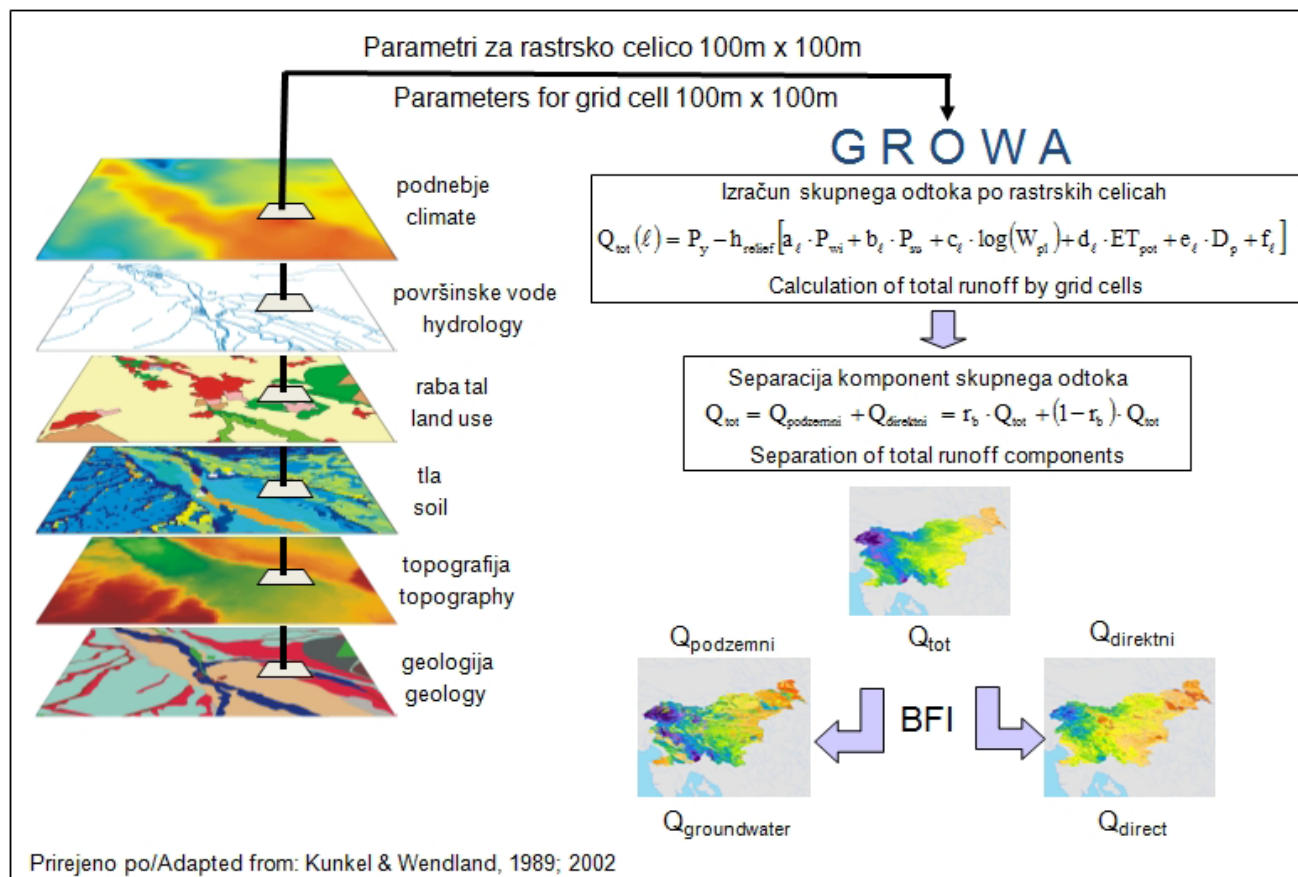
Mann-Kendallovem neparametričnem preizkusu (GRAYSON et al., 1996; KUNDZEWICZ & ROBSON, 2000). V primeru statistično značilnih upadajočih trendov gladin pa je bila za oceno naklona linearnega trenda in ekstrapolacijo do konca načrtovalskega obdobja uporabljena Theil-Senova cenilka naklona trendne premice (GILBERT, 1987) oz. primerjava s Q_{95} (HARUM et al., 2001; JANŽA et al., 2014) in dodatni Kendallov preizkus konsistenčnosti regionalnega trenda (HELSEL et al., 2006). Analiza trenda se zaključi z zaporedjem preizkusov z ugotavljanjem deleža merilnih mest z zniževanjem gladin in pretokov v obdelovalnem in napovedovalnem obdobju, ki naj bi na posameznih vodnih telesih ne presegal 25 % (HÖLLER, 2004).

Obnovljive količine podzemne vode v plitvih vodonosnikih Slovenije smo za tridesetletno vodno-bilančno obdobje 1981-2010 ocenili z regionalnim modelom napajanja vodonosnikov GROWA-SI (ANDJELOV et al., 2013; 2014; 2015; 2016). Model GROWA-SI je rezultat razvoja in prilagoditve osnovnega modelskega sistema GROWA (KUNKEL & WENDLAND, 1998; 2002) za slovenski prostor in upošteva podnebne pogoje, vrsto tal, rabo prostora, topografijo in hidrogeološke lastnosti kamnin in tal (sl. 2).

Model izračuna skupni odtok tako, da iz vhodnih podatkov izračuna dejansko (realno) evapotranspiracijo, ki jo za vsako računsko celico $100\text{m} \times 100\text{m}$ odšteje od obdobjnih padavin. Skupni odtok se preko indeksa baznega odtoka (BFI – Base Flow Index) razdeli na površinski in podzemni odtok. Model je bil umerjen in vrednoten

s podatki državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda za obdobje 1971-2000 (ANDJELOV et al., 2016). Verifikacija modela je bila opravljena kvantitativno s primerjavo rezultatov neodvisne po drugi metodi določene vodne bilance za isto obdobje (BAT et al., 2008), ter kvalitativno s primerjavo kart indeksa razvitosti rečne mreže (IDPR – Indice de persistance et développement des réseaux) (MARDHEL et al., 2004; ANDJELOV et al., 2016). Modelske rezultati napajanja vodonosnikov oz. količinskega obnavljanja podzemne vode so izhodišče ocene razpoložljive količine podzemne vode.

Razpoložljiva količina podzemne vode je po definiciji iz okvirne direktive o vodah opredeljena z dolgoročno povprečno letno stopnjo količinskega obnavljanja podzemne vode, zmanjšano za dolgoročno količino, ki je potrebna za ohranjanje ekološkega stanja površinskih voda in kopenskih ekosistemov, ki so z njim povezani (OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2000). Za oceno pretoka, ki je potreben za ohranjanje dobrega ekološkega stanja površinskih voda na letni ravni smo uporabili nemški vodnobilančni pristop s scenarijem petih sušnih let v zadnjem tridesetletnem obdobju (SCHLÜTER, 2006). Po omenjenem pristopu se lahko taka ocena izpelje iz dvajsetega centila (P20) količine napajanja vodonosnikov v referenčnem tridesetletnem vodnobilančnem obdobju, kar predpostavlja mejo slabih habitatnih rečnih pogojev, ki jo pogosto umeščajo v razpon med 10 in 30 % povprečnega letnega pretoka (TENNANT, 1976). Količino obnovljive podzemne vode, potrebne za ohranjanje ekološkega stanja površinskih voda, predstavlja raz-



Sl. 2. Shema izračuna komponent vodne bilance z regionalnim modelom GROWA-SI (povzeto po KUNKEL & WENDLAND, 1998, 2002).
Fig. 2. Flow chart for water balance calculation with GROWA-SI regional model (adapted from KUNKEL & WENDLAND, 1998, 2002).

lika med izračuni povprečne obnovljive količine podzemne vode obdobja 1981-2010 (GROWA-SI (30)) in povprečne obnovljive količine petih najbolj sušnih let referenčnega obdobja (GROWA-SI (05)) (SCHLÜTER, 2006) (sl. 3). Količino podzemne vode, potrebne za ohranjanje kopenskih ekosistemov na območjih gozdnih habitatov (EKO_{gozd}) predstavlja ocena količine podzemne vode, ki nadomešča primanjkljaj padavin, na kraških območjih pa je količina podzemne vode, potrebna za ohranjanje habitatov dvoživk in mehkužcev (EKO_{kras}), ocenjena preko deleža podzemne vode v ekološko sprejemljivih pretokih (JANŽA et al., 2014; MIKULIČ et al., 2015; JANŽA et al., 2016).

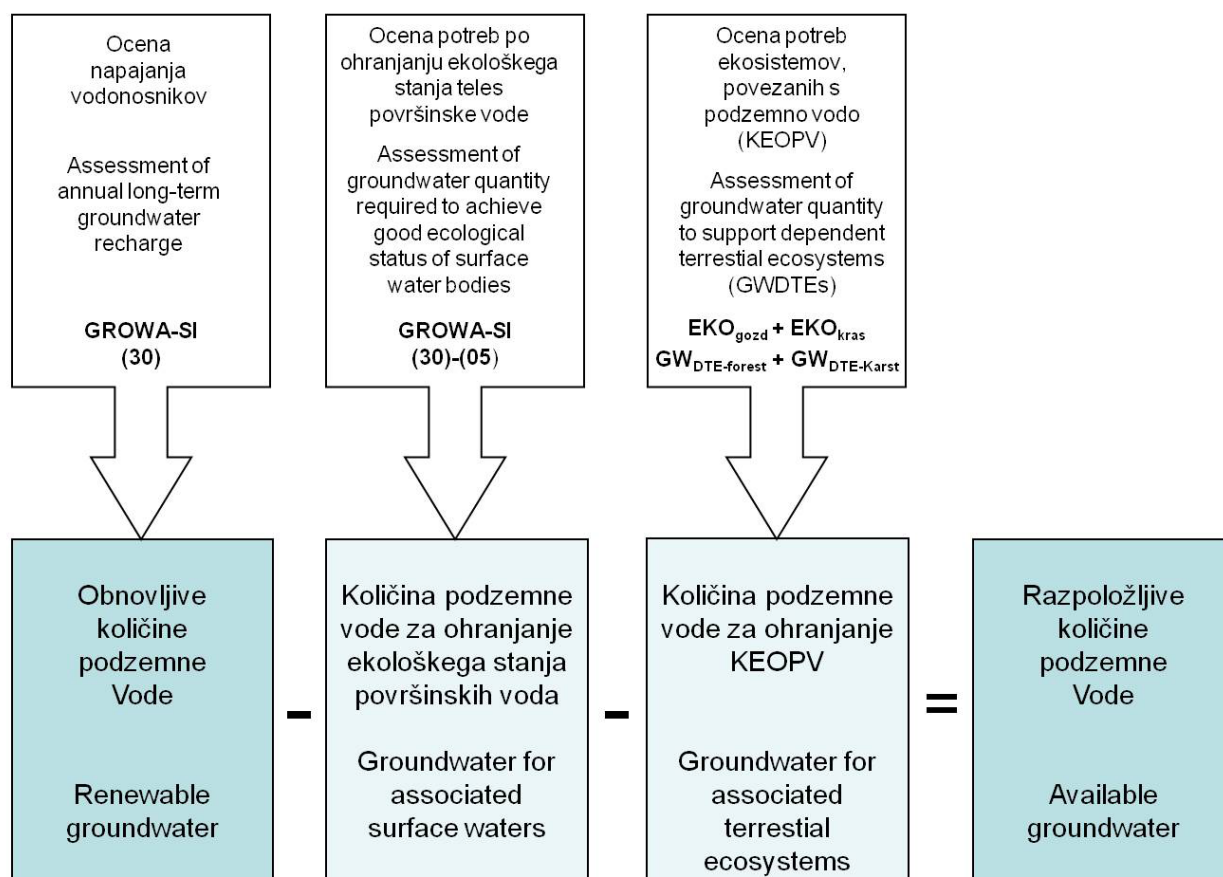
Vpliv na ekološko stanje površinskih voda

Vpliv odvzemov podzemne vode na stanje površinskih voda se preizkuša z analizo vpliva črpanja podzemne vode na vodna telesa površinske vode, v katerih je bilo ugotovljeno slabo ekološko stanje. Postopek preizkusa vpliva črpanja je na teh telesih s slabim ekološkim stanjem dvostopenjski. Na prvi stopnji primerjamo skupno količino odvzemov površinskih in podzemnih voda z vrednostjo srednjega pretoka Q_s vodozbirnega

zaledja vodnega telesa površinske vode s slabim ekološkim stanjem. Vrednost praga je presežena, če je vseh odvzemov več kot 10 % Q_s , vpliv pa pripišemo odvzemu podzemne vode le, če ti prevladujejo nad odvzemi površinske vode (EUROPEAN COMMISSION, 2009; EEA, 2012). Z drugim pogojem primerjamo količine odvzete podzemne vode s količinami povprečnega obnavljanja podzemne vode, vrednost praga pa je 10 % obdobjne obnovljive količine (NIEA, 2009).

Vpliv na stanje kopenskih ekosistemov, odvisnih od podzemne vode

Vpliv odzemanja podzemne vode na stanje kopenskih ekosistemov, ki so odvisni od podzemne vode, se preverja le na območjih, na katerih ekološki kazalci poškodovanosti nakazujejo tveganje. Najbolj ogroženi deli kopenskih ekosistemov so gozdni habitati, za katere je bilo ugotovljeno, da je njihov obstoj povezan s podzemno vodo (PUN 2000, 2014; MEZGA et al., 2014). Preizkus temelji na bilančni primerjavi obnovljive količine podzemne vode referenčnega obdobja 1981-2010 s količinami odvzemov podzemne vode znotraj gozdnega habitata in njegovega hidrolo-



Sl. 3. Shema izračuna razpoložljive količine podzemne vode.

Fig. 3. Available groundwater calculation flowchart.

škega prispevnega območja. Za dobro količinsko stanje vodnega telesa podzemne vode privzemamo kot zgornjo mejo 5 % odvzemov obdobje obnovljive količine podzemne vode, kar glede na analizo pritiskov predstavlja še zanemarljiv vpliv na kopenski ekosistem, odvisen od podzemne vode (WFD IRELAND, 2005).

Vpliv na vdore slane vode ali druge vrste vdorov

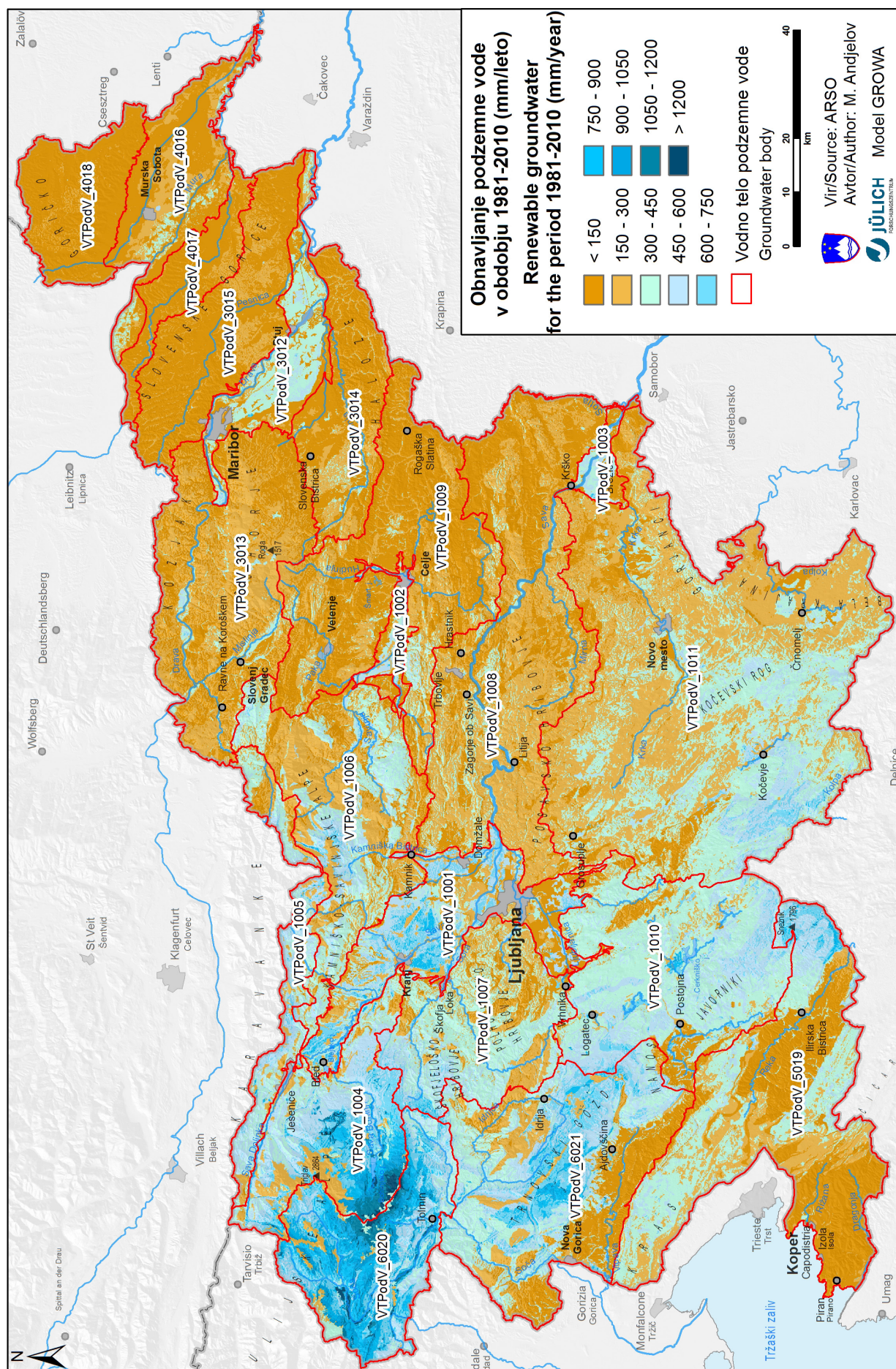
Preizkus vpliva črpanja podzemne vode na vdore slane vode v vodno telo temelji na štiristopenjski shemi preverjanja, zasnovani na metodoloških izhodiščih irske agencije za varstvo okolja (CRAIG & DALY, 2010). Na prvi stopnji primerjamo letno količino odvzema podzemne vode s srednjo dolgoletno obnovljivo količino podzemne vode vodonosnega sistema, ocenjeno z vodno-bilančnim modelom GROWA-SI. Dolgoletno povprečje vrednosti specifične električne prevodnosti vode v vodonosnem sistemu se na drugi stopnji primerja z mejno vrednostjo tega parametra za pitno vodo, na tretji stopnji pa z naravnim ozadjem tega parametra v vodnih telesih s prevladujočo kraško

in razpoklinsko poroznostjo. Na četrti stopnji pa preverjamo statistično značilnost trenda naraščanja indikativnih parametrov vdorov slane vode: natrija, kloridov in specifične električne prevodnosti.

Rezultati ocenjevanja količinskega stanja

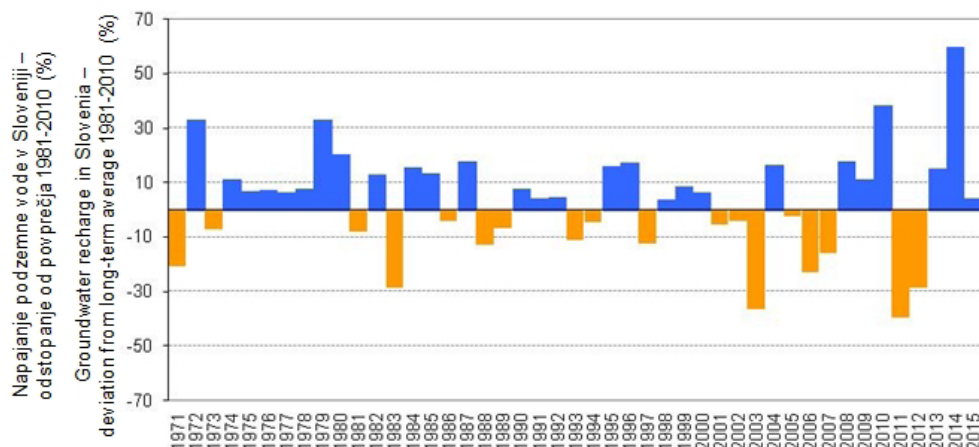
V procesu ocenjevanja količinskega stanja podzemnih voda se regionalno zasleduje razmerje med količinskim obnavljanjem podzemne vode in njenim odvzemanjem iz vodonosnikov, pri tem pa lokalno preverja vplive odvzemov na gladine in pretoke. Oceno količin obnovljive podzemne vode omogoča regionalni vodno-bilančni model GROWA-SI (ANDJELOV et al., 2016), ki podaja količino napajanja vodonosnikov za referenčna obdobja (sl. 4) in posamezna hidrološka leta.

V referenčnem vodno-bilančnem obdobju 1981-2010 je bilo povprečno skupno napajanje vseh 21-tih vodnih teles v Sloveniji 185,5 m³/s, kar je za 9,64 m³/s manj kot v predhodnem 30-letnem obdobju 1971-2000 (ANDJELOV et al., 2013). Razlika v količinskem obnavljanju podzemne vode med zadnjima dvema referenčnima bilančnima



Sl. 4. Obnovljive količine podzemne vode v plitvih vodonosnikih vodnih teles podzemnih voda (VTPodV) v obdobju 1981-2010.

Fig. 4. Renewable groundwater in shallow aquifers of groundwater bodies for the period 1981-2010.



Sl. 5. Odstopanje napajanja podzemne vode od povprečja referenčnega obdobja 1981–2010.

Fig. 5. Groundwater recharge - deviation from long-term average 1981–2010

obdobjema za dvakrat presega povprečno količino letno odvzete podzemne vode, spremenljivost obnovljivih količin podzemne vode pa je med posameznimi hidrološkimi leti od 1971 do 2015 glede na povprečje obdobja med 1981–2010 v razponu od -40 % (2011) do +60 % (2014) (sl. 5).

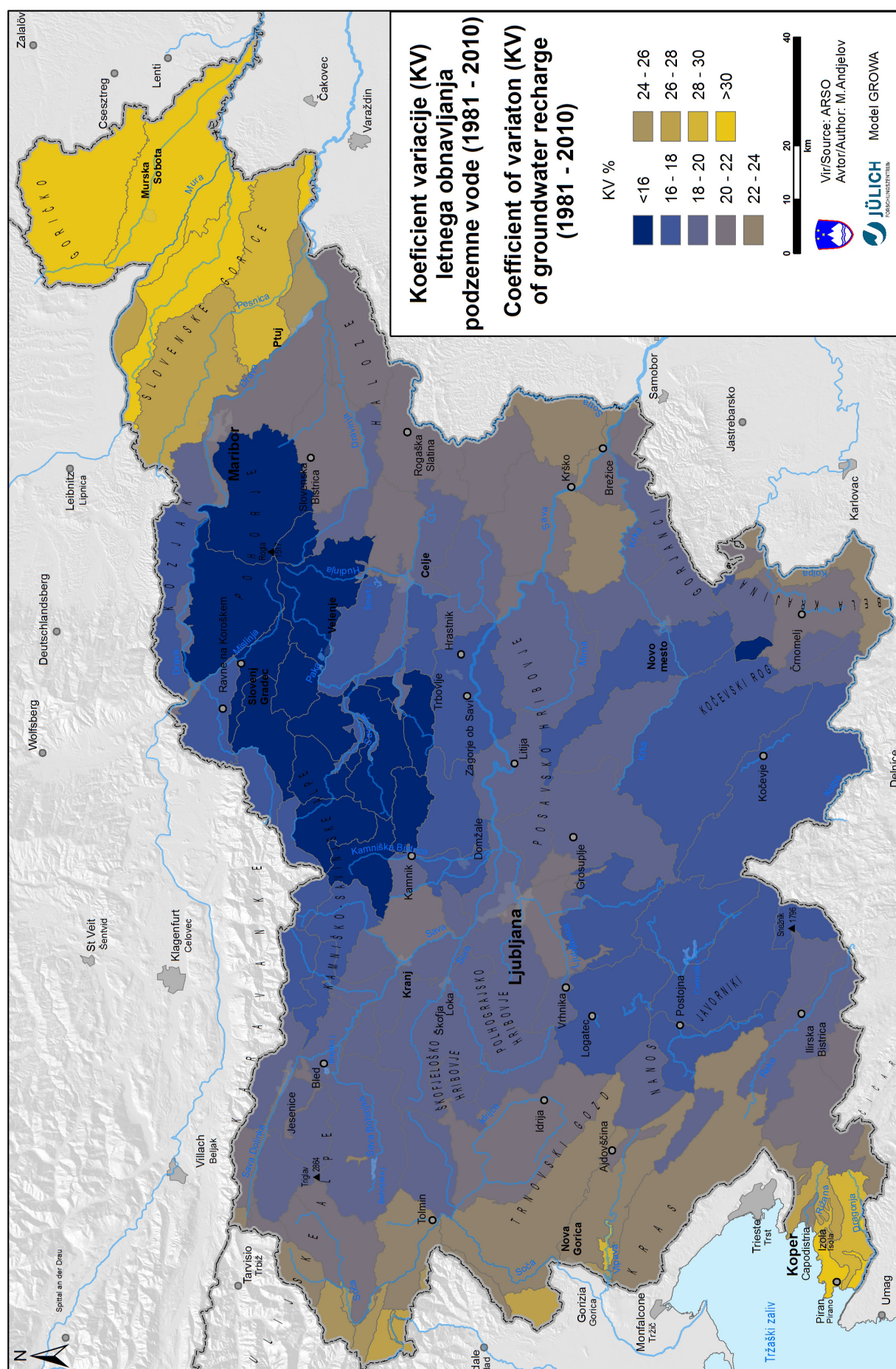
Obnavljanje podzemne vode se zaradi različnih klimatskih pogojev, geološke zgradbe, vrste tal, rabe prostora, morfologije in hidrogeologije po posameznih vodonosnih sistemih tudi prostorsko zelo spreminja. Koeficient variacije (KV), ki nakazuje velikost odstopanja od povprečja 1981–2010, je v razponu od 14,2 % na območju Kamniško-Savinjskih Alp in Pohorja do 38,1 % na Goriškem. Na podlagi velikosti odstopanj letnega napajanja vodonosnih sistemov od povprečja obdobja 1981–2010 lahko sklepamo na relativno količinsko občutljivost posameznih vodnih teles podzemne vode oz. vodonosnih sistemov. Velika letna spremenljivost količin obnavljanja podzemnih voda in s tem tudi večja količinska občutljivost podzemnih vodnih virov se kaže predvsem v vzhodnih subpanonskih predelih in na zahodu Primorske s Slovensko Istro, kjer je koeficient variacije visok (sl. 6).

Velika prostorska spremenljivost napajanja vodonosnikov se kaže tudi med posameznimi vodnimi telesi. Največje količine obnovljive podzemne vode so bile v obdobju 1981–2010 ocenjene v vodnih telesih s prevladujočo kraško poroznostjo ($127,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Druge največje količine so bile v tem obdobju ocenjene v telesih s prevladujočo razpoklinsko poroznostjo ($33,9 \text{ m}^3/\text{s}$), sledile pa so količine v vodnih telesih s prevladujočo medzrnsko poroznostjo ($17,7 \text{ m}^3/\text{s}$), najmanjše količine pa so bile ocenjene v telesih z mešano poroznostjo ($6,4 \text{ m}^3/\text{s}$). Povprečno specifično napajanje teles podzemne vode, obnavljanje količin podzemne

vode v enoti časa in na enoto površine, je bilo v obdobju 1981–2010 ocenjeno za celotno ozemlje Slovenije na $9,2 \text{ l/s/km}^2$. Razlike v specifičnem napajanju teles podzemne vode so bile v razponu od $1,8$ do $22,9 \text{ l/s/km}^2$ (tabela 1).

Stopnjo porabe razpoložljive količine podzemne vode podaja razmerje med črpano količino podzemne vode in količino napajanja vodonosnikov, zmanjšano za količino vode za ohranjanje dobrega ekološkega stanja površinskih voda in kopenskih ekosistemov, odvisnih od podzemnih voda. Delež povprečnih letnih črpanih količin podzemne vode po ARSO evidenci vodnih povračil za obdobje 2010–2013 je bil glede na rezultate modela napajanja vodonosnikov GROWA-SI za obdobje 1981–2010 največji na območjih aluvialnih vodnih teles VTPodV_3012 Dravska kotlina in VTPodV_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje (sl. 7), kjer so presegli mejno vrednost 20 %, ki jo EEA uporablja kot začetno opozorilo količinskega pritiska na vodne vire (EEA, 2005). Delež odvzemov pa nikjer ni večji od 65 %, kar so kot mejno vrednost količinskega pritiska predlagali v evropskem projektu GENESIS (PREDA et al., 2014). Črpanje vode iz plitvih vodonosnikov na območju Slovenije v skupni povprečni letni količini $132,8$ milijonov m^3 predstavlja 3,1 % skupne razpoložljive količine podzemne vode (tabela 2).

Kljub ugodni vodni bilanci pa trendi časovnih vrst letnih povprečij gladin podzemnih voda v plitvih aluvialnih vodonosnikih izpostavljajo nekatere statistično značilne upadajoče trende letnih povprečij gladin podzemnih voda obdelovalnega obdobja 1990–2013, vendar delež merilnih mest z zniževanjem gladin podzemne vode v obdobju do leta 2021 nikjer ne presega praga 25 % vseh merilnih mest v vodnem telesu (URADNI



Sl. 4. Napajanje plitvih vodonosnikov vodnih teles podzemnih voda v obdobju 1981-2010.

Fig. 4. Groundwater recharge in Slovenia for the period 1981-2010.

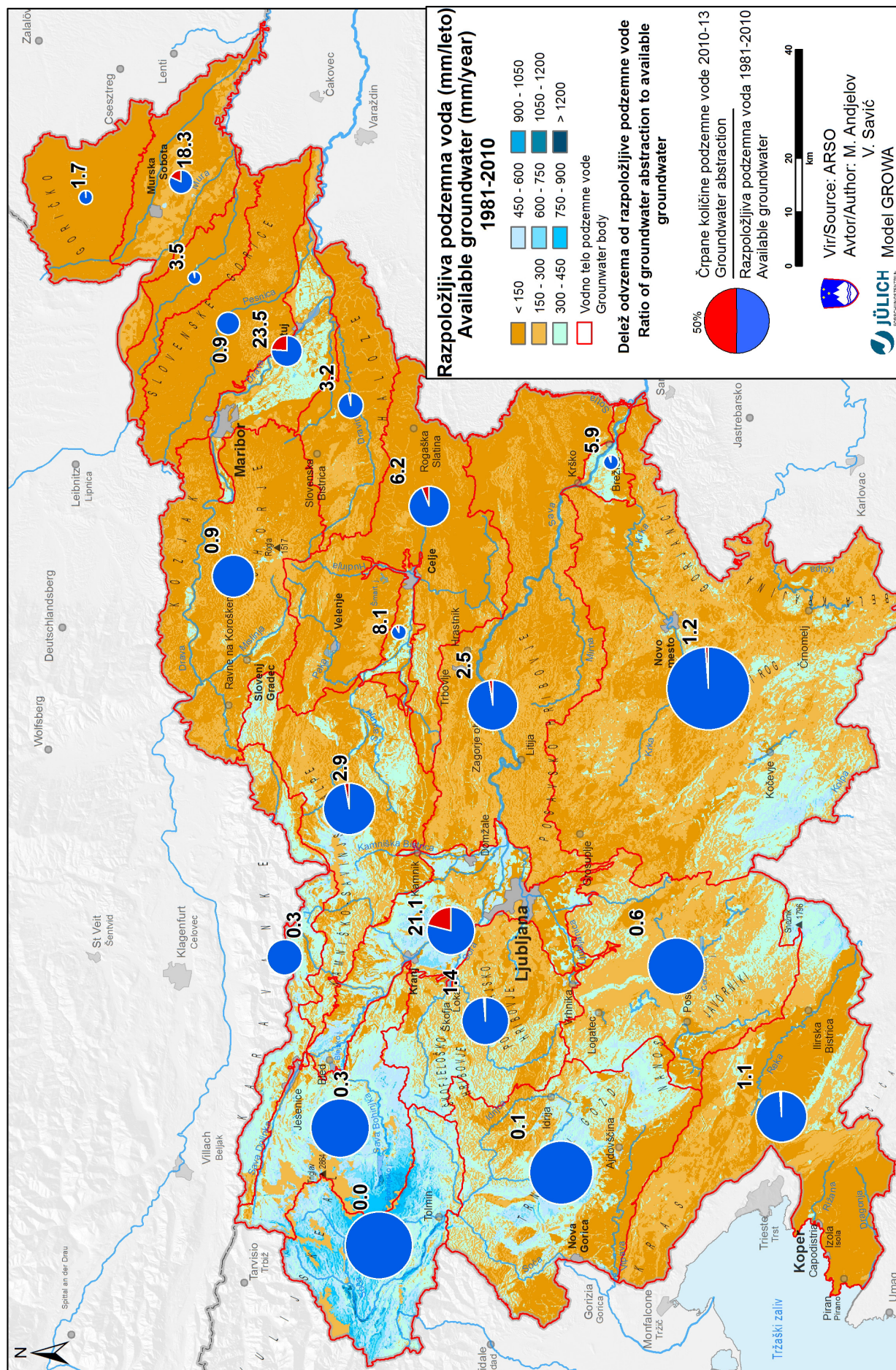
Tabela 1. Obnovljive količine podzemne vode v plitvih vodonosnikih vodnih teles podzemnih voda v obdobju 1981-2010.
Table 1. Renewable groundwater in shallow aquifers of groundwater bodies for the period 1981-2010.

Vodno telo podzemne vode	Prevladujoči tip poroznosti	Površina vodnega telesa podzemne vode	Obnovljiva podzemna voda 1981-2010 po modelu GROWA-SI		Specifično napajanje
Groundwater body	Main type of porosity	Area of groundwater body	Renewable groundwater 1981-2010 by model GROWA-SI		Specific groundwater recharge
		km ²	mm	m ³ /s	l/s/km ²
VTPodV_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje	medzrnska/intergranular	774	393	9,65	12,47
VTPodV_1002 Savinjska kotlina	medzrnska/intergranular	109	268	0,93	8,49
VTPodV_1003 Krška kotlina	medzrnska/intergranular	97	308	0,94	9,78
VTPodV_1004 Julijske Alpe v porečju Save	kraška/karst	783	573	14,22	18,16
VTPodV_1005 Karavanke	kraška/karst	404	393	5,01	12,45
VTPodV_1006 Kamniško-Savinjske Alpe	kraška/karst	1.112	302	10,64	9,57
VTPodV_1007 Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje	razpoklinska/fissured	850	346	9,33	10,98
VTPodV_1008 Posavsko hribovje do osrednje Sotle	razpoklinska/fissured	1.792	191	10,83	6,06
VTPodV_1009 Spodnji del Savinje do Sotle	razpoklinska/fissured	1.397	155	6,86	4,91
VTPodV_1010 Kraška Ljubljana	kraška/karst	1.307	403	16,68	12,77
VTPodV_1011 Dolenjski kras	kraška/karst	3.355	293	31,13	9,30
VTPodV_3012 Dravska kotlina	medzrnska/intergranular	429	266	3,61	8,44
VTPodV_3013 Vzhodne Alpe	razpoklinska/fissured	1.269	171	6,89	5,43
VTPodV_3014 Haloze in Dravinjske gorice	mešana/mixed	597	135	2,54	4,27
VTPodV_3015 Zahodne Slovenske gorice	mešana/mixed	756	93	2,23	2,95
VTPodV_4016 Murska kotlina	medzrnska/intergranular	591	135	2,53	4,29
VTPodV_4017 Vzhodne Slovenske gorice	mešana/mixed	308	78	0,76	2,48
VTPodV_4018 Goričko	mešana/mixed	494	57	0,89	1,80
VTPodV_5019 Obala in Kras z Brkini	kraška/karst	1.589	259	13,00	8,21
VTPodV_6020 Julijske Alpe v porečju Soče	kraška/karst	818	723	18,72	22,92
VTPodV_6021 Goriška brda in Trnovsko-Banjška planota	kraška/karst	1.443	396	18,13	12,56
Slovenija			289	185,54	9,17

LIST RS, 2016). Tudi analiza trenda pretokov iz virov obdelovalnega obdobja 1990-2013 izkazuje nekatere statistično značilne trende zmanjševanja malih letnih pretokov, predvsem na merilnih mestih 8560 Vipava – Vipava in 5030 Ljubljana – Vrhnika II, vendar mali letni pretoki po statističnih ocenah do konca leta 2021 ne bodo dosegli vrednosti praga 95 % pretoka iz krivulje trajanja (Q95).

V nekaterih globokih termalnih vodonosnikih pa je za obdobje po letu 2021 ocenjeno tveganje

za nedoseganje dobrega količinskega stanja. Za piezometrične gladine termalne podzemne vode so na podlagi posameznih indikativnih meritev Geološkega zavoda Slovenije (RMAN, 2014) ugotovljeni značilni trendi zniževanja glavin predvsem v Petanjcih in Dobrovniku, kar kljub dosedanjim pozitivnim vodnobilančnim ocenam tega vodonosnega območja predstavlja tveganje, čeprav količinsko stanje pri sedanjí stopnji odvzemanja termalne vode iz slovenskega in iz madžarskega dela območja Mura-Zala ni ogroženo (NADOR et al., 2012).



SL 7. Razmerje med črpanimi količinami podzemne vode (2010-2013) in razpoložljivo količino podzemne vode (1981-2010).

Fig. 7. Ratio of groundwater abstraction (2010-2013) to available groundwater (1981-2010) by groundwater bodies, together with available groundwater (GROWA-SI).

Tabela 2. Razmerje med črpanimi količinami podzemne vode (2010-2013) in razpoložljivo količino podzemne vode (1981-2010) v plitvih vodonosnikih vodnih teles podzemnih voda.

Table 2. Ratio of groundwater abstraction (2010-2013) to available groundwater (1981-2010) in shallow aquifers of groundwater bodies.

Vodno telo podzemne vode	Razpoložljiva količina podzemne vode v obdobju 1981-2010 (m ³ /leto)	Črpane količine podzemne vode v obdobju 2010-2013 (m ³ /leto)	Črpane količine podzemne vode / razpoložljiva količina podzemne vode (%)
Groundwater body	Available groundwater for the period 1981-2010 (m ³ /year)	Groundwater abstraction for the period 2010-2013 (m ³ /year)	Groundwater abstraction / available groundwater (%)
VTPodV_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje	231.557.580	48.947.603	21,1
VTPodV_1002 Savinjska kotlina	21.450.110	1.729.066	8,1
VTPodV_1003 Krška kotlina	22.445.800	1.315.791	5,9
VTPodV_1004 Julijske Alpe v porečju Save	348.748.200	1.121.098	0,3
VTPodV_1005 Karavanke	127.207.480	365.544	0,3
VTPodV_1006 Kamniško-Savinjske Alpe	269.382.000	7.686.770	2,9
VTPodV_1007 Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje	224.196.000	3.179.119	1,4
VTPodV_1008 Posavsko hribovje do osrednje Sotle	253.209.600	6.293.773	2,5
VTPodV_1009 Spodnji del Savinje do Sotle	165.823.900	10.234.665	6,2
VTPodV_1010 Kraška Ljubljana	322.946.630	1.975.516	0,6
VTPodV_1011 Dolenjski kras	694.585.650	8.591.867	1,2
VTPodV_3012 Dravska kotlina	91.093.860	22.702.982	23,5
VTPodV_3013 Vzhodne Alpe	181.340.100	1.653.376	0,9
VTPodV_3014 Haloze in Dravinjske gorice	63.873.030	2.050.415	3,2
VTPodV_3015 Zahodne Slovenske gorice	52.791.480	451.235	0,9
VTPodV_4016 Murska kotlina	55.110.750	10.059.617	18,3
VTPodV_4017 Vzhodne Slovenske gorice	17.143.280	607.800	3,5
VTPodV_4018 Goričko	19.399.380	326.093	1,7
VTPodV_5019 Obala in Kras z Brkini	260.818.460	2.975.258	1,1
VTPodV_6020 Julijske Alpe v porečju Soče	454.178.140	111.003	0,0
VTPodV_6021 Goriška brda in Trnovsko-Banjška planota	407.618.640	436.505	0,1
Slovenija	4.284.920.070	132.815.096	3,1

Pri preizkusu vpliva odvzemov podzemne vode na ekološko stanje površinskih voda sta bili izpostavljeni telesi površinskih voda VT Temenica I in VT Cerknica, vendar ekološkega stanja površinskih voda ne poslabšujejo odvzemi podzemne vode, saj so v vseh primerih deleži odvzemov od povprečja površinskega in podzemnega odtoka pod vrednostjo 5 %.

Pri preizkusu vpliva odvzemov podzemne vode na stanje kopenskih ekosistemov, ki so povezani s podzemno vodo, so bili izpostavljeni ekosistemi Krakovski gozd (VTPodV_1011

Dolenjski Kras), Mura 1 (VTPodV_4016 Murska kotlina) in Boreci (VTPodV_4017 Vzhodne Slovenske gorice). Na teh območjih deleži odvzemov podzemne vode ne presegajo praga 5 % obdobjne obnovljive količine podzemne vode, kar glede na analizo pritiskov predstavlja še zanemarljiv vpliv na kopenski ekosistem, odvisen od podzemne vode.

V vodonosnem sistemu 50621 Brestovica - Timava vodnega telesa VTPodV_5019 Obala in Kras z Brkini, ki je edini v stiku z morskimi vodami, je bil opravljen tudi preizkus vpliva črpanja

podzemne vode na vdore slane vode. Na vodnem viru Brestovica - Klariči je bilo zaznано presežanje povprečne vrednosti naravnega ozadja specifične električne prevodnosti, vendar ni bila dosežena vrednost zgornje meje razpona dvojnega standardnega odklona. Vrednosti indikativnih parametrov specifične električne prevodnosti, kloridov in natrija pa za obdobja 2008-2013 ne nakazujejo značilnega naraščajočega trenda. Tudi ob poskusnem črpanju povečanih količin (URBANC et al., 2012) niso zaznali bistvenega vpliva črpanja na kakovost podzemne vode.

Razprava in zaključki

Količinsko stanje podzemnih voda v plitvih vodonosnikih je na podlagi povprečnih letnih regionalnih vodnih bilanc v vseh enaindvajsetih telesih podzemne vode Slovenije za Načrt upravljanja voda 2015-2021 opredeljeno kot dobro. Izpostavljena je bila velika prostorska in časovna spremenljivost razpoložljive podzemne vode. Največje količine razpoložljive podzemne vode so ugotovljene na območjih Alp, najmanjše pa v severovzhodni Sloveniji. Velika spremenljivost pa je ugotovljena tudi med hidrološkimi leti. Ti spremenljivosti, kot tudi spremenljivost v velikosti vodnih teles podzemne vode, predstavljajo velik izziv za celovito upravljanje voda. Največje skupne količine obnovljive podzemne vode so bile v obdobju 1981-2010 ocenjene v vodnih telesih s prevladujočo kraško poroznostjo, nato v telesih s prevladujočo medzrnsko poroznostjo, sledila pa so vodna telesa z razpoklinsko poroznostjo. Največji odvzemi podzemne vode so iz teles z medzrnsko poroznostjo, najmanjši pa iz teles s kraško poroznostjo, ponekod celo pod 1 % razpoložljive količine podzemne vode. V primeru povečevanja količinskih pritiskov na vodnih telesih z medzrnsko poroznostjo bo velik izziv pri upravljanju s podzemnimi vodnimi viri zajem skoraj še neuporabljenih vodnih virov na vodnih telesih s kraško poroznostjo alpskega območja in regionalno povezovanje vodovodnih sistemov (MIKULIČ, 2010).

Količinsko stanje podzemnih voda v globokih vodonosnikih je tudi opredeljeno kot dobro. Ob tem je bila jasno prepoznana velika podatkovna vrzel pri ocenjevanju količinskega stanja podzemnih voda v globokih termalnih vodonosnikih. Posamezne indikativne meritve piezometričnih gladin podzemne vode v količinsko zelo obremenjeni Murski formaciji nakazujejo izrazito zni-

ževanje gladin in nevarnost netrajnostne rabe termalnih podzemnih vodnih virov. Za globoko vodno telo podzemne vode 4016 Murska kotlina in tudi 1003 Krška kotlina se v načrtu upravljanja predvideva, da okoljski cilji brez dopolnilnih ukrepov optimiranja in reinjektiranja odvzemov termalne podzemne vode do začetka naslednjega načrtovalskega obdobja ne bodo doseženi. Ocenjevanje doseganja zastavljenih ciljev pa bo možno šele po vzpostavitvi koncesijsko obvezujočih obratovalnih monitoringov in regionalnega geotermalnega monitoringa na državni ravni, kar bo omogočalo modeliranje količinskega obnavljanja termalne podzemne vode (MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR, 2015).

Poleg podatkovnih vrzeli in negotovosti pri ocenjevanju količin podzemne vode v globokih termalnih vodonosnikih je ostala količinsko neopredeljena tudi časovna in prostorska spremenljivost napajanja znotraj hidroloških let in znotraj vodnih teles. Rezultati letnih vodnih bilanc z ocenami količinskega stanja podzemnih voda in modelskimi vodno-bilančnimi simulacijami po različnih podnebnih scenarijih so sicer dragocena podlaga srednjeročnemu in dolgoročnemu načrtovanju upravljanja voda, vendar lahko prekrijejo pomembno informacijo o sezonski spremenljivosti napajanja vodonosnikov, ki domnevno presega spremenljivost napajanja med hidrološkimi leti (± 40 %) in spremenljivosti napajanja vodonosnikov v prihodnjih desetletjih (± 10 %).

Vpogled v sezonsko spremenljivost napajanja bo omogočilo nadaljnje razvojno sodelovanje Agencije Republike Slovenije za okolje z nemškim raziskovalnim središčem Jülich in vzpostavitev državnega mesečnega vodno-bilančnega modelskega sistema mGROWA-SI (HERRMANN et al., 2013), s katerim bo omogočeno tudi časovno podrobnejše spremljanje in napovedovanje razpoložljivosti vode na celotnem območju Slovenije. Model mGROWA simulira dinamiko vode v tleh in dejansko evapotranspiracijo ter skupni odtok, ki se na podlagi indeksov baznega odtoka deli v direktni odtok in napajanje vodonosnikov na dnevni časovni skali (HERRMANN et al., 2015). Regionalno vodno-bilančno modeliranje v mesečni in dnevni časovni skali bo tako ponudilo nov vpogled v sezonsko spremenljivost in omogočilo novo oceno trajnostne rabe in načrtovanja upravljanja voda v Sloveniji.

Viri in literatura

- ANDJELOV, M., GALE, U., KUKAR, N., TRIŠIĆ, N. & UHAN, J. 2006: Ocena količinskega stanja podzemnih voda v Sloveniji. *Geologija* 49/2: 383-391, [doi:10.5474/geologija.2006.027](https://doi.org/10.5474/geologija.2006.027).
- ANDJELOV, M., GALE, U., SOUVENT, P., TRIŠIĆ, N. & UHAN, J. 2008: Slovenian groundwater quantitative status in the period 1990-2006. EU Groundwater Policy Developments Conference, 13-15 November 2008. Internet: https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/76101/1/actes_colloques_cfhaih_nov08.pdf (22. 5. 2016).
- ANDJELOV, M. 2009: Modeliranje napajanja vodonosnikov za oceno količinskega stanja podzemnih voda v Sloveniji v letu 2006. 20. Mišičev vodarski dan 2009, Maribor: 126-130.
- ANDJELOV, M., MIKULIČ, Z., UHAN, J. & DOLINAR, M. 2013: Vodna bilanca z modelom GROWA-SI za količinsko ocenjevanje vodnih virov Slovenije. 24. Mišičev vodarski dan 2013, Maribor: 127-133.
- ANDJELOV, M., WENDLAND, F., MIKULIČ, Z., TETZLAFF, B., UHAN, J. & DOLINAR, M. 2014: Regional water balance modelling by GROWA in Slovenia. Danube Conference 2014, Bridging the sciences – crossing borders, XXVI Conference of the Danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases of water management, Deggendorf, 161-164.
- ANDJELOV, M., FRANTAR, P., MIKULIČ, Z., PAVLIČ, U., SAVIČ, V., SOUVENT, P., TRIŠIĆ, N. & UHAN, J. 2015: Količinsko stanje podzemnih voda v Sloveniji. Osnove za NUV 2015-2021. Poročilo, Agencija RS za okolje, Ljubljana: 67 p.
- ANDJELOV, M., MIKULIČ, Z., TETZLAFF, B., UHAN, J. & WENDLAND, F. 2016: Groundwater recharge in Slovenia, Results of a bilateral German-Slovenian research project. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Energy & Environment*, 339: 138.
- BAT, M., DOLINAR, M., FRANTAR, P., HRVATIN, M., KOBOLD, M., KURNIK, B., NADBATH, M., OŽURA, V., UHAN, J. & ULAGA, F. 2008: Vodna bilanca Slovenije 1971-2000. Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana: 119 p.
- CHIEW, F. & SIRIWAREENA, L. 2005: Trend change detection software – user guide, CRC for Catchment Hydrology, Australia: 23 p.
- CRAIG, M. & DALY, D. 2010: Methodology for Establishing Groundwater Threshold Values and the Assessment of Chemical and Quantitative Status of Groundwater, Including an Assessment of Pollution Trends and Trend Reversal, Environmental protection Agency, Version 1. Wexford, Ireland: 48 p.
- EEA – EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2005: The European Environment. State and outlook 2005. European Environment Agency, Copenhagen: 570 p.
- EEA – EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2012: Environmental indicator report 2012, Ecosystem resilience and resource efficiency in a green economy in Europe, Copenhagen: 151 p.
- EUROPEAN COMMISSION 2007: Guidance on groundwater monitoring. WFD CIS Guidance Document No. 15. Technical Report 002-2007. 54 p.
- EUROPEAN COMMISSION 2009: Guidance on groundwater status and trend assessment. WFD CIS Guidance Document No. 18. Technical Report 026-2009. 82 p.
- GILBERT, R.O. 1987: Statistical methods for environmental pollution monitoring. Van Nostrand Reinhold, New York: 320 p.
- GRAYSON, R.B., ARGENT, R.M., NATHAN, R.J., McMAHON, T.A. & MEIN, R. 1996: Hydrological Recipes: Estimation Techniques in Australian Hydrology. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Australia: 125 p.
- HARUM, T., HÖLLER, C., SACCON, P., ENTNER, I. & HOFRICHTER, J. 2001: Abschätzung des nachhaltig nutzbaren Quellwasserdargebotes im alpinen Raum Österreichs. Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH Graz, Wien: 77 p.
- HELSEL, D.R., MUELLER, D.K. & SLACK, J.R. 2006: Computer program for the Kendall family of trend tests. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5275, Reston, Virginia: 4 p.
- HERRMANN, F., CHEN, S., HEIDT, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H. & WENDLAND, F. 2013: Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 57/5: 206-224.
- HERRMANN, F., KELLER, L., KUNKEL, R., VEREECKEN, H. & WENDLAND, F. 2015: Determination of spatially differentiated water balance components including groundwater recharge on the Federal State level – A case study the mGROWA model in North Rhine-Westphalia (Germany). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4: 294-312.
- HÖLLER, C. 2004: Erstabschätzung der verfügbaren Grundwasserressource für Einzelgrundwasserkörper mit unzureichender Datenlage.

- Gem. EU-WRRL, September 2004. Methodenbeschreibung für strategiepapier des BMLFUW. Technisches Büro für Kulturtechnik & Wasserwirtschaft, Güssnig: 89 p.
- JANŽA, M., ŠRAM, D. & MEZGA, K. 2014: Ocena razpoložljivih in izkoristljivih količin podzemne vode po posameznih telesih podzemne vode v Sloveniji. Poročilo Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana: 18 p.
- JANŽA, M., ŠRAM, D., MEZGA, K., ANDJELOV, M. & UHAN, J. 2016: Ocena količin podzemne vode za ohranjanje ekosistemov, odvisnih od podzemne vode in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda. *Geologija*, 59/2: 221-232, [doi:10.5474/geologija.2016.013](https://doi.org/10.5474/geologija.2016.013).
- KARANTH, K.R. 1987: Groundwater Assessment Development and Management Tata McGraw Hill publishing company Ltd., New Delhi, 725p.
- KRANJC KUŠLAN, S. 1995: Bilanca podzemnih voda Republike Slovenije. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, Ljubljana.
- KUNDZEWICZ, Z.W. & ROBSON, A. (eds.) 2000: Detecting trend and other changes in hydrological data, World Climate Programme Data and Monitoring – Water, WMO/TD-No-1013, Geneva: 158 p.
- KUNKEL, R. & WENDLAND, F. 1998: Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe – Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen. *Schr. d. FZJ, Reihe Umwelt* 12, Jülich, 107 p.
- KUNKEL, R. & WENDLAND, F. 2002: The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins – the river Elbe case study. *Journal of Hydrology*, 259: 152–162.
- LEE, C.H. 1915: The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, 78: 148–251.
- MARDHEL, V., FRANTAR, P., UHAN, J. & ANDJELOV, M. 2004: Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. In: WITKOWSKI, A.J. (ed.): Groundwater vulnerability assessment and mapping. International conference Ustroń, Poland, 15–18 june 2004, Abstracts, University of Silesia, Faculty of Earth Sciences Sosnowiec, pp. 99
- MEZGA, K., JANŽA, M., ŠRAM, D. & KOREN, K. 2014: Pregled ekosistemov, odvisnih od podzemnih vod. Končno poročilo. Arh. Št. K-II-30d/c/-42/1394-20. Poročilo Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana: 77 p.
- MIKULIČ, Z. 2010: Vode so podcenjeni potencial Slovenije, Slovenski vodar 21-22, Društvo vodarjev Slovenije, 6-8.
- MIKULIČ, Z., UHAN, J., JANŽA, M. & ANDJELOV, M. 2015: Assessment of renewable and available groundwater resources for water management planning. 42nd IAH Congress, T6 Groundwater Governance and Management, Rome, pp. 65.
- MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR 2015: Načrt upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja 2015–2021. Internet: http://www.mop.gov.si/si/delovna_podrocja/voda/ (12.09.2016)
- NADOR, A., LAPANJE, A. TÓTH, G., RMAN, N., SZÓCS, T., PRESTOR, J., UHRINE, A., RAJVER, D., FODOR, L., MURATI, J. & SZEKELY, E. 2012: 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. *Geologija*, 55/2: 209–22, [doi:10.5474/geologija.2012.0134](https://doi.org/10.5474/geologija.2012.0134).
- NIEA – NORTHERN IRELAND ENVIRONMENT AGENCY 2009: River Basin Management Plans – Groundwater Classification, Surface Waters. Internet: http://www.doeni.gov.uk/niea/surfacewaters_gw.pdf (13.01.2015).
- OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES 2000: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. CELEX–EUR Official Journal L 327, 22 December 2000, 1–72.
- PREDÁ, E., KLÓVE, B., KVÆRNER, J., LUNDBERG, A., SIERGIEIEV, D., BOUKALOVA, Z., WACHNIEW, P., POSTAWA, A., WITCZAK, S., BALDERACCHI, M., TREVISAN, M., ERTÜRK, A., GONENEC, E., ROSSI, P., MUOTKA, T., ILMONEN, J., STEFANOPOULOS, K. & VADINEANU, A. 2014: New indicators for assessing GDE vulnerability, GENESIS project, Deliverable D4.3: 108 p.
- PUN 2000, 2014: Operativni program upravljanja z območji Natura 2000 v Sloveniji 2014 –2020 (SI Natura 2000 Management) – LIFE+ projekt. Internet: <http://www.natura2000.gov.si/index.php?id=21> (23.01.2015).
- RMAN, N. 2014: Analysis of long-term thermal water abstraction and its impact on flow-temperature intergranular geothermal aquifers in the Mura-Zala basin, NE Slovenia. *Geothermics*, 51: 214–227, [doi:10.1016/j.geothermics.2014.01](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.01).

- SAVRENSKY, F.P. 1933: *Gidrogeologiya = Hydrogeology*. Moscow, ONTI.
- SCHLÜTER, H. 2006: Ermittlung des nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots in stark genutzten Teileinzugsgebieten – Beurteilung des mengenmäßigen Zustandes gemäß EU Rahmenrichtlinie Wasser. Ph.D. Thesis, Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus: 193 p.
- TENNANT, D.L. 1976: Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources, in *Instream flow needs*, Volume II: Boise, ID, Proceedings of the symposium and specialty conference on instream flow needs, May 3–6, American Fisheries Society, 359–373.
- UHAN, J. 2010: Vode. In: Poročilo o stanju okolja v Sloveniji 2009, Agencija RS za okolje. Internet: <http://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/poro%C4%8Dila/poro%C4%8Dila%20o%20stanju%20okolja%20v%20Sloveniji/> (4. 11. 2016).
- UHAN, J. 2015: Od prvega poskusa sledenja toka podzemne vode do prvega modela napajanja vodonosnikov v Sloveniji. Glasilo slovenskega meteorološkega društva, Vetrnica, 8/15, 30–37.
- URADNI LIST RS 2003: Pravilnik o metodologiji za določanje vodnih teles podzemnih voda, Uradni list RS, št. 65/2003.
- URADNI LIST RS 2005: Pravilniku o določitvi vodnih teles podzemnih voda. Uradni list RS, št. 63/2005.
- URADNI LIST RS 2009a: Uredba o stanju podzemnih voda. Uradni list RS, št. 25/2009.
- URADNI LIST RS 2009b: Pravilnik o monitoringu podzemnih voda. Uradni list RS, št. 31/2009.
- URADNI LIST RS 2016: Uredba o spremembah uredbe o stanju podzemnih voda. Uradni list RS, št. 66/2016.
- URADNI LIST SFRJ 1977: Zakon o enotnem načinu ugotavljanja, evidentiranja in zbiranja podatkov o rezervah rudnin in talnih voda ter o bilanci teh rezerv. Uradni list SFRJ, št. 53/77, 24/86 in 17/90.
- URADNI LIST SFRJ 1979: Pravilnik o klasifikaciji in kategorizaciji rezerv talnih voda in o njihovi evidenci. Uradni list SFRJ, št. 34/79.
- URBANC, J, MEZGA, K. & ZINI, L. 2012: An assessment of capacity of Brestovica – Klariči karst water supply (Slovenia) = Ocena izdatnosti vodnega vira Brestovica – Klariči (Slovenija). *Acta Carsologica*, 41/1: 89–100.
- WCED 1987: Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Internet: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> (12.09.2016).
- WFD IRELAND 2005: WFD pressures and Impacts Assessment Methodology: Guidance on the Assessment of the impact of groundwater abstractions, Paper by the Working Group on Groundwater: 23 p.
- ZEKTSE, I.S. 2000: *Groundwater and the Environment*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.



Ocena potrebnih količin podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda

The assessment of the required groundwater quantity for the conservation of ecosystems and the achievement of a good ecological status of surface waters

Mitja JANŽA¹, Dejan ŠRAM¹, Kim MEZGA¹, Mišo ANDJELOV² & Jože UHAN²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija;

e-mail: mitja.janza@geo-zs.si, dejan.sram@geo-zs.si, kim.mezga@geo-zs.si

²Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, SI-1000 Ljubljana, Slovenija;

e-mail: miso.andjelov@gov.si, joze.uhan@gov.si

Prejeto / Received 21. 10. 2016; Sprejeto / Accepted 23. 11. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Ključne besede: ekosistemi, odvisni od podzemne vode, vodno telo podzemne vode, vodno telo površinske vode, razpoložljivost podzemne vode, upravljanje s podzemno vodo

Key words: groundwater dependent ecosystems, groundwater body, surface water body, groundwater availability, groundwater management

Izvleček

Določitev razpoložljivih količin podzemnih voda je osnovnega pomena za njihovo trajnostno rabo. Sodobni pristopi ocene razpoložljivosti podzemnih voda celovito obravnavajo posledice odvzemov podzemne vode, vključno z vplivi na ekosisteme in ekološko stanje površinskih voda. Vodno telo podzemne vode je v dobrem količinskem stanju, če odvzemi podzemne vode ne povzročajo pomembnih poškodb ekosistemov, odvisnih od podzemne vode, in ne slabšajo ekološkega stanja površinskih voda. V članku predstavljeno metodologijo smo razvili kot sestavni del ocene količinskega stanja vodnih teles podzemne vode v Sloveniji in je prilagojena lastnostim obravnavanih ekosistemov ter hidrološkim in hidrogeološkim značilnostim slovenskega ozemlja. Uporabili smo dva različna pristopa ocene potrebnih količin podzemnih voda za ohranjanje gozdnih habitatov na aluvialnih vodonosnikih in habitatov dvoživk ter mehkužcev na kraških območjih. Oceno smo izvedli na ravni vodnih teles podzemne vode in letnih povprečij časovnih spremenljivk vodne bilance, izračunanih z regionalnim vodnobilančnim modelom GROWA-SI. Na območjih vodnih teles podzemne vode, kjer so prisotni obravnavani ekosistemi, znaša ta količina od 0,1 % do 12,4 % obnovljivih količin podzemnih voda. Ocenjeni delež letnih obnovljivih količin podzemnih voda, potrebnih za ohranjanje ekološkega stanja površinskih voda je za celotno območje Slovenije 23,2 %. Največji delež je na območju severovzhodne Slovenije, kjer dosega 30 %, najmanjši pa v vzhodnih Alpah, Karavankah in Kamniško-Savinjskih Alpah s 16,6 % povprečnih letnih obnovljivih količin.

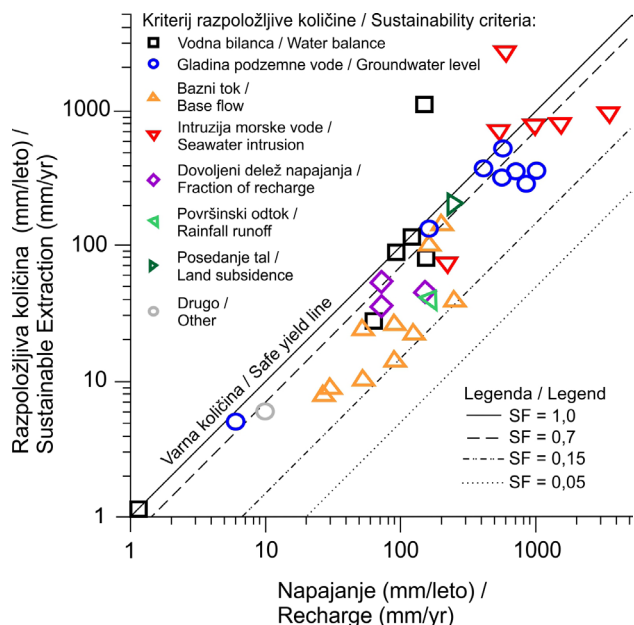
Abstract

Assessment of the available quantity of groundwater is of essential importance for its sustainable use. Modern approaches for estimation of groundwater availability take into account all potential impacts of abstractions, including impacts on groundwater dependent ecosystems and impacts on surface waters ecological status. Groundwater body is in good quantitative status if groundwater abstractions do not cause significant damages to groundwater dependent ecosystems and significant diminution in the ecological status of surface water bodies. The methodology presented in this paper was developed as an integral part of the assessment of the quantitative status of groundwater bodies in Slovenia and is tailored to the characteristics of the groundwater dependent ecosystems as well as hydrological and hydrogeological conditions in the Slovenian territory. Two different approaches were implemented; for forest habitats on alluvial aquifers, and habitats of amphibians and molluscs in karst areas. Estimates of the required quantity of groundwater for groundwater dependent ecosystems conservation were performed at the level of groundwater bodies and annual averages of temporal variables of the water balance, calculated with the regional water balance model GROWA-SI. In the areas of groundwater bodies with groundwater dependent ecosystems estimated quantity present 0.1 % - 12.4 % of the groundwater recharge. The estimated share of annual renewable quantity of groundwater to maintain the ecological status of surface waters for the entire territory of Slovenia is 23.2 %. The largest share, 30 % is in north-eastern Slovenia and the lowest in the north-west part of Slovenia with a 16.6 % average annual renewable quantity.

Uvod

Trajnostna raba vodnih virov podzemnih voda zahteva poznavanje njihovih razpoložljivih količin. Prve metode določitve razpoložljivih količin podzemnih voda, ki so poenostavljeno enačile napajanje z razpoložljivimi količinami, so se pojavile v štiridesetih letih prejšnjega stoletja. Kljub številnim, tudi zgodnjim kritikam (THEIS, 1940; BROWN, 1963; BREDEHOEFT et al., 1982), je ostal ta koncept določanja razpoložljivih količin podzemnih voda dolgo in pogosto v uporabi.

Bistvena pomanjkljivost omenjenega koncepta je njegova omejenost na del naravnega oziroma hidrološkega sistema, ki ga obravnava ločeno brez upoštevanja medsebojnega vpliva povezanih delov sistema ali podsistemov. Dejstvo, da z odvzemom podzemne vode porušimo naravno uravnoteženo stanje, je pri tem povsem spregledano. Novo ravnotežje se lahko vzpostavi z večjim napajanjem, zmanjšanim odtokom ali spremenjeno količino podzemne vode v vodonosniku. Posledično se lahko vpliv odvzema prenese na povezane sisteme (npr. površinske vode, ekosisteme). Koncept, ki uporablja za določitev razpoložljivih količin podzemnih voda zgolj naravno vodno bilanco, brez upoštevanja drugih vplivov odvzemov, se v literaturi pogosto označuje kot »vodnobilančni mit« (BREDEHOEFT et al., 1982).



Sl. 1. Ocene razpoložljivih količin podzemnih voda in napajanja vodonosnikov (prirejeno po SMITH et al., 2010). SF označuje razmerje med razpoložljivo količino podzemne vode in napajanjem vodonosnika.

Fig. 1. Estimates of sustainable groundwater extraction and groundwater recharge (adapted after SMITH et al., 2010). SF denotes the ratio between sustainable groundwater extraction and groundwater recharge.

Zgoraj navedeno pomanjkljivost potrjuje skupna analiza razmerij med razpoložljivo količino podzemne vode (R) in napajanjem vodonosnikov (N), izdelana na osnovi dvaintridesetih študij, izvedenih v Jordaniji, Avstraliji, Tajvanu, ZDA, Severni Koreji, Danski, Namibiji, Kitajski, Angliji, Indiji, Turčiji, Izraelu, Iranu in Grčiji (SMITH et al., 2010). Razmerje, ki so ga opredelili kot »trajnostni faktor vodonosnika« ($SF=R/N$), je bilo v omenjenih študijah v razponu med 0,15 in 1 (sl. 1). Največje vrednosti SF (okrog 1) so ocene, ki temeljijo na enostavnem vodnobilančnem konceptu. Brez upoštevanja teh ocen je večina preostalih vrednosti SF v razponu med 0,15 in 0,85.

Sodobni pristopi ocene razpoložljivosti podzemnih voda so celovitejši in upoštevajo različne vplive in posledice odvzemov podzemne vode, kot na primer vdore slane ali onesnažene vode, vplive na površinske vode ali ekosisteme ter v določenih primerih tudi ekonomske in socialne omejitve (ZHOU, 2009), ter kulturne in politične (MACE et al., 2001). ZHOU (2009) ugotavlja, da razpoložljivosti podzemnih voda ni moč opredeliti zgolj kot vrednost, izračunano iz bilančne enačbe, temveč zahteva oceno dinamičnega odziva podzemne vode na odvzem in kakšne okoljske in družbene posledice le-ta povzroči. Pri tem izpostavlja numerične modele kot najprimernejše orodje za simulacijo scenarijev vplivov predlaganih odvzemov in vlogo deležnikov pri opredelitvi ter vrednotenju scenarijev in njihovih rezultatov.

Primernost uporabe dinamičnih numeričnih modelov za oceno razpoložljivosti podzemnih voda na ravni vodonosnikov je nesporna. V Sloveniji uporabljamo rezultate numeričnega modeliranja na količinsko najbolj obremenjenih aluvialnih vodonosnikih v Ekspertnem sistemu odločanja pri upravljanju podzemnih voda (SOUVENT et al., 2014). Na regionalni ravni pa je njihova uporabnost zaradi pomanjkanja podatkov in zahtevnosti modeliranja velikih območij pogosto omejena. Razen redkih izjem, kot je na primer Danska (HENRIKSEN et al., 2008), za oceno razpoložljivosti podzemnih voda na ravni države, namesto modeliranja hidroloških procesov uporabljajo enostavnejše pristope.

Po definiciji okvirne direktive o vodah (DIREKTIVA, 2000) določa razpoložljivo količino podzemnih voda dolgoročno povprečna letna stopnja količinskega obnavljanja, ki je zmanjšana za

dolgoročni letni pretok, potreben za ohranjanje ekološkega stanja površinskih voda in kopenskih ekosistemov, ki so z njim povezani.

Direktiva izpostavlja pri oceni količinskega stanja podzemnih voda gladino podzemne vode kot glavni parameter, ki omogoča ugotavljanje vplivov in dolgoročnih trendov. Vendar hkrati opozarja, da ni zadosten parameter za celovito oceno količinskega stanja. Dobro količinsko stanje vodnega telesa podzemne vode dosežemo, ko odvzemi podzemnih voda (EUROPEAN COMMISSION, 2009):

- ne presegajo razpoložljivih količin podzemnih voda,
- ne povzročajo pomembnih neugodnih sprememb kemijskega ali ekološkega stanja v povezanih površinskih vodah,
- ne povzročajo pomembnih poškodb kopenskih ekosistemov, odvisnih od podzemne vode,
- ne povzročajo vdorov slane vode.

Nacionalne ocene količinskega stanja podzemnih voda temeljijo na konceptu štirih razvrstitvenih preizkusov (ARSO, 2009). Najnovejšo oceno količinskega stanja podzemnih voda za Načrt upravljanja voda 2015 – 2021 v Sloveniji so izdelali na sektorju za hidrogeološke analize Agencije RS za okolje (ANDJELOV et al., 2016).

V članku je predstavljena ocena količin podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov, odvisnih od podzemne vode (EOPV), in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda. Predstavlja metodološko nadgradnjo ocene, izdelane v okviru Načrta upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja za obdobje 2015 – 2021 (MOP, 2016) kot sestavni del ocene količinskega stanja vodnih teles podzemnih voda v Sloveniji.

Ekosistemi, odvisni od podzemne vode (EOPV)

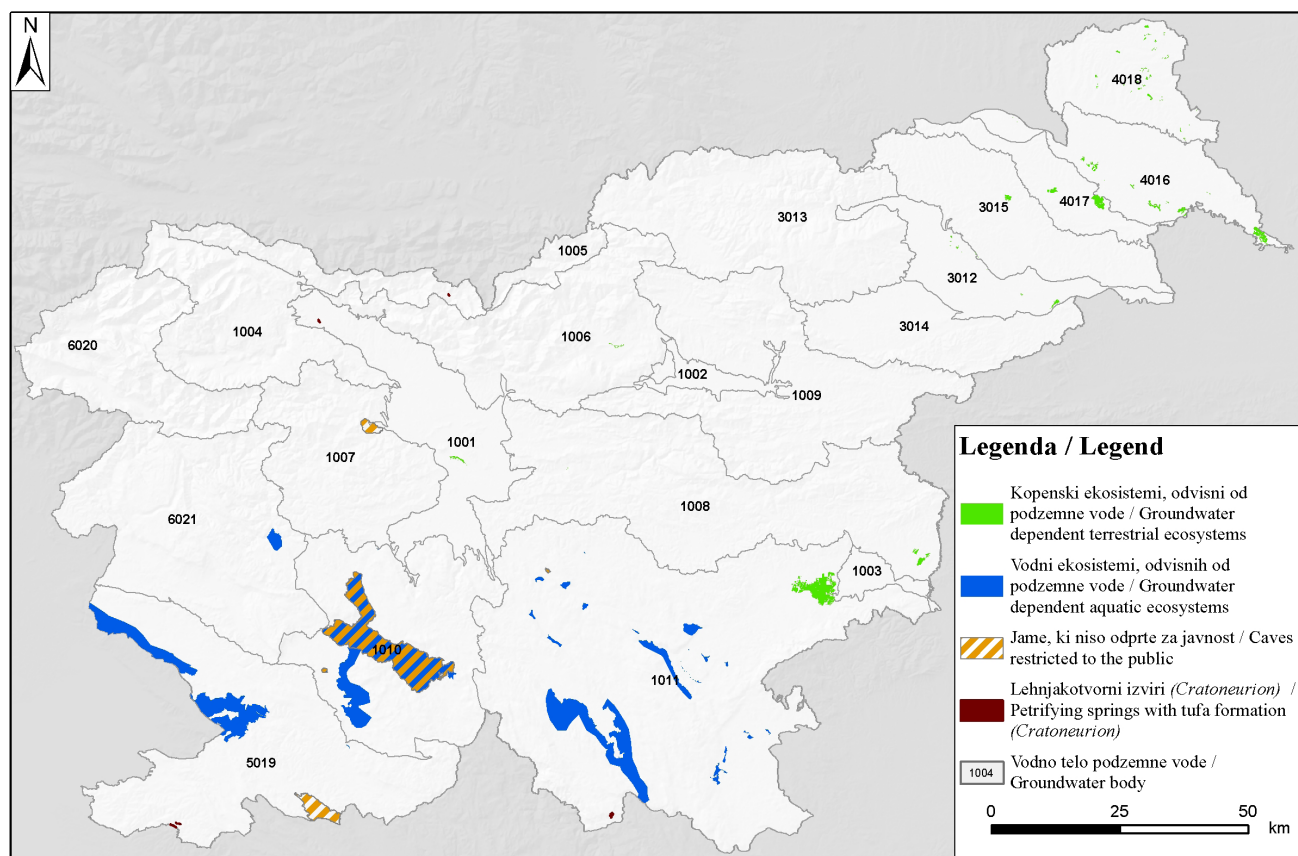
EOPV vključujejo ekosisteme v podzemnih vodah, kopenske ekosisteme, odvisne od podzemne vode in vodne ekosisteme v površinskih vodah, odvisne od podzemne vode (INTERNET1). Zahtevajo stalen ali občasen stik s podzemnimi vodami; za ohranjanje skupnosti različnih živalskih in rastlinskih vrst, ekoloških procesov in ekosistemskih storitev (RICHARDSON et al., 2011). Posledično so dober indikator stanja vodnih

teles podzemnih voda in imajo pomembno vlogo pri ocenjevanju le-tega (ARSO, 2009; EUROPEAN COMMISSION, 2011).

V oceno količinskega stanja vodnih teles podzemnih voda smo vključili habitatne tipe, določene na osnovi podatkov Zavoda RS za varstvo narave (ZRSVN, 2014). Gre za kopenske (gozdni habitatni tipi) in vodne (habitati dvoživk in mehkužcev) EOPV na območju Nature 2000 (sl. 2), ki so glede na ekološko stanje ohranjenosti (ohranitev, izboljšanje in obnovitev) razvrščeni v ugodno ali neugodno stanje ohranjenosti. Ugodno stanje rastlinskih in živalskih vrst ter habitatnih tipov je določeno na osnovi ekoloških potreb posameznih vrst in habitatnih tipov (URADNI LIST RS, 2004).

Razloge za neugodno stanje ohranjenosti EOPV lahko povezujemo z neugodnim kemijskim ali količinskim stanjem podzemnih voda (MEZGA et al., 2015; MEZGA et al., 2016). Slednji lahko v naravi povzročijo sušenje in odmiranje gozdnih habitatov (TOME, 2010; DREO, 2016) ali upad populacije vodnih EOPV (SKET, 1997; BULOG, 2012). Kadar EOPV ne dosega ugodnega stanja ohranjenosti glede na kazalce direktive o habitatih (DIREKTIVA, 1992) je le-ta pomembno poškodovan.

Habitatni tipi kopenskih EOPV na območju Nature 2000, ki smo jih v raziskavi obravnavali, so ilirski hrastovo-belogabrovi gozdovi (*Erythronio-Carpinion*), obrečni hrastovo-jesenovo-brestovi gozdovi (*Quercus robur*, *Ulmus laevis* in *Ulmus minor*, *Fraxinus excelsior* ali *Fraxinus angustifolia*) in obrečna vrbovja, jelševja in jesenovja (*Alnus glutinosa* in *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*)), ki so pretežno na rečnih ravninah v severovzhodnem in vzhodnem delu Slovenije. Habitatne tipe vodnih EOPV, dvoživke (*Proteus* ali človeška ribica ali močeril oziroma *Proteus anguinus* in *Proteus anguinus parkelj*) in mehkužce (školjka Kušcerjeva kongeria oziroma *Congeria kusceri*), najdemo na kraških območjih na južnem, jugozahodnem in jugovzhodnem delu Slovenije. Vodne habitatne tipe jam, ki niso dostopni javnosti in lehnjakotvorne izvire (*Cratoneurion*) najdemo na območju klasičnega Dinarskega, Visokega, Visokogorskega in Plitvega krasa (sl. 2). Zaradi pomanjkanja podatkov, slednjih dveh v oceni nismo upoštevali.



Sl. 2. Območja ekosistemov, odvisnih od podzemne vode na območju Nature 2000 (ZRSVN, 2014).

Fig. 2. Areas of groundwater dependent ecosystems in Natura 2000 area (ZRSVN, 2014).

Metodologija

Na podlagi značilnosti potreb EOPV po podzemni vodi smo območja habitatov obravnavanih EOPV razdelili v dve skupini in sicer:

- na gozdne habitate na območjih vodonosnikov z medzrnsko poroznostjo in
- na habitate dvoživk in mehkužcev na kraških območjih.

Oceno količin podzemnih voda potrebnih za ohranitev, izboljšanje ali obnovo rastlinskih in živalskih vrst ter habitatnih tipov smo izvedli na ravni vodnih teles podzemnih voda in letnih povprečij časovnih spremenljivk vodne bilance. Izhodiščni podatki za oceno so komponente vodnobilančnega modela GROWA-SI (30) (ANDJELOV et al., 2013). Uporabili smo povprečne vrednosti za referenčno tridesetletno vodnobilančno obdobje 1981–2010.

Ocena za kopenske ekosisteme, odvisne od podzemne vode na aluvialnih vodonosnikih

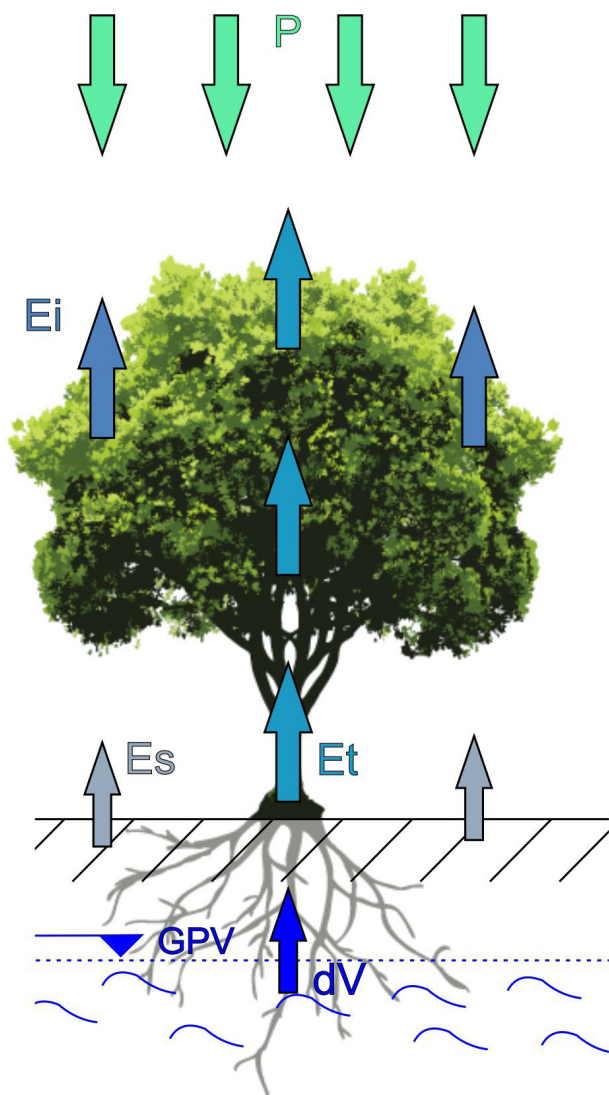
Za obravnavane kopenske EOPV (gozdove) so vir vode padavine in podzemna voda. V metodologiji smo privzeli, da gozdovi najprej porabijo razpoložljivo vodo iz padavin, preostalo potrebno količino vode pa nadomestijo s podzemno vodo.

Potrebe gozdov po vodi v vodni bilanci gozdnega hidrološkega kroga ustrezajo količini vode, ki jo rastje porabi in se vrača v atmosfero s transpiracijo (E_t) (TYREE, 1999). Vodnobilančni model GROWA omogoča zgolj izračun velikosti realne evapotranspiracije (ETR) kot vsote količine izhlapih prestreženih padavin (E_i), dela prepuščenih padavin, ki izhlapijo iz tal (E_s) in transpiracije (E_t):

$$ETR(\text{GROWA-SI}) = E_i + E_t + E_s \text{ (mm/leto)}$$

Pri izračunu upošteva model kot vir vode za rastline zgolj padavine, zato je na območju gozdov, ki uporabljajo kot vir vode tudi podzemno vodo, izračunana količina ETR podcenjena. Za oceno tega deleža smo posredno, z upoštevanjem značilnosti vodne bilance gozdnega hidrološkega kroga (sl. 3) in razpoložljivih podatkov, ocenili deleže posameznih komponent ETR (GROWA-SI). Nato smo potrebe obravnavanih gozdnih habitatov po podzemni vodi (dV) izračunali kot razliko med oceno z modelom izračunane višine E_t in pričakovanimi potrebami gozdov po vodi na obravnavanih območjih.

Upoštevali smo, da je potreba gozdov po vodi 5000 m³/ha/leto oziroma 500 mm/leto. Ta ocena izhaja iz rezultatov preučevanja slovenskih nižinskih gozdov Murske šume in Krakovskega gozda, kjer so izmerili porabo vode odraslega sestoj v času vegetacijskega obdobja, z ocenjenim številom 100 dreves/ha, med 4800 in 5200 m³/ha/leto (ČATER, 2002; ČATER & LEVANIČ, osebna komunikacija). Primerljive ocene so podali tudi SUN et al. (2005).



Sl. 3. Gozdni hidrološki krog (prirejeno po ŠRAJ, 2003). P – Padavine, Et – Transpiracija, Ei – Izhlapele prestrežene padavine, Es – Padavine, ki izhlapijo iz tal, GPV – Gladina podzemne vode, dV – Podzemna voda za ohranjanje gozdnih habitatov, odvisnih od podzemne vode.

Fig. 3. Forest hydrological cycle (adapted after ŠRAJ, 2003). P – Precipitation, Et – Transpiration, Ei – Evaporated intercepted precipitation, Es – Precipitation evaporated from the ground, GPV – Groundwater table, dV – Groundwater for conservation of groundwater dependent forest habitats.

Na območju gozda navadno velik del padavin prestrežejo drevesne krošnje, manjši del pa jih pade skozi odprtine med krošnjami neposredno na tla. Količina prestreženih padavin (Ei) je odvisna od vegetacijskih in meteoroloških paramet-

rov (REJIC & SMOLEJ, 1988; ŠRAJ, 2003). V splošnem iglaste vrste dreves prestrežajo od 20 do 40 %, listnate pa od 20 do 25 % padavin (ŠRAJ, 2009).

Pri izračunu smo uporabili največji izmerjeni delež prestreženih padavin za listnate gozdove, 25 % padavin. Delež prepuščenih padavin, ki izhlapi iz tal (Es) je v gozdovih, kjer do tal prodre malo sončnega sevanja, skoraj zanemarljiv (ŠRAJ, 2009) in ga pri končnem izračunu nismo upoštevali.

Ocena velikosti transpiracije (Et), izračunane z modelom GROWA izhaja iz enačbe:

$$Et = ETR(GROWA-SI) - Ei - Es \text{ (mm/leto)}$$

ali

$$Et = ETR(GROWA-SI) - 0,25 \times P - 0 \text{ (mm/leto)}.$$

V primerih, ko je Et manjša od 500 mm/leto, smo privzeli, da gozdovi nadomeščajo razliko s podzemno vodo:

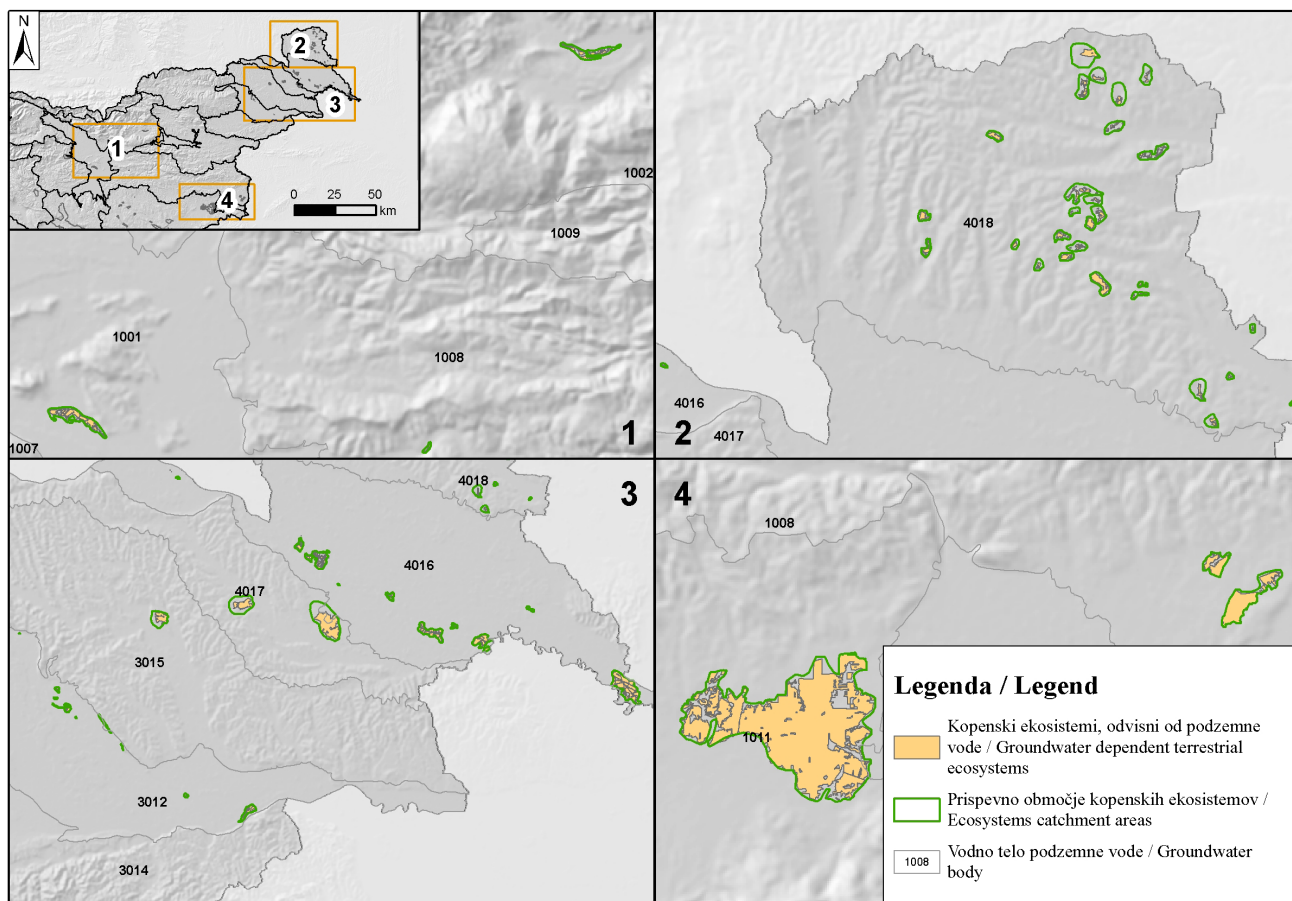
$$dV = Et - 500 \text{ (mm/leto)}.$$

Ocenjeno potrebno količino obravnavanih gozdnih habitatov po podzemni vodi (dV) smo skupaj s konceptualnimi hidrogeološkimi modeli uporabili za določitev vplivnih območij gozdnih habitatov (sl. 4). Na teh območjih imajo odvzemi podzemne vode lahko vpliv na kopenske EOPV, kar je pomembno pri oceni količinskega stanja vodnega telesa podzemne vode, kakor tudi pri načrtovanju rabe podzemne vode.

Ocena za vodne ekosisteme, odvisne od podzemne vode na kraških območjih

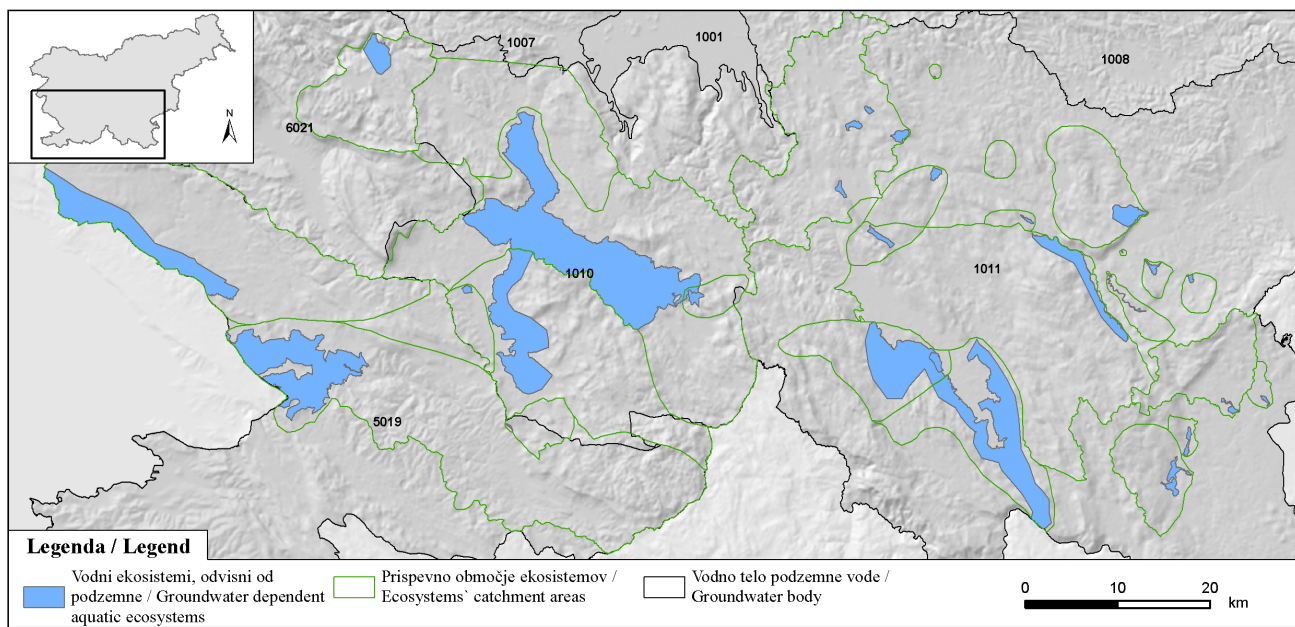
Vodni EOPV (človeške ribice in školjke) so vezani na podzemne tokove in na suhem ne preživijo. Zaradi specifičnih hidrogeoloških razmer ima način pretakanja podzemne vode na krasu pogosto značilnosti površinskih odtokov. Zato smo pri oceni količine vode, ki zagotavlja ohranjanje vodnih EOPV privzeli, da ta količina ustreza ekološko sprejemljivemu pretoku (Qes), in jo določili po analogiji določanja za površinske vode (Uradni list RS, 2009).

Za obravnavane vodne EOPV smo na podlagi poznavanja hidrogeoloških razmer (litološke zgradbe, orografskih značilnosti, vodovarstvenih območij, rezultatov sledilnih poskusov in mej vodonosnih sistemov podzemne vode) določili njihova prispevna območja (sl. 5).



Sl. 4. Območja kopinskih ekosistemov, odvisnih od podzemne vode in njihova vplivna območja.

Fig. 4. Areas of groundwater dependent terrestrial ecosystems and their catchment areas.



Sl. 5. Območja vodnih ekosistemov, odvisnih od podzemne vode in njihova prispevna območja.

Fig. 5. Areas of groundwater dependent aquatic ecosystems and their catchment areas.

Za ta območja smo s pomočjo podatkov o vodnih telesih površinske vode (MELJO et al., 2013) izračunali ekološko sprejemljive pretoke (Q_{es}). Ta pretok predstavlja delež celotnega odtoka iz prispevnega zaledja, ki je ocenjen z vodnobilančnim modelom GROWA-SI (ARSO, 2014). Zaradi že omenjene posebnosti toka podzemne vode

na kraških območjih in separacijskih možnosti modela smo obravnavali podzemni odtok kot vsoto modeliranega podzemnega in pripovršinskega odtoka. Tak pristop je realnejša ocena pretokov izvirov, kot zgolj uporaba napajanja vodonosnika oziroma podzemnega odtoka, ki predstavlja bazni del odtoka.

Ocena količine podzemne vode za doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda

Rečni ekosistemi so pogojeni s topografijo in geologijo porečja, predvsem pa s spremenljivostjo pretočnega režima. Količino podzemne vode oziroma pretok, ki je potreben za ohranjanje dobrega ekološkega stanja površinskih vodnih teles, je zato potrebno ocenjevati ob upoštevanju sezonske spremenljivosti med poplavami in sušami ter ob upoštevanju spremenljivosti med suhimi in mokrimi hidrološkimi leti. Večina tovrstnih hidroloških metod temelji na analizi mesečnih podatkovnih nizov, kot npr. RVA (Range of Variability Approach) in ABF (Aquatic Base Flow) metode (RICHTER et al., 1997; EISELE et al., 2003), manj pogosti pa so pristopi ocenjevanja na letni ravni, ki je časovni okvir ocenjevanja količinskega stanja voda po okvirni direktivi o vodah. Za oceno pretoka, ki je potreben za ohranjanje dobrega ekološkega stanja površinskih voda na letni ravni smo uporabili nemški vodnobilančni pristop s scenarijem petih sušnih let v zadnjem tridesetletnem obdobju (SCH-

LÜTER, 2006). Po omenjenem pristopu se lahko taka ocena izpelje iz dvajsetega centila (P20) količine napajanja vodonosnikov v referenčnem tridesetletnem vodnobilančnem obdobju, kar predpostavlja mejo slabih habitatnih rečnih pogojev in ki jo pogosto umeščajo v razpon med 10 in 30 % povprečnega letnega pretoka (TENNANT, 1976).

Ocena količin podzemnih voda, ki je v Sloveniji potrebna za ohranjanje dobrega ekološkega stanja površinskih voda, temelji na povprečju obnovljivih količin podzemnih voda petih najbolj sušnih let referenčnega obdobja (ANDJELOV et al., 2015). V obravnavanem referenčnem tridesetletnem vodnobilančnem obdobju 1981-2010 izstopajo sušna leta 1983, 1988, 2003, 2006 in 2007, ki predstavljajo povprečno sušno napajanje vodonosnikov GROWA-SI (05) (sl. 6). Razlika povprečne obnovljive količine podzemnih voda obdobja 1981-2010 (GROWA-SI (30)) in petletnega sušnega količinskega obnavljanja podzemnih voda (GROWA-SI (05)) predstavlja količino vode, potrebne za ohranjanje ekološkega stanja površinskih voda (MIKULČ et al., 2015).

Tabela 1. Ocenjene količine podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov, odvisnih od podzemne vode (EOPV).
Table 1. Estimates of groundwater quantity for groundwater dependent ecosystems (GDE) conservation.

	Vodno telo podzemne vode / Groundwater body	Površina / Area (km ²)	GROWA-SI (30) Napajanje / Recharge	Količina podzemne vode potrebne za ohranjanje EOPV / Quantity of groundwater for GDE conservation		
			(mm/leto) / (mm/yr)	(mm/leto) / (mm/yr)	(m ³ /leto) / (m ³ /yr)	Delež napajanja / Recharge share (%)
1001	Savska kotlina in Ljubljansko Barje	774	393	1,5	1.127.989	0,4
1003	Krška kotlina	97	308	0,5	50.103	0,2
1006	Kamniško-Savinjske Alpe	1112	302	0,6	634.666	0,2
1007	Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko	850	346	0,2	187.130	0,1
1008	Posavsko hribovje do osrednje Sotle	1792	191	0,3	580.162	0,2
1010	Kraška Ljubljana	1307	403	50,0	65.336.015	12,4
1011	Dolenjski kras	3355	293	25,4	85.171.708	8,7
3012	Dravska kotlina	429	266	1,3	554.984	0,5
3015	Zahodne Slovenske gorice	756	93	0,2	176.701	0,3
4016	Murska kotlina	591	135	3,5	2.061.503	2,6
4017	Vzhodne Slovenske gorice	308	78	1,3	407.847	1,7
4018	Goričko	494	57	1,6	804.079	2,9
5019	Obala in Kras z Brkini	1589	259	31,6	50.247.517	12,2
6021	Goriška brda in Trnovsko- Banjska planota	1443	396	12,3	17.737.212	3,1

Rezultati in diskusija

Ocene količin podzemnih voda za ohranjanje EOPV po posameznih vodnih telesih podzemne vode na območjih Nature 2000 so predstavljene v tabeli 1. Pri upravljanju z vodami se ta podatek pogosto obravnava kot ekološki odbitek. Razlika med obnovljivimi količinami podzemne vode oziroma napajanjem in ekološkim odbitkom je osnovni korak za določitev razpoložljivosti podzemne vode za nadaljnjo rabo.

Največji ekološki odbitek je na območjih vodnih teles podzemne vode Kraška Ljublanica ter Obala in Kras z Brkini, kjer znaša dobrih 12 % napajanja. Tako velike vrednosti lahko pripišemo dejstvu, da več kot 50 % površine obeh vodnih teles prekrivajo prispevna območja EOPV. Najmanjši ekološki odbitek na območjih vodnih teles, kjer so prisotni EOPV, je na območju vodnega telesa Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko in znaša 0,1 %.

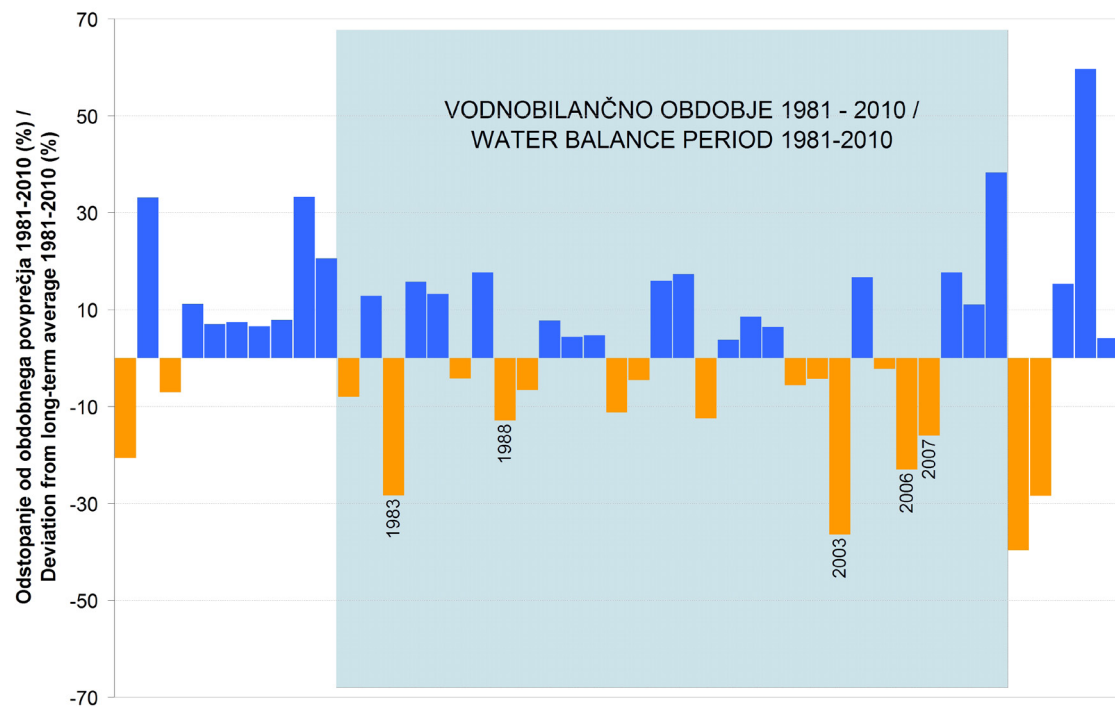
V oceni določena prispevna območja EOPV so v pomoč pri oceni količinskega stanja vodnih teles podzemne vode in omejujejo območja, na katerih imajo lahko odvzemi neugodni vpliv na stanje ohranjenosti EOPV na območjih Nature 2000, zato je tem območjem potrebno posvetiti posebno pozornost pri podeljevanju vodnih pravic.

Stanje ohranjenosti vrst in habitatnih tipov (ugodno ali neugodno) je lahko kazalec (dobrega ali slabega) količinskega stanja podzemnih voda. Predstavljena ocena količin podzemnih voda za ohranjanje EOPV je povezana z določenimi negotovostmi. Trenutno je na razpolago malo podatkov o dejanskih potrebah obravnavanih habitatnih tipov po podzemni vodi. Po kriterijih poročanja okvirne direktive o vodah, omejenih podatkov in pomanjkljivega poznavanja razmer v ekosistemi ocenjujemo srednjo stopnjo zaupanja rezultatov ocene razpoložljivih količin podzemne vode, potrebne za ohranjanje ekosistemov (ANDJELOV et al., 2015).

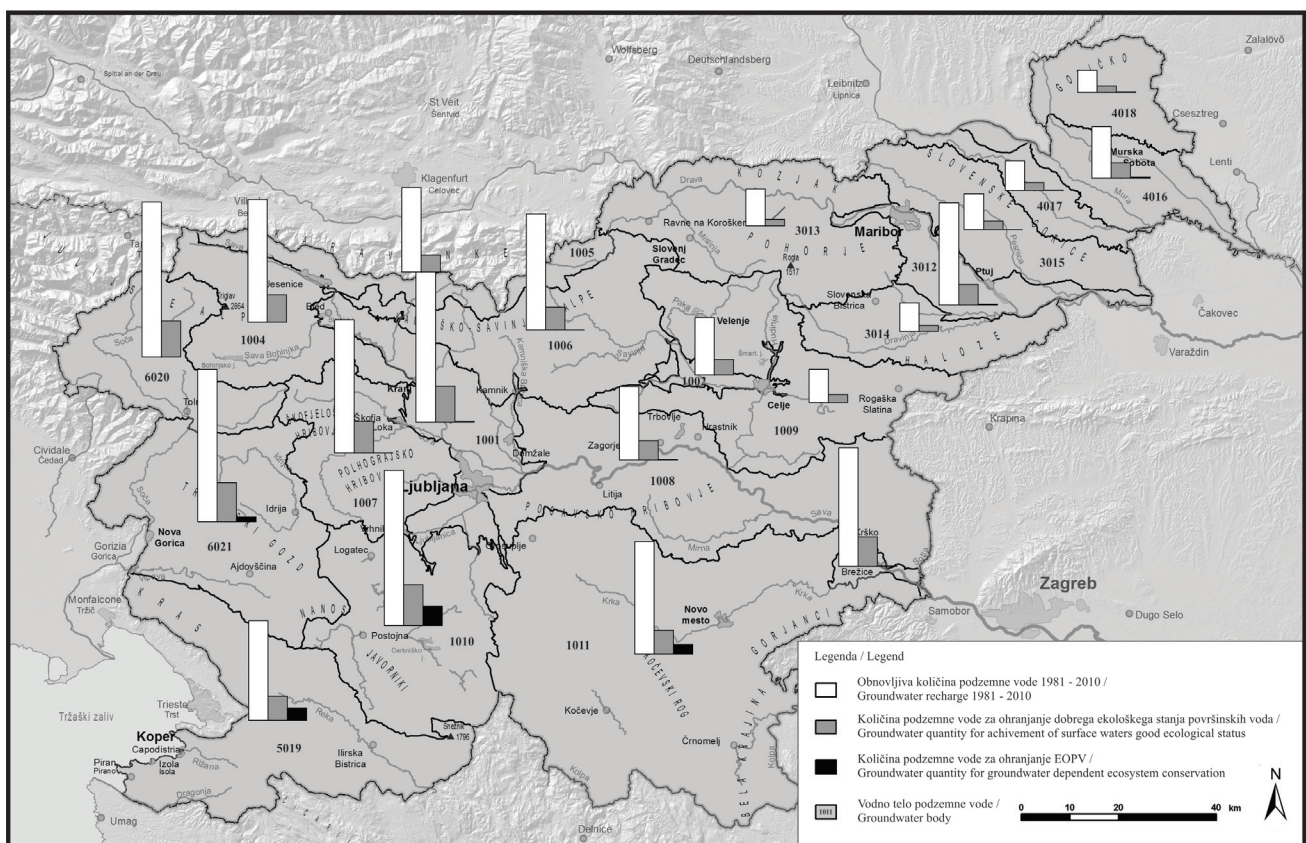
Tabela 2. Povprečje obnovljivih količin podzemnih voda v obdobju 1981-2010 GROWA-SI (30) in povprečje napajanja v petih najbolj sušnih letih 1983, 1988, 2003, 2006 in 2007 GROWA-SI (05).

Table 2. Average long-term renewable groundwater in the period 1981-2010 GROWA-SI (30) and average groundwater recharge by GROWA-SI (05) for the five most dry years 1983, 1988, 2003, 2006 in 2007 GROWA-SI (05).

Vodno telo podzemne / Groundwater body		GROWA-SI (30) Napajanje / Recharge		GROWA-SI (05) Napajanje / Recharge		(GROWA-SI (30) - GROWA-SI (05))/ GROWA-SI (30) (%)
		(mm/leto) / (mm/yr)	(m ³ /s)	(mm/leto) / (mm/yr)	(m ³ /s)	
1001	Savska kotlina in Ljubljansko Barje	393	9,65	299	7,34	23,9
1002	Savinjska kotlina	268	0,93	197	0,68	26,5
1003	Kraška kotlina	308	0,94	232	0,71	24,9
1004	Julijske Alpe v porečju Save	573	14,22	445	11,06	22,2
1005	Karavanke	393	5,01	315	4,02	19,8
1006	Kamniško-Savinjske Alpe	302	10,64	242	8,55	19,7
1007	Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko	346	9,33	264	7,11	23,8
1008	Posavsko hribovje do osrednje Sotle	191	10,83	141	8,03	25,9
1009	Spodnji del Savinje do Sotle	155	6,86	119	5,26	23,3
1010	Kraška Ljublanica	403	16,68	297	12,30	26,2
1011	Dolenjski kras	293	31,13	231	24,51	21,3
3012	Dravska kotlina	266	3,61	213	2,89	20,0
3013	Vzhodne Alpe	171	6,89	143	5,75	16,6
3014	Haloze in Dravinjske gorice	135	2,54	107	2,02	20,6
3015	Zahodne Slovenske gorice	93	2,23	70	1,68	24,7
4016	Murska kotlina	135	2,53	95	1,78	29,6
4017	Vzhodne Slovenske gorice	78	0,76	57	0,56	26,5
4018	Goričko	57	0,89	40	0,62	29,5
5019	Obala in Kras z Brkini	259	13,00	196	9,82	24,5
6020	Julijske Alpe v porečju Soče	723	18,72	555	14,38	23,2
6021	Goriška brda in Trnovsko-Banjška planota	396	18,13	295	13,48	25,6
Slovenija		289	185,54	222	142,57	23,2



Sl. 6. Določitev petih najbolj sušnih hidroloških let v referenčnem obdobju za izračun napajanja vodonosnikov GROWA-SI (05).
Fig. 6. Defining five most dry hydrological years in reference time period for calculating GROWA-SI (05) groundwater recharge.



Sl. 7. Ocena količin podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov, odvisnih od podzemne vode in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda.
Fig. 7. Assessment of groundwater quantity for groundwater dependent ecosystems conservation and achievement of surface waters good ecological status.

Povprečje napajanja plitvih vodonosnikov v petih najbolj sušnih letih obdobja 1981-2010 GROWA-SI (05) nakazuje razpon od 40 mm/leto na Goričkem do 555 mm/leto v Julijskih Alpah v porečju Soče (sl. 7, tabela 2). V povprečju gre na ozemlju Slovenije za 222 mm/leto povprečnega petletnega količinskega obnavljanja, kar je v primerjavi z obnovljivo količino podzemnih voda referenčnega obdobja 1981-2010 GROWA-SI (30) le 76,8 %.

Delež letnih obnovljivih količin podzemnih voda za ohranjanje ekološkega stanja površinskih voda je za celotno območje Slovenije 23,2 %. Največji je ta delež na območju severovzhodne Slovenije, kjer dosega 30 %, najmanjši pa v vzhodnih Alpah, Karavankah in Kamniško-Savinjskih Alpah s 16,6 % povprečnih letnih obnovljivih količin. Za ohranjanje ekološkega stanja površinskih voda so potrebne letne količine podzemne vode v razponu od 17 mm/leto za vodno telo podzemne vode Goričko in do 128 mm/leto za vodno telo Julijske Alpe v porečju Save. Rezultati predstavljajo izhodiščno orientacijo potrebne količine podzemne vode za ohranjanje dobrega ekološkega stanja površinskih voda in omogočajo prvo oceno letnih razpoložljivih količin podzemne vode na nivoju vodnih teles podzemne vode.

Za analizo doseganja dobrega ekološkega stanja površinskih voda ocenjujemo, da je stopnja zaupanja srednja, saj analiza ne vključuje sezonske spremenljivosti napajanja vodonosnikov (ANDJELOV et al., 2015).

Zaključek

Predstavljena ocena količin podzemnih voda za ohranjanje EOPV in dobrega ekološkega stanja površinskih voda je prva tovrstna ocena na celotnem območju države. Izdelana je bila v okviru Načrta upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja za obdobje 2015 – 2021 (NUV II) za namene ocene razpoložljivih količin podzemnih voda in količinskega stanja vodnih teles podzemne vode. Izhodiščni podatki za oceno so rezultati vodnobilančnega modela GROWA-SI (30) (ANDJELOV et al., 2013) in opredeljena območja EOPV na območjih Nature 2000 (ZRSVN, 2014). Te podatke smo skupaj z interpretacijo razpoložljivih rezultatov vsebinsko povezanih raziskav in poznavanjem hidrogeoloških značilnosti slovenskega ozemlja združili v metodologijo, ki posredno omogoča oceno razpoložljivih količin podzemnih voda za nadaljnje upra-

vljanje voda. Ocene so podane na ravni vodnih teles podzemne vode in namenjene predvsem strateškim odločitvam pri upravljanju podzemnih vodnih virov. Izračunane količine so zaenkrat le okvirna ocena, ki je zaradi pomanjkanja podatkov povezana z negotovostjo. Pridobitev podatkov o potrebah obravnavanih habitatnih tipov po podzemni vodi bo ena ključnih nalog v prihodnje. Prav tako vzpostavitev novega modelskega sistema v večji časovni resoluciji mGROWA-SI na Agenciji RS za okolje bo omogočala regionalni vpogled v sezonsko spremenljivost in nadaljnji razvoj metodologij, ki bodo izboljšale zanesljivost ocenjevanja količin podzemnih voda za obnavljanje in ohranjanje EOPV in dobrega ekološkega stanja površinskih voda.

Zahvala

Študija je nastala v okviru projektov Načrt upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja za obdobje 2015 – 2021 Ministrstva za okolje in prostor Republike Slovenije in IGCP 643 Urada za UNESCO, Slovenske nacionalne komisije za UNESCO ter raziskovalnega programa Podzemne vode in geokemija (P1-0020), ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. V študiji so bili za oceno obnavljanja količin podzemne vode uporabljeni rezultati projekta »Application of GROWA model for calculation groundwater recharge rates for Slovenia and implementation of GROWA at ARSO«, ki je potekal v okviru sodelovanja Agencije Republike Slovenije za okolje in raziskovalnega centra Jülich v Nemčiji.

Viri in literatura

- ARSO 2009: Metodologija za ugotavljanje stanja vodnih teles podzemne vode. Agencija RS za okolje. Internet: <http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/Metodologija.pdf> (12.06.2014).
- ARSO 2014: Rezultati vodnobilančnega modela GROWA-SI (digitalni informacijski sloj). Agencija RS za okolje.
- ANDJELOV, M., MIKULIČ, Z., UHAN, J. & DOLINAR, M. 2013: Vodna bilanca z modelom GROWA-SI za količinsko ocenjevanje vodnih virov Slovenije. 24. Mišičev vodarski dan, 127-133. Internet: <http://mvd20.com/LETO2013/R17.pdf> (14.08.2015).
- ANDJELOV, M., FRANTAR, P., MIKULIČ, Z., PAVLIČ, U., SAVIČ, V., SOUVENT, P., TRIŠIČ, N. & UHAN, J. 2015: Količinsko stanje podzemnih voda v

- Sloveniji. Osnove za NUV 2015 – 2021 (poročilo). Agencija RS za okolje, Ljubljana: 67 p.
- ANDJELOV, M., FRANTAR, P., MIKULIČ, Z., PAVLIČ, U., SAVIČ, V., SOUVENT, P. & UHAN, J. 2016: Ocena količinskega stanja podzemnih voda za Načrt upravljanja voda 2015–2021. *Geologija*, 59/2:205–219, [doi:10.5474/geologija.2016.012](https://doi.org/10.5474/geologija.2016.012).
- BREDEHOEFT, J.D., PAPADOPOULOS, S.S. & COOPER, H.H. 1982: Groundwater: the Water Budget Myth. In: Scientific Basis of Water-Resource Management, Studies in Geophysics. National Academy Press, Washington, DC: 51–57.
- BROWN, R.H. 1963: The cone of depression and the area of diversion around a discharging well in an infinite strip aquifer subject to uniform recharge. In: BENTALL, R. (ed.): Shortcuts and special problems in aquifer tests. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1545-C: 69–85.
- BULOG, B. 2012: Ocena okoljskega onesnaženja kraškega podzemlja v Jelševniku pri Črnomlju in vplivi na črno podvrsto močerila (*Proteus anguinus* parkelj, Amphibia, Proteidae). Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo: 17 p.
- ČATER, M. 2002: Vpliv svetlobe in podtalnice na naravno in sajeno dobovo mladje (*Quercus robur* L.) v nižinskem delu Slovenije = Effect of light and groundwater table on natural and planted seedlings of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in lowland parts of Slovenia (specialist and scientific works, 120). Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana: 115 p.
- DIREKTIVA, 1992: Direktiva Sveta 92/43/EGS z dne 21. maja 1992 o ohranjanju naravnih habitatov ter prostoživečih živalskih in rastlinskih vrst..
- DIREKTIVA, 2000: Direktiva 2000/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2000, ki določa okvir za delovanje Skupnosti na področju vodne politike.
- DREO, T. 2016: Bakterijske bolezni gozdnega drevja = Bacterial diseases of forest trees. In: JURČ, M. (ed.): Invazivne tujerodne vrste v gozdovih ter njihov vpliv na trajnostno rabo gozdnih virov: zbornik prispevkov posvetovanja z mednarodno udeležbo = Invasive alien species in forests and their impact on the sustainable use of forest resources: lectures presented at the conference with international participation. XXXIII. Gozdarski študijski dnevi/Forestry Study Days, Ljubljana, 14.–15. april 2016: 25–33.
- EISELE, M., STEINBRICH, A., HILDEBRAND, A. & LEIBUNDGUT, C. 2003: The significance of hydrological criteria for the assessment of the ecological quality in river basins. *Phys. Chem. Earth*, 28/12–13: 529–536, [doi:10.1016/S1474-7065\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00092-5).
- EUROPEAN COMMISSION 2009: Guidance on groundwater status and trend assessment. WFD CIS Guidance Document No. 18. Technical Report 026–2009. 82 p.
- EUROPEAN COMMISSION 2011: Technical report on Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems. WFD CIS Guidance Document No. 6. Technical Report 056–2011. 32 p.
- HENRIKSEN, H.J., TROLDBORG, L., HØJBERG, A.L. & REFSGAARD, J.C. 2008: Assessment of exploitable groundwater resources of Denmark by use of ensemble resource indicators and a numerical groundwater – surface water model. *J. Hydrol.*, 348/1–2: 224–240, [doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.056](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.056).
- MACE, R.E., MULLICAN, W.F. & WAY, T.S. 2001: Estimating Groundwater Availability in Texas Sources of Water Available from an Aquifer Availability Bookends: From Nothing to Everything. In: 1st annual Texas Rural Water Association and Texas Water Conservation Association Water Law Seminar. Water Allocation in Texas: The Legal Issues. Austin, Texas: 1–16.
- MELJO, J., DREV, D., KRAJČIČ, J. & CVEJČ, R. 2013: Analiza razpoložljivih zalog podzemne in površinske vode ter obstoječe in predvidene rabe vode za obdobje do 2021 (DDU26) (vmesno poročilo). Inštitut za vode RS, Ljubljana: 53 p.
- MEZGA, K., JANŽA, M., ŠRAM, D. & KOREN, K. 2015: Priprava strokovnih podlag in strokovna podpora pri izvajanju vodne direktive za področje podzemnih voda (Direktiva 2000/60/EC), 2. UKREP DDU26: Analiza razpoložljivih zalog podzemne vode in površinske vode ter obstoječe in predvidene rabe vode za obdobje do 2021 – Pregled ekosistemov odvisnih od stanja podzemnih vod (končno poročilo). Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 77 p.
- MEZGA, K., JANŽA, M., PRESTOR, J., KOREN, K. & ŠRAM, D. 2016: Groundwater dependent ecosystems – groundwater status indicators. *Natura Sloveniae*, 18/1: 35–42.
- MIKULIČ, Z., UHAN, J., JANŽA, M., ANDJELOV, M. 2015: Assessment of renewable and available groundwater resources for water management planning. 42nd IAH Congress, T6 Groundwater Governance and Management, Rome: 65 p.

- MOP 2016: Načrt upravljanja voda za vodno območje Donave za obdobje 2016–2021 in Načrt upravljanja voda za vodno območje Jadranskega morja za obdobje 2016 – 2021 (NUV II; osnutek - september 2016). Ministrstvo za okolje in prostor. Internet: http://www.mop.gov.si/si/delovna_podrocja/voda/ (12.09.2016).
- REJIC, M. & SMOLEJ, I. 1988: Sladkovodni ekosistemi in varstvo voda. Gozdna hidrologija, VTOZD za gozdarstvo Biotehniška fakulteta, Ljubljana: 225 p.
- RICHARDSON, S., IRVINE, E., FROEND, R., BOON, P., BARBER, S., BONNEVILLE, B. 2011: The Australian groundwater-dependent ecosystems toolbox part 1: Assessment Framework. Waterlines Report Series No. 69, Natural water Commission Canberra: 101 p. Internet: http://nwc.gov.au/_data/assets/pdf_file/0006/19905/GDE-toolbox-part-1.pdf (02.02.2015).
- RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., WIGINGTON, R. & BRAUN, D.P. 1997: How much water does a river need? *Freshw. Biol.* 37/1, 231–249, [doi:10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x).
- SCHLÜTER, H. 2006: Ermittlung des nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots in stark genutzten Teileinzugsgebieten – Beurteilung des mengenmäßigen Zustandes gemäß EU Rahmenrichtlinie Wasser. Ph.D. Thesis. Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus: 193 p.
- SKET, B. 1997: Distribution of Proteus (Amphibia: Urodela: Proteidae) and its possible explanation. *J. Biogeogr.*, 24/3: 263–280, [doi:10.1046/j.1365-2699.1997.00103.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1997.00103.x).
- SMITH, A.J., WALKER, G. & TURNER, J. 2010: Aquifer Sustainability Factor: a review of previous estimates. Whitepaper. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO).
- SOUVENT, P., VIŽINTIN, G., CELARC, S. & ČENČUR CURK, B. 2014: Ekspertni sistem za podporo odločanju na aluvialnih telesih podzemnih voda Slovenije. *Geologija*, 57/2: 245–252, [doi:10.5474/geologija.2014.021](https://doi.org/10.5474/geologija.2014.021).
- SUN, G., McNULTY, S.G., LU, J., AMATYA, D.M., LIANG, Y. & KOLKA, R.K. 2005: Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States. *J. Hydrol.*, 308/1–4: 258–268, [doi:10.1016/j.jhydrol.2004.11.021](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.021).
- ŠRAJ, M. 2003: Določanje indeksa listne površine listnatega gozda na povodju Dragonje – 1. del: Metode in meritve = Estimating Leaf Area Index of the Deciduous Forest in the Dragonja Watershed – Part I: Methods and Measuring. *Acta hydrotechnica*, 21/35: 105–128.
- ŠRAJ, M. 2009: Prestrežne padavine: meritve in analiza = Intercepted precipitation: measurements and analysis. *Geografski vestnik*, 81/1: 99–111.
- TENNANT, D.L. 1976: Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources, in Instream flow needs, Volume II: Boise, ID, Proceedings of the symposium and specialty conference on instream flow needs, May 3–6, American Fisheries Society, p. 359–373.
- THEIS, C.V. 1940: The source of water derived from wells-essential factors controlling the response of an aquifer to development. *Civ. Eng.*, 10: 277–280.
- TOME, S. 2010: Ogroženost gozdov. *Naravoslovna solnica*, 14/2: 8–13.
- TYREE, M.T. 1999. Water relation of plants. V: BAIRD A.J. & WILBY R.L. (eds.): *Eco-hydrology: Plants and water in Terrestrial and aquatic Environments*. Routledge, London: 11–38.
- URADNI LIST RS 2004: Uredba o posebnih varstvenih območjih (območjih Natura 2000). Uradni list RS, št. 49/2004.
- URADNI LIST RS 2009: Uredba o kriterijih za določitev ter načinu spremljanja in poročanja ekološko sprejemljivega pretoka. Uradni list RS, št. 97/2009.
- ZHOU, Y. 2009: A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *J. Hydrol.*, 370/1–4: 207–213, [doi:10.1016/j.jhydrol.2009.03.009](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.009).
- ZRSVN 2014: Pregled ekosistemov odvisnih od podzemni vod (digitalni informacijski sloj). Zavod RS za varstvo narave.

Internetni viri:

- INTERNET: Groundwater dependent ecosystems, WetlandInfo 2014, Queensland Government, Queensland: <http://wetlandinfo.ehp.qld.gov.au/wetlands/ecology/aquatic-ecosystems-natural/groundwater-dependent/> (14.03.2015)



***Distephanopsis concavus* Horvat: a revised silicoflagellate species from the Middle Miocene of the Central Paratethys**

Revizija srednjemiocenske silikoflagelatne vrste *Distephanopsis concavus* Horvat

Aleksander HORVAT

Ivan Rakovec Institute of Palaeontology, Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts,
Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenia; e-mail: ahorvat@zrc-sazu.si

Prejeto / Received 18. 10. 2016; Sprejeto / Accepted 22. 11. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Key words: silicoflagellates, biostratigraphy, Middle Miocene, Badenian, Central Paratethys

Ključne besede: silikoflagelati, biostratigrafija, srednji miocen, badenij, Centralna Paratetida

Abstract

The silicoflagellate species *Distephanopsis concavus* Horvat is revised based on further research of the type material. This species is characterized by having a basal ring with strongly concave sides which reduce the basal ring area and by four symmetry planes which are morphological characteristics not known in other *Distephanopsis* species. The species was found in Middle Miocene deposits of the Central Paratethys. Its occurrence at type locality in SE Slovenia is dated to late Middle Badenian and is correlated to the upper part of the nannoplankton biozone NN5.

Izvleček

V prispevku je na osnovi detajlnje študije tipskega materiala podana revizija silikoflagelatne vrste *Distephanopsis concavus* Horvat. Za vrsto so značilne izrazito konkavne stranice bazalnega obroča in štiri simetrijske ravnine, kar niso morfološke značilnosti ostalih poznanih vrst rodu *Distephanopsis*. Vrsta je najdena v srednjemiocenskih plasteh zahodnega dela Centralne Paratetide. Stratigrafska razširjenost vrste v tipskem najdišču je zgornji del srednjega badenija in je korelirana z zgornjim delom nanoplanktonske biocone NN5.

Introduction

After the isolation of the Paratethys from the Tethys, silicoflagellates became rare and their occurrences were limited to the Badenian and Sarmatian (Middle Miocene). Their rare occurrence in the Central Paratethys is due to the varying ecological conditions resulting from intense tectonics, eustatic changes and seaway connections to the Mediterranean sea and Indo-Pacific area. In the Central Paratethys silicoflagellates only appear in the sequences of eustatic maxima (BACHMANN et al., 1963; BACHMANN, 1971; HAJÓS, 1968; DUMITRICĂ, 1978). This is also the case in Slovenia where Middle Miocene diatomaceous sediments with silicoflagellates have only been discovered in fragmentary sections in the Krško basin (HORVAT, 2004).

So far the occurrences of silicoflagellates are well known only in the central part of the Pannonian basin, that is, in the Intracarpathian area and Vienna basin in Austria, Hungary and Czech Republic (BACHMANN et al., 1963; BACHMANN, 1971; HAJÓS, 1968; DUMITRICĂ, 1978). From the western part of the Central Paratethys, only two localities with Badenian silicoflagellates have been reported so far (HORVAT, 2004). Siliceous microfossils occur around the localities Šmarjeta and Šentjernej in the Krško basin (Fig. 1) where a silicoflagellate assemblage comparable to that of other Badenian Paratethys localities was found. This assemblage contained a new species *Distephanopsis concavus* (HORVAT, 2004), which was only introduced by a short description in Slovenian with no type designation. The aim of this paper is to provide all the data necessary to establish the validity of

this species in accordance with the International Code of Zoological Nomenclature. Biostratigraphy and palaeoecology of the assemblage with *Distephanopsis concavus* at its type locality are discussed as well.

Paleogeographic framework and geological setting

The Miocene sedimentary successions of western part of Central Europe are generally related to the Paratethys, which resulted from a process of final disintegration of the Tethys Ocean due to movement and subduction of Africa beneath the European plate and the counterclockwise rotation of the Eastern Alps (RASSER & HARZHAUSER, 2008). A new paleogeographic unit formed, called the Paratethys, whose development was at times independent of that of the Mediterranean. Within the Paratethys, two main sedimentary basins – the Central Paratethys in the west and the Eastern Paratethys in the east can be distinguished that were separated from each other by land. Their evolution was controlled by regional tectonic events, sea-level changes and by sediment

infill. The combination of these processes resulted in changes in marine, brackish and freshwater ecological conditions in the sedimentary basins as well as in the restricted connections of the Central Paratethys with the Mediterranean sea, and across it with the Atlantic to the west, and with the Eastern Paratethys and the Indo-Pacific to the east. Middle Miocene diatomaceous sedimentary rocks rich in silicoflagellates and diatoms have been recorded from the entire Central Paratethys. In spite of their wide geographical distribution, diatomaceous sediments in the Central Paratethys occur in temporally limited sequences, usually in sedimentary rocks with low carbonate content. Therefore, they are rarely found in continuous sections and generally can not be traced laterally over large distances and they are not easily attributed to defined formations. This is also the case in Slovenia where Middle Miocene diatomaceous sediments have only been discovered in fragmentary sections in the Krško basin and in the Tuhinj syncline (HORVAT, 2004). All localities are situated south of the Sava and Donat faults (Fig. 1). Miocene sediments in the westernmost parts of the Pan-

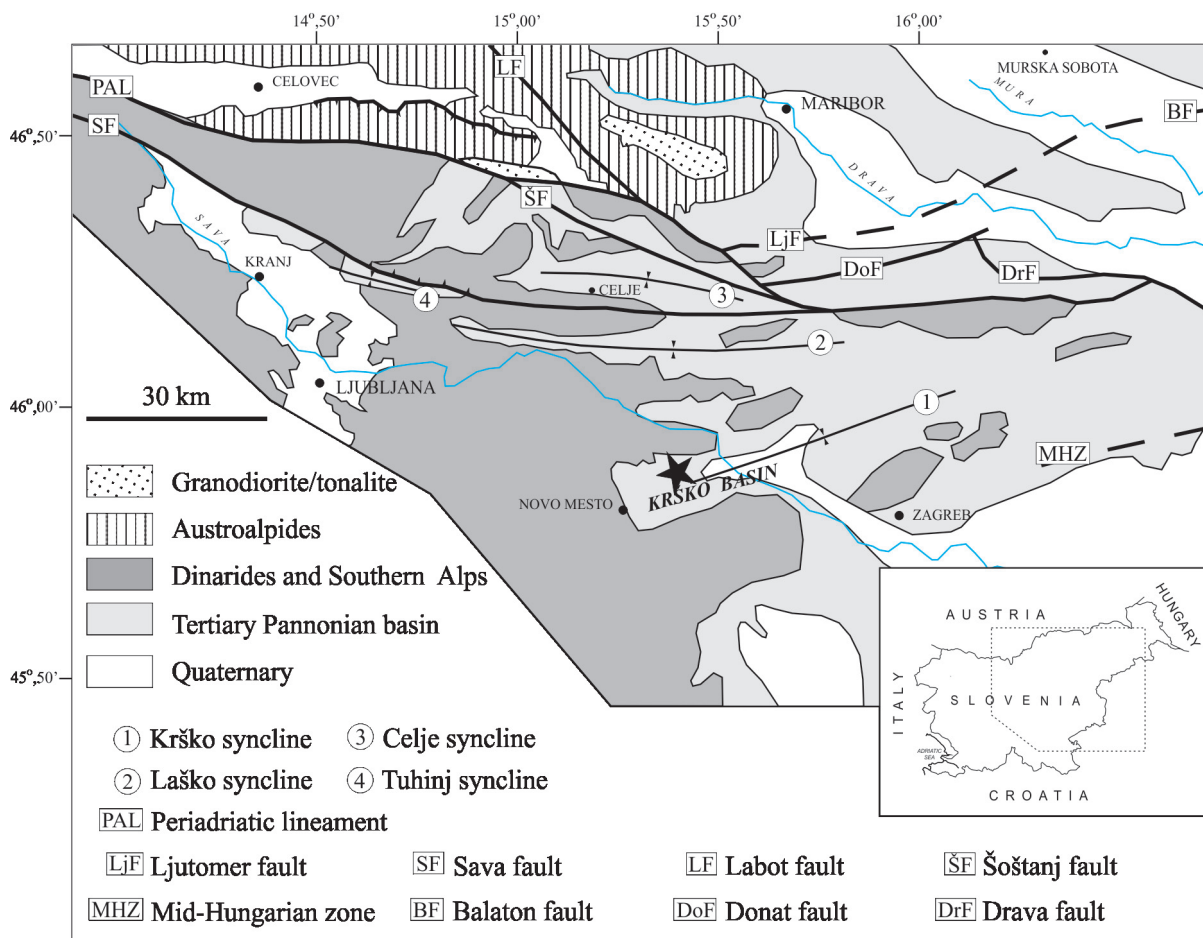


Fig. 1. Simplified tectonic map with location (star symbol) of the Šmarjeta section, *Distephanopsis concavus* type locality (from HORVAT, 2004).

nonian basin (*sensu lato*) unconformably overlies Mesozoic sedimentary successions of the Internal and External Dinarides.

The type section Šmarjeta was logged in the roadcut of the Šmarjeta - Zbure road (45°51'252"N; 15°14'48" E; elev. 208 m). The section consists of dark grey to green grey carbonate siltstone beds usually termed "Baden Tegel", which is a typical Badenian formation of the Central Paratethys (Fig. 2). The under- and overlying beds are not exposed in the area. In the succession frequent fragments of Badenian turritellids and rare remains of scaphopods, oysters, and very rare pereiraeas [*Pereiraea gervaisi* (Vézian)] also occur. Siliceous microfossils in all samples are rare. In general, only remains of sponge spicules and rare endoskeletal dinoflagellates occur. Modest diatom and silicoflagellate assemblage were found only in the sample Šm-5 (Fig. 2). Rare fragments of silicoflagellates are found also in the nearby Šentjernej location, where a rich Badenian malacofauna (MIKUŽ, 2009) and diatom flora (HORVAT, 2003a) also occur.

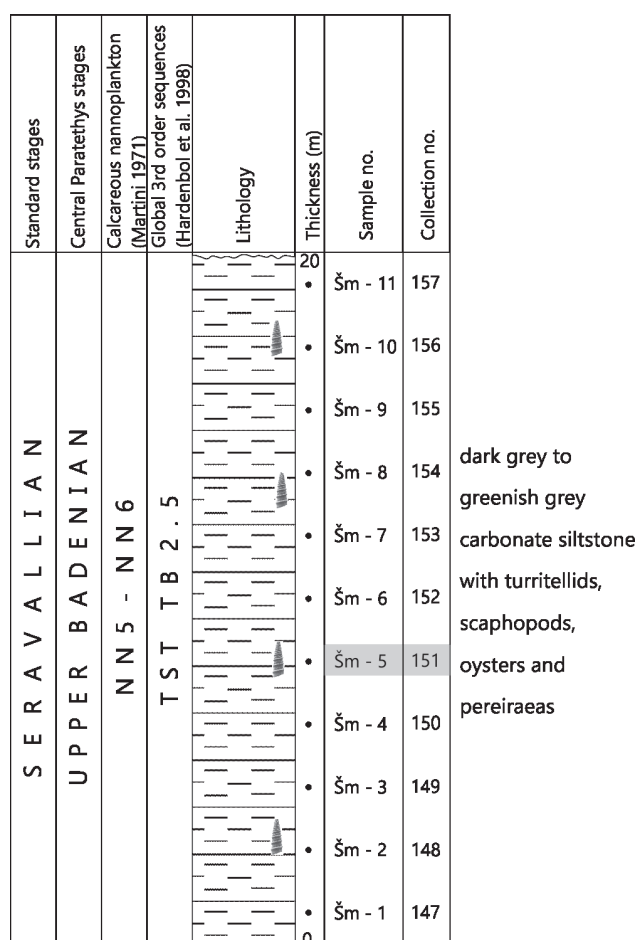


Fig. 2. Stratigraphic column of the *Distephanopsis concavus* type section (section Šmarjeta). Shaded area marks the sample with the type material.

Materials and methods

For micropaleontological preparation 3 g of dry sediment were treated following the method of SCHRADER & FENNER (1976). For slides preparation 2 ml of suspension were placed on a glass slide. After the water was evaporated, the slide was covered by 18 × 18 mm cover-glass. The mounting medium was Entellan. Slides were examined using a Carl Zeiss-Amplival light microscope with planchromatic objective under 1000× magnification.

Systematic description

Systematic classification is given after Desikachary & Prema (1996), and two internet databases (INTERNET 1 and INTERNET 2).

Kingdom Chromista Corliss, 1994
 Phylum Heterokontophyta Van de Hoek, Mann & Jahns, 1995
 Classis Dictyochophyceae Silva, 1980
 Order Dictyochales Haeckel, 1894
 Family Distephanaceae Locker, 1974
 Genus *Distephanopsis* Dumitrică, 1978
 Type species *Distephanopsis crux* (Ehrenberg) Dumitrică, 1978

Distephanopsis concavus Horvat (Pl. 1, figs. 1-10)

2004 *Distephanopsis concavus* n. sp.; HORVAT: 29, pl. 5, figs. 1-5.

Note: Because of the incomplete original descriptions in HORVAT (2004) the species is revised and fully described herein.

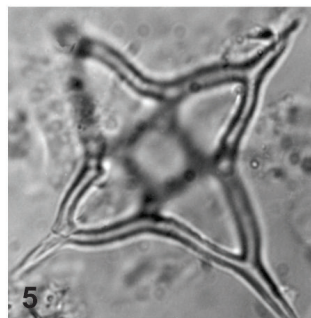
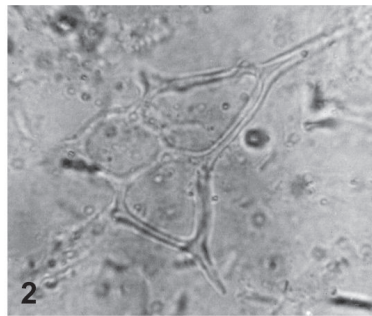
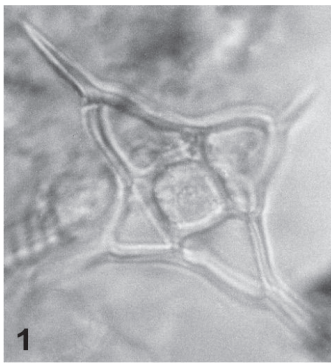
Derivation of name: The name was given after characteristically concave shape of the basal ring.

Diagnosis: A species of *Distephanopsis* with concave sided basal ring.

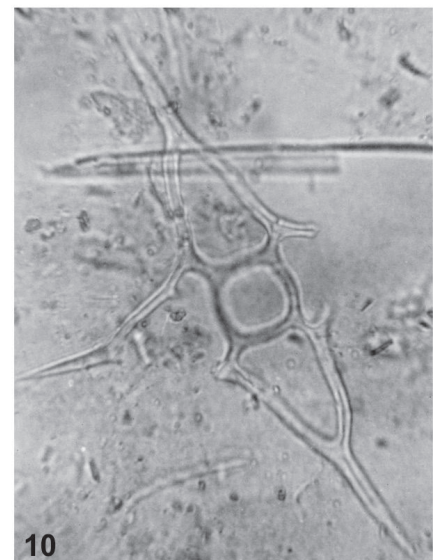
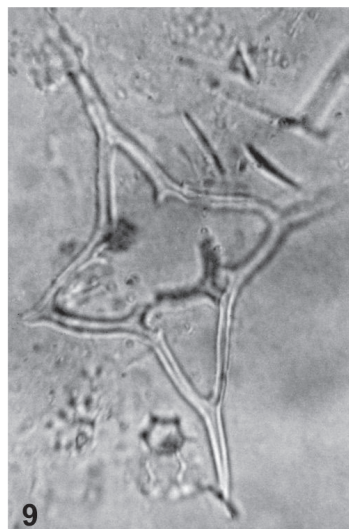
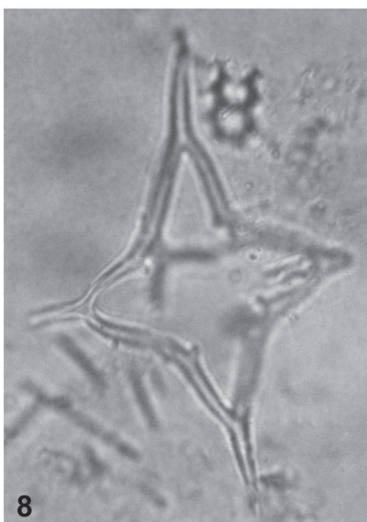
Type designation: Holotype: Pl. 1, fig. 1, paratypes: Pl. 1, figs. 2-10. Section Šmarjeta, SE Slovenia, sample Šm-5. The slide is stored at the Ivan Rakovec Institute of Palaeontology Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts. The collection number of the slide is D151.

Type locality: Šmarjeta section (45°51'25"N; 15°14'48"E; elev. 208 m) on the northern part of the Krško basin, SE Slovenia.

PLATE 1



10 μm



1 – 10 *Distephanopsis concavus* Horvat

1 holotype; 2-10 paratypes, section Šmarjeta, sample Šm-5 (coll. no. D-151)

Description: Large square basal ring with concave sides. Apical ring square, connected to basal ring in the places of maximum constriction and with sides parallel with the major and minor axes of skeleton. Basal spines are long and of equal length. The concavity of the basal ring and equal basal spines resulted in four symmetry planes. Sustaining spines very short and always on the right of lateral bars.

Dimensions: Length of basal ring without spines 33–46 µm (holotype 33 µm) and width of basal ring without spines 27–42 µm (holotype 27 µm).

Remarks: *Distephanopsis concavus* is distinguished from other *Distephanopsis* species by the advanced concavity of the basal ring, which reduces the basal ring area. The function of the basal ring is in controlling the sinking rate and orientation of the organism (SARJEANT et al., 1987; MCCARTNEY & LOPER, 1989). MCCARTNEY & LOPER (1989) indicated the importance of minimizing silicoflagellate surface area in minimizing the utilization of skeletal material but their model only considered the apical surface area while the basal ring was excluded. The reason for the geometric simplification of the protist skeletons that are so extremely sensitive to environmental changes has been explained by ecological stress whereas stable environment conditions favour evolution towards more complex geometries and increase of symmetry (GUEX, 2006). In this sense *Dss. concavus* can be regarded as an advanced morphotype that evolved from *Dss. crux* during times of ecological stability.

Dss. crux Ehrenberg and other *Distephanopsis* species have straight or slightly convex basal ring. In addition, *Dss. crux* Ehrenberg usually has differentiated radial spines, those lying in the major axis being longer than those lying in the minor axis, while *Dss. concavus* has radial spines of equal length.

A basal ring of *Distephanopsis stradneri* (Jerković) Desikachary & Prema is sometimes slightly concave in the middle part of the skeleton (JERKOVIĆ, 1965: figs. 43–45; JERKOVIĆ, 1969: pl. 2, fig. 2; PERCH-NIELSEN, 1985: figs. 20/16, 17) but this concavity is less pronounced than that of *Dss. concavus*. *Dss. stradneri* also has a smaller apical ring and radial spines of different length.

By size and concavity of the basal ring *Distephanopsis concavus* is similar to *Distephanus norvegiensis* Perch-Nielsen (PERCH-NIELSEN, 1985, fig. 19/2), but *Ds. norvegiensis* has 5-sided basal ring, 5 radial spines, and smaller apical ring.

Age: Late Middle Badenian (Middle Miocene), upper part of the nannoplankton biozone NN5.

Discussion

Stratigraphy

The following silicoflagellate assemblage (Pl. 2, figs. 1–11) was observed and described from the Middle Miocene sections in the Krško basin (HORVAT, 2004): *Septamesocena apiculata apiculata* (Schulz) Bachmann, *Mesocena diodon diodon* Ehrenberg, *Dictyocha fibula* Ehrenberg, *Distephanopsis crux crux* (Ehrenberg), *Distephanopsis longispinus* (Schulz) Desikachary & Prema, *Distephanopsis crux parvus* (Bachmann) Bukry, *Distephanopsis crux scutulatus* (Bukry) Desikachary & Prema, *Distephanopsis stradneri* (Jerković) Desikachary & Prema, *Distephanus speculum* (Ehrenberg) Haeckel, *Cannopilus hemisphaericus* (Ehrenberg) Haeckel, *Paracannopilus picasso* (Stradner), and *Distephanopsis concavus* Horvat. The assemblage is comparable to those of other Badenian localities in the Paratethys (BACHMANN et al., 1963; BACHMANN, 1971; HAJÓS, 1968; DUMITRICĂ, 1978).

The standard silicoflagellate biozonation of MARTINI (1971, 1972) attributes the upper part of the Lower Miocene and the Middle Miocene to the unique *Corbisema triacantha* biozone. BUKRY (1981) and PERCH-NIELSEN (1985) divided Martini's *Corbisema triacantha* biozone into two subzones: the lower *Cannopilus schulzii* subzone (corresponding to the NN4 and NN5) and the upper *Distephanus stauracanthus* subzone (corresponding to NN6 and NN7). DUMITRICĂ (1978) distinguished two silicoflagellate assemblages in the Central Paratethys: the Lower Badenian '*Paracannopilus picasso* assemblage' and the Upper Badenian '*Distephanopsis stauracanthus* assemblage'. The assemblage from the Šmarjeta section can be compared with Dumitrică's '*Paracannopilus picasso* assemblage' (HORVAT, 2004).

HAJÓS (1986) proposed for the Badenian the *Dyctyocha fibula* - *Distephanus crux* v. *longispina* biozone that chronologically corresponds the late Early Badenian and Middle Badenian.

Based on calcareous nannofossil dating, the Šmarjeta section can be placed in the upper part of the biozone NN5 which can be correlated with the upper part of the Middle Badenian. Nannofossils in all samples are moderately to well preserved. Individual samples contain 9-21 species (15 on average). The presence of very rare specimens of *Sphenolithus heteromorphus* Deflandre in most samples, including the top sample, together with the absence of *Helicosphaera ampliaperta* Bramlette & Wilcoxon, allow the assignment of the studied interval to the biozone NN5. The presence of rare specimens of the large morphotype (>7µm) of *Reticulofenestra pseudoumbilica* (Gartner) Gartner in samples Šm-1, Šm-4, and Šm-7 as well as rare specimens of *Sphenolithus abies* Deflandre in samples Šm-4 and Šm-10 is consistent with the upper part of the nannoplankton biozone NN5 (BARTOL, pers. com.).

Despite the absence of *Corbisema triacantha* as the type species of the upper part of Middle Badenian and comparison of the DUMITRICĂ'S (1978) Central Paratethys Lower Badenian assemblage the age of *Distephanopsis concavus* could not be Lower Badenian but late Middle Badenian.

Paleoecology

The paleoecology of the Badenian silicoflagellates of the Krško basin could be deduced from co-occurring diatoms. The Badenian diatom assemblage in the Krško basin has a transgressive character. It is dominated by resting spores of *Chaetoceros* spp. and *Thalassionema nitzschioides* (Grunow) Mereschowsky (HORVAT, 2003b, 2012) which are usually thought to reflect stronger coastal upwelling conditions and high seasonal primary production (BARRON, 1986; BÁRCENA & ABRANTES, 1998; BÁRCENA et al., 2001; BURCKLE, 1984; MAYNARD, 1976; ABRANTES, 1991; SANCETTA, 1999, NAVE et al., 2001; BOOTH et al., 2002). The structure of the diatom assemblage of the Krško basin suggests nutrient-enriched waters, which were transported laterally from the center of upwelling that was located to the west of the study area, presumably in the zone of mixing of warm proto-Mediterranean and cool Atlantic water masses (HORVAT, 2004, 2012; BARTOL et al., 2014).

Acknowledgements

The work was part of the Research Program P1-0008 financially supported by the Slovenian Research Agency. I am grateful to Miloš Bartol for calcareous nannoplankton analyses. I wish to thank Paulian Dumitrică and Kevin McCartney for reviewing the early version of the manuscript and for their constructive comments and suggestions and two anonymous reviewers for their comments, which greatly improved the manuscript.

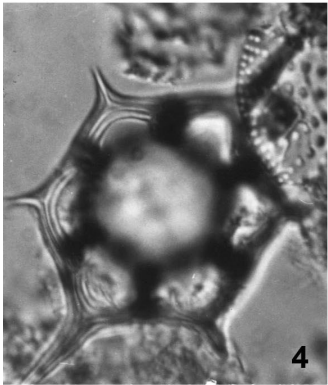
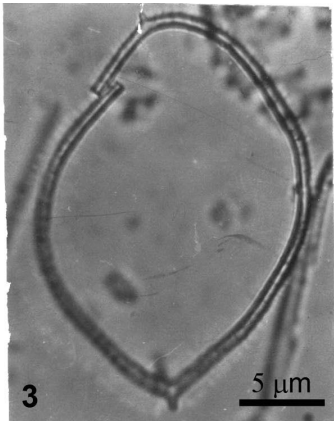
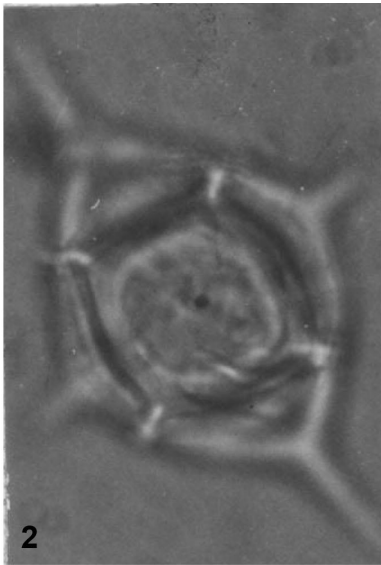
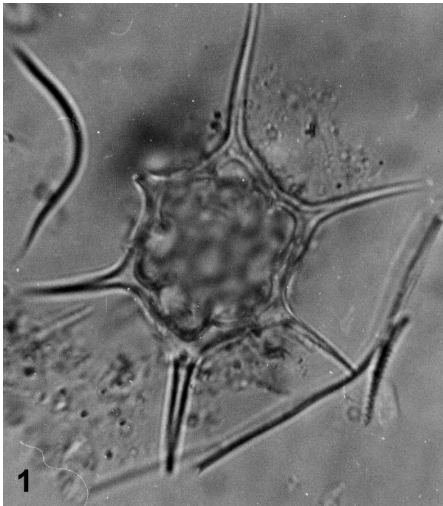
PLATE 2

Silicoflagellate assemblage of the *Distephanopsis concavus* type section Šmarjeta (sample Šm-5).

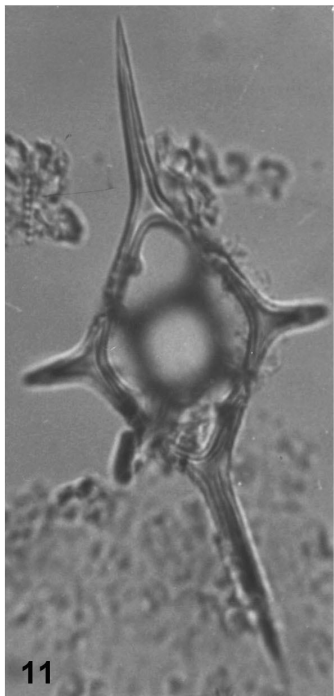
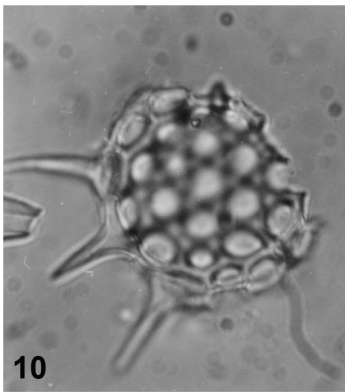
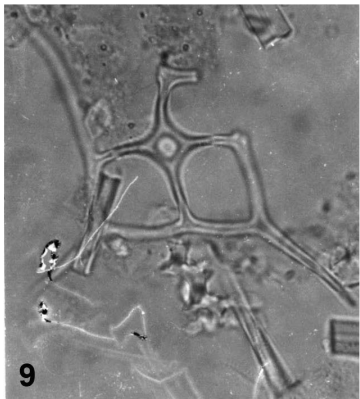
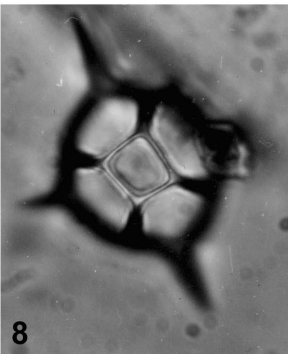
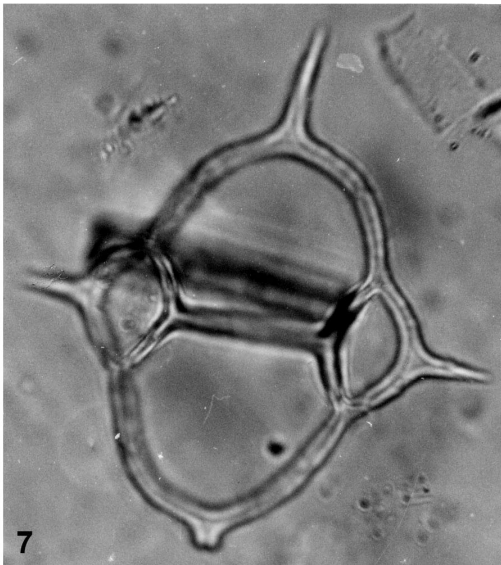
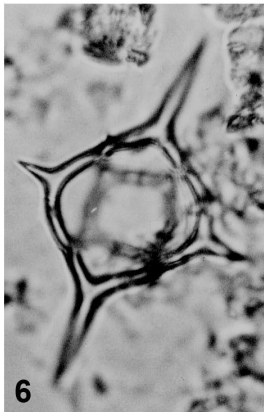
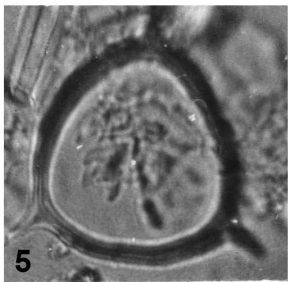
- 1 *Cannopilus hemisphaericus* (Ehrenberg) Haeckel
- 2 *Distephanopsis crux crux* (Ehrenberg)
- 3 *Mesocena diodon diodon* Ehrenberg
- 4 *Distephanus speculum* (Ehrenberg) Haeckel
- 5 *Septamesocena apiculata apiculata* (Schulz) Bachmann
- 6 *Distephanopsis crux scutulatus* (Bukry) Desikachary & Prema
- 7 *Dictyocha fibula* Ehrenberg.
- 8 *Distephanopsis crux parvus* (Bachmann) Bukry
- 9 *Distephanopsis stradneri* (Jerković) Desikachary & Prema
- 10 *Paracannopilus picasso* (Stradner)
- 11 *Distephanopsis longispinus* (Schulz) Desikachary & Prema

Scale bar 10 µm except fig. 3 (5 µm)

PLATE 2



10 μm



References

- ABRANTES, F. 1991: Increased upwelling off Portugal during the last glaciation: Diatom evidence. *Marine Micropaleontology*, 17: 285–310.
- BACHMANN, A. 1971: Silicoflagellaten aus dem obern Badenien von Walbersdorf, Burgenland. *Sitzungsberichte der Österreichische Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. Abteilung 1*, 179 (1970): 52–72.
- BACHMANN, A., PAPP, A. & STRADNER, H. 1963: Mikropalaontologische Studien im "Badener Tegel" von Frattingsdorf N. O. *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft. Wien*, 56: 117–210.
- BÁRCENA, M.A. & ABRANTES, F. 1998: Evidence of a high productivity area off the coast of Málaga from studies of diatoms in surface sediments. *Marine Micropaleontology*, 35: 91–103.
- BÁRCENA, M.A., CACHO, I., ABRANTES, F., SIERRO, F.J., GRIMALT, J.O. & FLORES, J.A. 2001: Paleoproductivity variations related to climatic conditions in the Alboran Sea (Western Mediterranean) during the last glacial-interglacial transition: the diatom record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 167: 337–357.
- BARRON, J.A. 1986: Response of equatorial Pacific Diatoms to Polar Cooling during the Middle Miocene. In: PICARD, M. (ed.): *Proceedings of the Eight International Diatom Symposium 1984*. Koeltz Scientific. Books, Koenigstein, 591–600.
- BARTOL, M., MIKUŽ, V. & HORVAT, A. 2014: Palaeontological evidence of communication between the Central Paratethys and the Mediterranean in late Badenian/early Serravalian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 394: 144–157. [doi:10.1016/j.palaeo.2013.12.009](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.12.009)
- BOOTH, B.C., LARAUCHE, P., BÉLANGER, S., KLEIN, B., AMIEL, D. & MEI, Z.-P. 2002: Dynamics of *Chaetoceros socialis* blooms in the North Water. *Deep-Sea Research II*, 49: 5003–5025.
- BUKRY, D. 1981. Synthesis of silicoflagellate stratigraphy for Maastrichtian to Quaternary marine sediments. *Special Publication of Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 32: 433–444.
- BURCKLE, L. 1984: Diatom distribution and paleoceanographic reconstruction in the southern ocean: present and last glacial maximum. *Marine Micropaleontology*, 9: 241–261.
- DESIKACHARY, T.V. & PREMA, P. 1996: Silicoflagellates (Dictyochophyceae). *Bibliotheca Phycologica*, 100: 1–298, 83 pls.
- DUMITRIČÁ, P. 1978: Badenian Silicoflagellates from Central Paratethys. In: PAPP, A., CÍCHA, I., SENEŠ, J. & STEININGER, F. (eds.): *Chronostratigraphie und Neostatotypen. Miozän der Zentralen Paratethys. M4. Badenien*. Verlag der Slowakischen Akademie der Wissenschaften, Bratislava, 207–229.
- GUÉX, J. 2006: Reinitialization of evolutionary clocks during sublethal environmental stress in some invertebrates. *Earth and Planetary Science Letters*, 242/3–4: 240–253. [doi:10.1016/j.epsl.2005.12.007](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.12.007).
- HAJÓS, M. 1968: Die Diatomeen der Miozänen Ablagerungen des Matravorlandes. *Fasciculi Instituti Geologici Hungariae Series Paleontologica*, 37: 1–402, Pls. 1–63.
- HAJÓS, M. 1986: Stratigraphy of Hungary's Miocene diatomaceous earth deposits. *Fasciculi Instituti Geologici Hungariae Series Paleontologica*, 49: 1–339, Pls. 1–61.
- HARDENBOL, J., THIERRY, J., FARLEY, M.B., JACQUIN, T., DE GRACIANSKY, P.C. & VAIL, P.R. 1998: Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European Basins. In: DE GRACIANSKY, P.C., HARDENBOL, J., JACQUIN, T. & VAIL, P.R. (eds.): *Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of European Basins. SEPM Spec. Publ.*, 60: 3–13.
- HORVAT, A. 2003a: Badenian (Middle Miocene) diatoms (Bacillariophyta) from the western part of Central Paratethys. *Razprave 4. razreda SAZU*, 44/1: 5–55.
- HORVAT, A. 2003b: Upper Badenian diatom paleoecology of the western part of Central Paratethys. *Geologija*, 46: 251–262.
- HORVAT, A. 2004: Middle Miocene siliceous algae of Slovenia. ZRC Publishing House, Ljubljana: 255 p.
- HORVAT, A. 2012: Middle Miocene opal-rich facies of the Paratethys - evidence of upwelling or increased continental runoff stimulated productivity? In: MISSONI, S. & GAWLICK, H.-J. (eds.): *29th IAS Meeting of Sedimentology Abstract Book*, Schlading, pp. 536.
- JERKOVIĆ, L. 1965: Sur quelques silicoflagellidés de Yougoslavie. *Revue Micropaléontologie*, 8: 121–130.
- JERKOVIĆ, L. 1969: Silicoflagellides fossiles des environs de Zagreb, de Bosanska Kostajnica et de Derventa (Yougoslavie). *Godišnjak Biološkog Instituta Univerziteta Sarajevo*, 22: 21–128.

- MARTINI, E. 1971: Standard Tertiary and Quaternary calcareous nannoplankton zonation. In: FARINACCI, A. (ed.): Proceedings of the second planktonic conference, Vol. II. Edizioni Technoscienza, Roma, 739–786.
- MARTINI, E. 1972: Silicoflagellate zones in the late Oligocene and early Miocene of Europe. *Senckenbergiana Lethaea*, 53: 119–122.
- MAYNARD, N.G. 1976: Relationship between diatoms in surface sediments of the Atlantic Ocean and physical oceanography of overlying waters. *Paleobiology*, 2: 99–121.
- MCCARTNEY, K. & LOPER, D.E. 1989: Optimized skeletal morphologies of silicoflagellate genera *Dictyocha* and *Distephanus*. *Paleobiology*, 15: 283–298.
- MIKUŽ, V. 2009: Miocene gastropods from the vicinity of Šentjernej and from other localities in the Krka basin, Slovenia. *Folia Biologica et Geologica (Razpave 4. razreda SAZU)*, 50/2: 5–65.
- NAVE, S., FREITAS, P. & ABRANTES, F. 2001: Coastal upwelling in the Canary Island region: spatial variability reflected by the surface sediment diatom record. *Marine Micropaleontology*, 42: 1–23.
- PERCH-NIELSEN, K. 1985: Silicoflagellates. In: BOLLI, H. M., SAUNDERS, J. B. & PERCH-NIELSEN, K. (eds.): *Plankton stratigraphy*. Cambridge University Press, Cambridge-London, 811–849.
- RASSER, M.W. & HARZHAUSER, M. coord. 2008. Paleogene and Neogene. In: McCANN, T. (ed.): *The Geology of Central Europe*. Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic. Geological Society London, London, 1031–1139.
- SANCETTA, C. 1999: Diatoms and marine paleoceanography. In: STOERMER, E.F. & SMOL, J.P. (eds.): *The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences*. Cambridge Uni. Press, Cambridge, 374–386.
- SARJEANT, W.A., LACALLI, T. & GAINES, G. 1987: The cyst and skeletal elements of dinoflagellates: speculation on the ecological causes for their morphology and development. *Micropaleontology*, 33: 1–36.
- SCHRADER, H.-J. & FENNER, J. 1976: Norwegian Sea Cenozoic diatom biostratigraphy and taxonomy. Part I: Norwegian Sea Cenozoic diatom biostratigraphy. In: TALWANI, M. (ed.): *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 38: 921–1099, U.S. Gov. Print. Off., Washington.

Internet resources:

- INTERNET 1: <http://www.algaebase.org/> (1. 10. 2016).
- INTERNET 2: <http://www.gbif.org/> (1. 10. 2016).



A contribution to better understanding of structural characteristics and tectonic phases of the Boč region, Periadriatic Fault Zone

Prispevek k boljšemu razumevanju strukturnih značilnosti in tektonskih faz območja Boča v coni Periadriatskega preloma

Lea ŽIBRET

Research and Development in the Field of Natural Sciences, Černetova ulica 3A,
SI- 1000 Ljubljana, Slovenia; e-mail: zibret.lea@gmail.com

Prejeto / Received 3. 10. 2016; Sprejeto / Accepted 12. 12. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Key words: structural mapping, fault-slip analysis, palaeostress reconstruction, Periadriatic fault, Lavanttal fault, Donat zone, Pannonian Basin

Ključne besede: strukturno kartiranje, analiza zdrsov ob prelomnih ploskvah, rekonstrukcija paleonapetosti, Periadriatski prelom, Labotski prelom, Donačka cona, Panonski bazen

Abstract

The aim of this study was to determine properties of the tectonic contact between Permian/Mesozoic limestones and less competent Miocene clastites on the northeastern foothill of the Boč Mt. Because fault planes significantly mark the relief, this contact was studied by a detailed structural mapping, which showed that the Boč Mt. is limited by subvertical faults in its northeastern part. To ensure that mapped subvertical contact is compatible with regional geodynamics of the area, additionally paleostress analysis of fault-slip data was performed. Four individual paleostress tensor groups were documented in a wider Boč area and compared by published structural data from the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin. The oldest paleostress tensor group (Phase 1) is likely of Lower and Middle Miocene age and indicates SW-NE extension accommodated by W-E to WNW-ESE striking normal faults. Phase 2 can be correlated with Middle to Late Miocene NW-SE to WNW-ESE directed extension accommodated by NNE-SSW striking normal faults. Phase 3 is correlated with Late Miocene W-E directed contraction accommodated by N-S striking sinistral faults and NNE-SSW to NE-SW striking dextral faults. The youngest paleostress tensor group (Phase 4) fits well with Pliocene to Quaternary NNW-SSE to N-S directed contraction accommodated by NW-SE to W-E striking dextral faults and NE-SW striking reverse faults. Since the documented paleostress phases fits well with the geodynamic processes of the Alps-Dinarides-Carpathians territory the subvertical border in the northeastern part of Boč Mt. seems to be an acceptable structural solution. The study is important because the study area is located at interaction zone between two major Alpine fault systems: the Periadriatic and the Lavanttal faults.

Izvleček

Glavni namen raziskave je bil ugotoviti značaj tektonskega kontakta, ki poteka vzdolž severovzhodnega pobočja Boča v coni Periadriatskega in Labotskega preloma. Ker gre za kontakt med permskimi/mezozojskimi apnenci in manj kompetentnimi miocenskimi klastiti, prelomne ploskve, ki predstavljajo kontakt enot, v reliefu značilno izstopajo. Zato je raziskava temeljila na natančnem strukturnem kartiranju območja, ki je pokazalo, da je Boč na severovzhodnem delu omejen s subvertikalnimi prelomi. Rezultati terenskega kartiranja se ujemajo z regionalno geodinamiko območja, ki je bila preverjena s paleonapetostno analizo opazovanih zdrsov ob prelomnih ploskvah. V širši okolici Boča so bile dokumentirane štiri skupine paleonapetostnih tenzorjev, ki so bile nato primerjane z objavljenimi strukturnimi podatki iz prehodnega območja med Alpami, Dinaridi in Panonskim bazenom. Najstarejša faza (Faza 1) je najverjetneje spodnje do srednjemiocenske starosti in odraža ekstenzijo ozemlja v smeri SW-NE, ki jo vidimo na normalnih prelomih s slemenitvijo W-E do WNW-ESE. Faza 2 lahko primerjamo s srednje do zgornjemiocensko ekstenzijo ozemlja v smeri NW-SE do WNW-ESE, ki se odraža na normalnih prelomih s slemenitvijo NNE-SSW. Faza 3 je primerljiva z zgornjemiocensko kontrakcijo ozemlja v smeri W-E, ki se odraža na levozmičnih prelomih s slemenitvijo N-S in desnozmičnih prelomih s slemenitvijo NNE-SSW do NE-SW. Najmlajša faza (Faza 4) se dobro ujema s pliocensko kvartarno kontrakcijo ozemlja v smeri NNW-SSE do N-S in se odraža na desnozmičnih prelomih s slemenitvijo NW-SE do W-E in reverznh prelomih

s slemenitvijo NE-SW. Ker se dokumentirane paleonapetostne faze dobro ujemajo s poznanimi geodinamskimi procesi iz Alpsko-Dinarsko-Karpatskega območja, se subvertikalen kontakt vzdolž severovzhodnega dela Boča zdi sprejemljiva strukturna rešitev. Raziskava je pomembna tudi regionalno, predvsem iz razloga, ker raziskovano območje leži vzdolž con dveh regionalnih alpskih struktur.

Introduction

The study area is situated in the SW part of the Pannonian Basin (NE Slovenia, Fig. 1a), along the NE margin of 978 meters high Boč Mountain that is located within the Periadriatic fault zone (Fig. 1b).

The Boč Mt. is built of Permian and Mesozoic strata. These rocks have South Alpine origin and were only later during Lower Miocene (MANCKTELOW et al., 2001) transmitted eastward along the dextral Periadriatic fault. Wider Boč area was mapped by experts from the Geological survey of Slovenia (NOVAK et al., 2010) in 2008 and 2009 because this territory represents a possible source of thermal water springs in Rogaška Slatina (Fig. 2). However, the character of the Miocene/Permian-Mesozoic tectonic contact in the NE Boč region, which is important to evaluate the extension of the Rogaška Slatina aquifer system, could not be identified. On the existing geological map of the Boč Mountain area (Fig. 2; ANIČIČ & JURIŠA, 1984) this contact is interpreted as a post Middle Miocene subhorizon-

tal thrust of Mesozoic carbonates over Miocene strata (Fig. 2). In more recent structural studies the tectonic evolution of the Boč Mt. is genetically linked with formation of duplex structure within dextral transpressive Donat zone (FODOR et al. 1998; MARTON et al., 2002). To answer the question, whether mentioned contact is subhorizontal thrust or subvertical fault, a detailed structural mapping of approximately 4 km² wide area on the N foothill of the Boč Mt. (Fig. 2) at the scale of 1 : 5000 was conducted (ŽIBRET, 2009). Kinematic characteristics of the mapped contact were estimated by detailed field investigation of structural elements and paleostress analysis of fault-slip data collected within Upper Triassic, Oligocene-Miocene and Middle Miocene rocks. Documented stress orientations were further compared with available structural data from the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin to show its regional kinematic compatibility. Results of this research improved the knowledge base about regional tectonics within the contact zone of South Alpine and Pannonian Basin units.

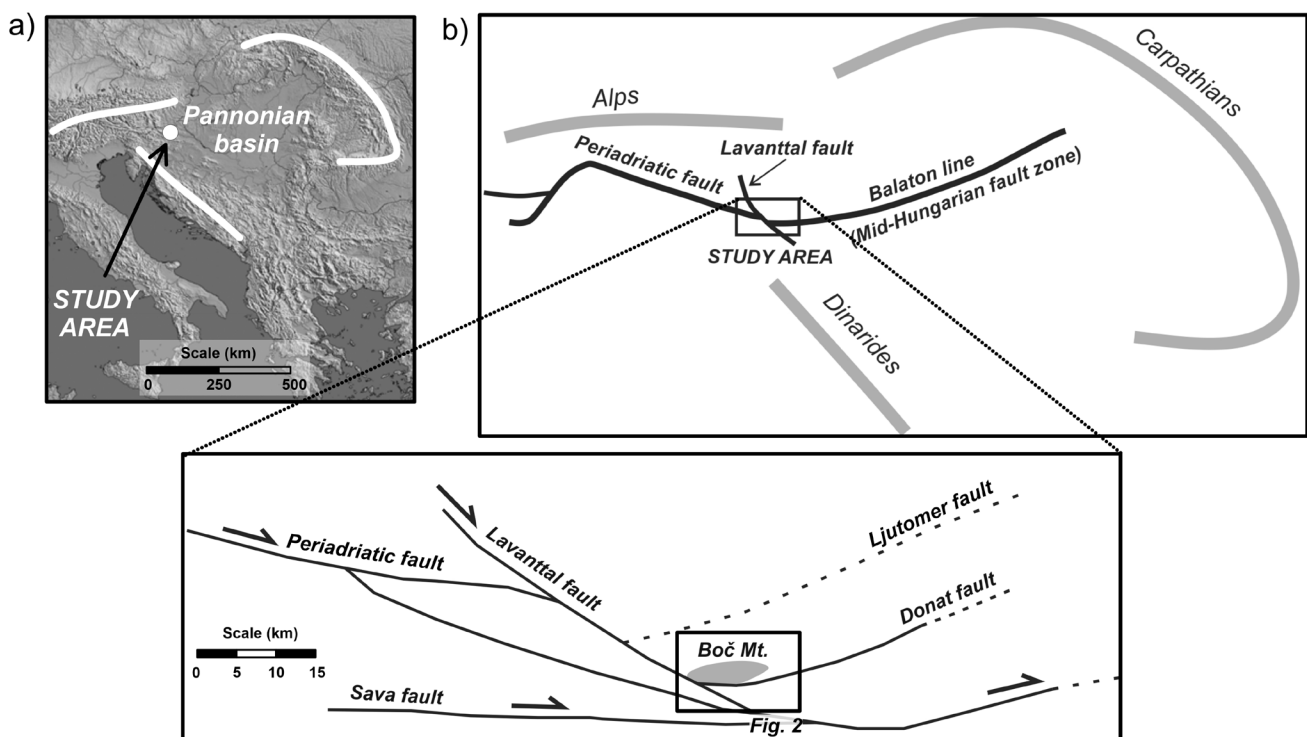


Fig. 1. The location of the study area, Boč Mt. a) in Alps-Dinarides-Carpathians domain; b) in regional tectonic framework with delineated tectonic units and structural domains (after PLACER, 1998 and SCHMID et al., 2008).

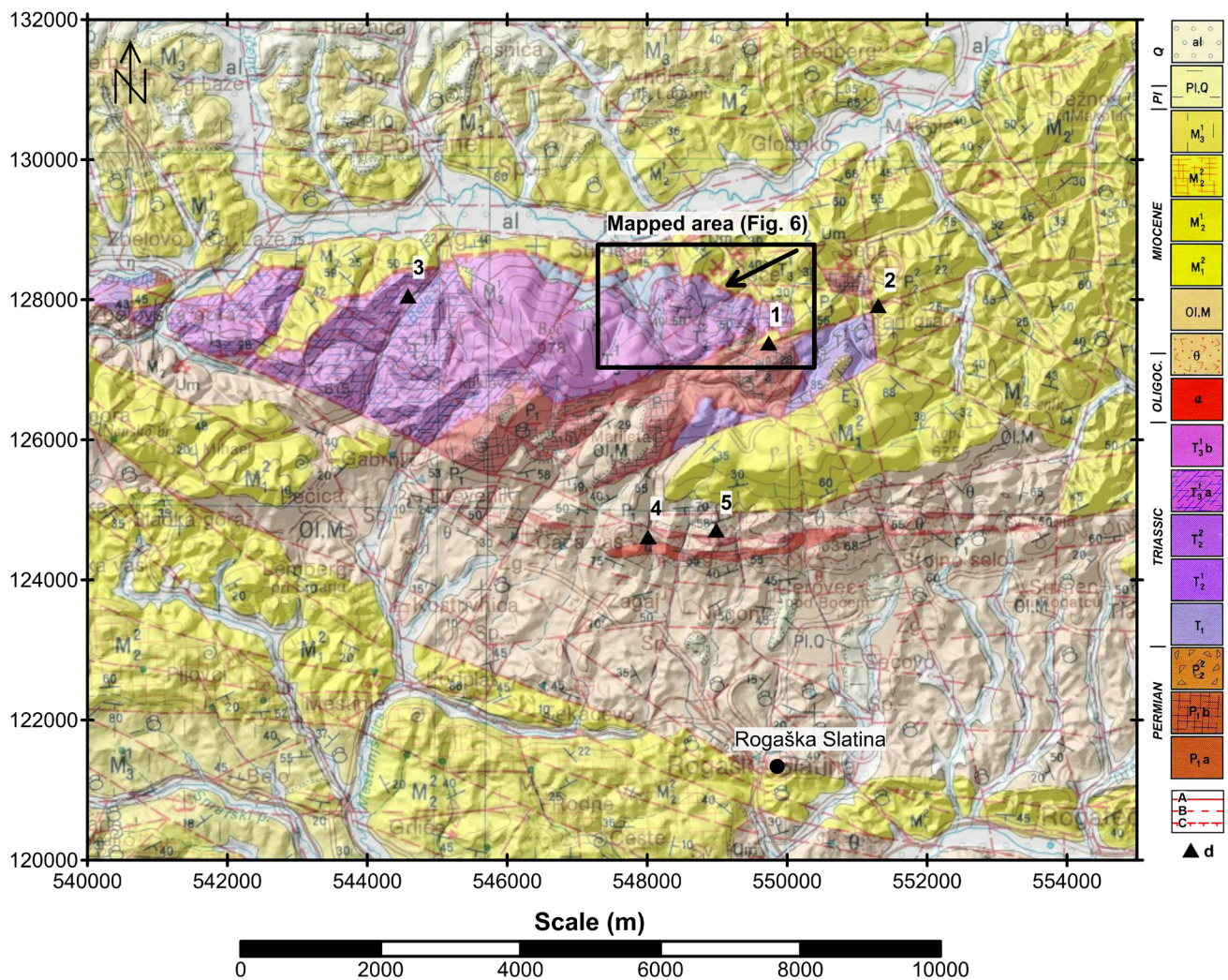


Fig. 2. Basic geological map 1 : 100.000, sheet Rogatec (ANIČIĆ & JURISA, 1984). Black arrow indicates tectonic contact between the Mesozoic South Alpine rocks and Neogene and Quaternary deposits within the SW Pannonian Basin. Legend: al - fluvial sediments; PlQ - gravel and sand; M₃¹ - marlstone, sandstone; M₂² - Lithothamnium limestone; M₁¹ - marlstone, coal; M₁² - Quartz sandstone and clay; OLM - sandstone, sandy marl, sandy clay; α - andesite; T₃¹ b - massive limestone; T₃¹ a - massive dolomite; T₂² - shale, platy limestone with chert, tuff; T₂¹ - massive dolomite; T₁ - dolomite, marly limestone; P₁² - carbonate breccia; P₁¹ b - massive limestone; P₁¹ a - shale, Quartz sandstone and conglomerate; A - fault, B - fault-covered; C - thrust; d - location of fault-slip data measurements.

Tectonic evolution of the area and structural setting

The territory of Slovenia is situated on the NE corner of the Tertiary collisional zone between the European Plate and the Adriatic Microplate. The study area is situated in the NE Slovenia where Pannonian (Central Paratethyan) sediments can be found. Pannonian Basin system was formed by back-arc extension between Late Lower Miocene and Middle Miocene (HORVÁTH & ROYDEN, 1981; HORVÁTH & CLOETINGH, 1996; FODOR et al., 1999). In the Carpathians-Pannonian area European plate is divided on two microplates: ALCAPA block in the north and Tisza-Dacia unit in the south (e.g. CSONTOS et al., 2002; SCHMID et al., 2008). Units are separated by Mid-Hungarian fault zone (Fig. 1 b).

In Lower to Middle Miocene north directed push of Adria microplate induced separation of ALCAPA block from Southern Alps and its Eastward extrusion (FODOR et al., 1999). The main movement was dextral slip along the Periadriatic fault and Mid-Hungarian fault zone (e.g. PALOTAI & CSONTOS, 2010). In this period the ALCAPA unit was affected by 50°CCW rotation. At the same time Tisza-Dacia unit rotated 60° to 80°CW. An opposite sense of neighbouring microplates rotation is believed to be a reason for variation in orientation of compressional axis in different parts of Alps-Pannonian-Carpathians region through Late Oligocene and Lower Miocene: N or NW trending in Eastern Alps, WNW-ESE trending in western Carpathians and Pannonian Basin and NE-SW trending in Tisza-Dacia unit (FODOR et al., 1999).

During Late Lower Miocene and Middle Miocene back-arc extension in the Carpathian embayment induced formation of Pannonian Basin System. The Middle Miocene rifting in Carpathians can be divided into two stages. The older phase was characterised by SW-NE directed extension along the NW-SE striking normal faults, while the younger phase was characterised by E-W to NW-SE directed extension accommodated along the NNE-SSW striking normal faults (FODOR et al., 1999). Rifting was accompanied by normal faulting (e.g. HORVÁTH & CLOETINGH, 1996; MÁRTON et al., 2002). The thermal subsidence continued deepening of formed grabens and half grabens as a result of thermal cooling (SACHSENHOFER et al., 2001).

At the beginning of Upper Miocene central parts of the Pannonian Basin are characterised by SW-NE directed compression (FODOR et al., 1999; CSONTOS et al., 2002).

Pliocene was characterised by change of regional stress dynamics. The end of subduction in Carpathians finally disabled lateral extrusion of Eastern Alps towards east (e.g. ROYDEN et al., 1983). Former extensional regime changed to N-S or NW-SE directed compression and induced tectonic inversion and structural reactivation of the former Basin structures (FODOR et al., 1999). This tectonic inversional phase is well documented by folds and reverse faults with an ENE-WSW strike in wider Donat zone area, where blocks of Permo-Mesozoic rocks and Oligocene vulcanites form strike-slip duplex structures (MÁRTON et al., 2002; FODOR et al., 1998).

The area in the NE Slovenia, which is covered by the Neogene and Quaternary Pannonian Basin sediments, is called the Mura Basin. The Mura Basin continues into Croatia in the south, and to the east it continues into Hungarian Zala Basin. Mura and Zala Basins are commonly mentioned as one structural unit, the Mura-Zala Basin. The western borders of the Mura-Zala Basin are Pohorje and Kozjak Mts. (MIOČ, 1977). In the north it is limited by a belt of metamorphic rocks, covered by Neogene sediments (Southern Burgenland). To the east Mura-Zala Basin continues towards Balaton Lake in Hungary (KERTAI, 1957; KÖRÖSSY, 1988; SZENTGYÖRGYI & JUHÁSZ, 1988) and in the south it is limited by Donat tectonic zone (MIOČ & ŽNIRADČIČ, 1996). The Mura Basin is characterized by WSW-ENE striking subdepressions and highs, from north to south: Radgona depres-

sion, Murska Sobota high, Ljutomer depression and Boč anticline, which towards east continues into Ormož-Selnica anticline and Hungarian Lovaszi-Budafa anticlines (HASENHÜTTL et al., 1999).

The major faults in the Eastern Slovenia are (Fig. 1b): Periadriatic fault, Lavantal fault, Donat fault and Sava fault. The most important is Periadriatic fault since it generally separates the Eastern Alps units from the South Alpine basement rocks (SACHSENHOFER et al., 2001). Going from the Giudicarie area along the southern margin of Karavanke Mts. this WNW-ESE striking fault is accommodated at least 100 km of dextral motion. Eastwardly, the strike-slip motion is partly shared to the southern sub-parallel shear zones, i.e., the Šoštanj fault (VRABEC & FODOR, 2006). In the eastern part, the Periadriatic fault becomes more segmented. The main trace and its southern shear zones are cut by the NW-SE striking Lavantal fault, whereas eastwardly from the Lavantal fault, the Periadriatic fault continues in two sub-parallel WSW-ENE striking fault traces – the Ljutomer fault (in Hungary it continues into Balaton line) and the Donat fault zone (Fig. 1b).

The Boč Mt. is located within the WSW-ENE striking dextral strike-slip Donat fault zone (Fig. 1b and Fig. 2). The zone is built of several partly anastomosing faults that are interconnected with Periadriatic fault in the west and to the Balaton and Mid-Hungarian fault zone in the east. The Donat fault zone was regionally important especially in Lower Miocene due to the continental escape of the Eastern Alps (JELEN et al., 1992; CSONTOS et al., 1992).

Methods

The mapping area was chosen along the northern foothill of the Boč Mt., where the Miocene/Permian-Mesozoic contact, the core of this study, is exposed well. Due to very steep relief in this part of the Boč Mt. that is usually covered by dense vegetation, in this study, investigated outcrops were located along E-W directed forest road that cuts the study area and several steep river channels and associated valleys.

The majority of observed contacts between stratigraphic units were found to be of tectonic origin, predominantly indicated by steep fault surfaces. Fault planes were visible partly, in individual outcrops. Therefore the traces of main faults in the analysed area were constructed on

the basis of measured orientation of fault planes on individual outcrops. The contact between more competent Permo-Triassic carbonates and less competent Middle Miocene sandstones and marlstones was usually well visible. Where the territory between individual outcrops was covered by organic soil horizons, the contact between two lithological units was detected on the basis of soil colour or on the basis of the prevailing pieces of rocks, found in the soil. The age of determined strata was based on the information from the Basic geological map 1 : 100.000 (ANIČIĆ & JURIŠA, 1985). Simultaneously with structural mapping 74 fault-slip data on fault-planes in Upper Triassic, Oligocene-Miocene and Miocene rocks were observed and measured for paleostress analysis. Each observed fault plane was characterized in accordance to fault plane orientation, orientation of preserved striation and displacement along the fault plane. The sense of slip along fault planes was determined by kinematic microcriteria that were found on individual fault planes. The most common and the best preserved kinematic microcriteria were fibrose calcite crystals and associated steps (Fig. 3) that are by many authors (e.g. PETIT, 1987; DOBLAS, 1988) believed to be reliable kinematic indicator. In the same time, SPERNER & ZWEIGEL (2010) suggested that calcite steps might not be completely reliable slip indicator. To ensure correctly determined sense of slip, in this study, beside fibrose calcite minerals and associated steps slickolites, moon-shaped fractures and others were used. This study included kinematic indicators measurements within 5 locations with preserved fault striation from a wider Boč Mt. area. Since the territory is highly deformed, covered by soil and vegetation and the structures on fault

planes were often dissolved under atmospheric conditions (especially Miocene clastites have very low rock resistance), the number of fault-slip data measurements locations is relatively small.

Paleostress analysis of measured fault - slip data was done by Tectonics FP inversional method (ORTNER et al., 2002). With an assumption that slip along the fault plane is parallel to the shear stress (WALLACE, 1951; BOTT, 1959), orientation of the principal stress axes σ_1 (maximum stress), σ_2 (intermediate stress) and σ_3 (minimum stress) in the inverse process is given by the eigenvalues of the reduced stress tensor (ANGELIER, 1994). Since the study area is highly deformed and the bedding orientation changes rapidly, paleostress inversion has been done separately for each outcrop. If less than three fault-slip measurements were available, the calculation of paleostress axis was not possible. In such cases kinematic axes of maximum extension (T-axis), intermediate kinematic axis (B-axis) and maximum contraction (P-axis) were presented in the results.

Results and discussion

The oldest mapped rocks are Lower Permian quartz sandstone, quartz conglomerate, shale, light grey limestone with fusulinides and red and dark grey organogenic limestone. In some places Lower Permian deposits continue into breccia with well rounded white, grey and red limestone clasts in carbonate matrix. Within the study area Lower Triassic is represented by massive, rarely bedded light to medium grey limestone. Anisian strata are also characteristic by massive grey limestone, whereas in Ladinian massive

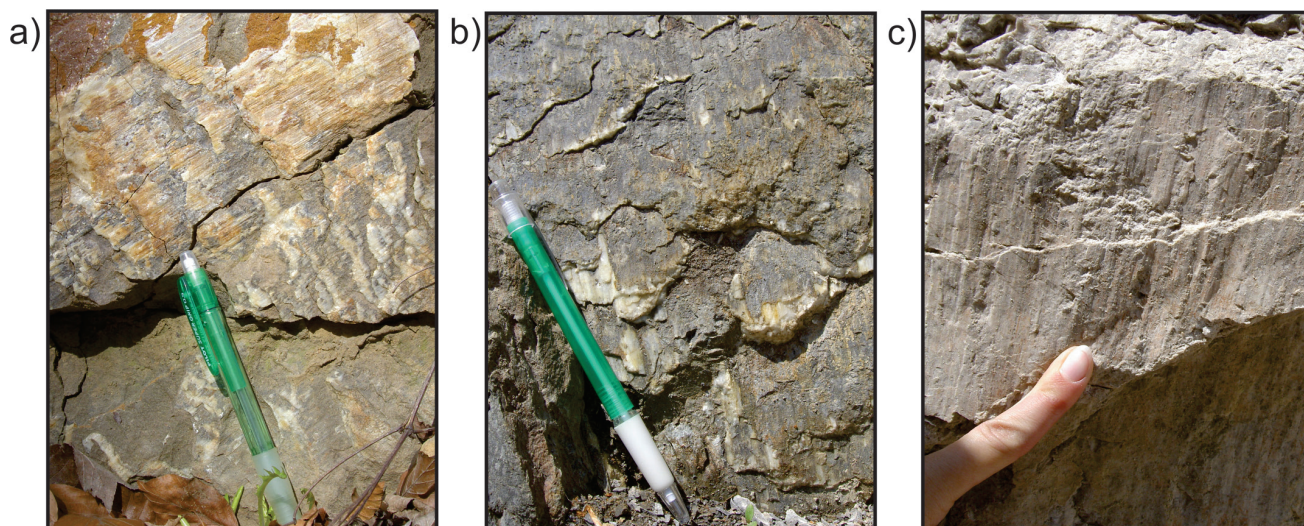


Fig. 3. Examples of fault striation, associated with fibrose calcite steps, that indicate: a) strike-slip fault (location 2 on Fig. 2); b) normal fault (location 4 on Fig. 2); c) reverse fault (location 3 on Fig. 2).

and bedded grey limestone with chert can be found. These massive limestones occasionally laterally interchange with massive silicified breccia, composed of angular predominantly quartz clasts in a quartz matrix (partly it is carbonate). In the hangingwall, Upper Triassic (Cordevol) strata are characteristic by light grey massive limestone that often change to white massive grained dolomite, especially in fault zones. The youngest unit

in the mapped area are Middle Miocene marlstone, bituminose sandstone, breccia, dark grey limestone and brown coal. Middle Miocene stratigraphic unit belong to Central Paratethyan sedimentary sequence and are dominantly Badenian in age (JELEN & RIFELJ, 2002; MIKUŽ et al., 2012; BARTOL et al., 2014). The mapped lithological units are schematically presented on stratigraphic column on Figure 4.

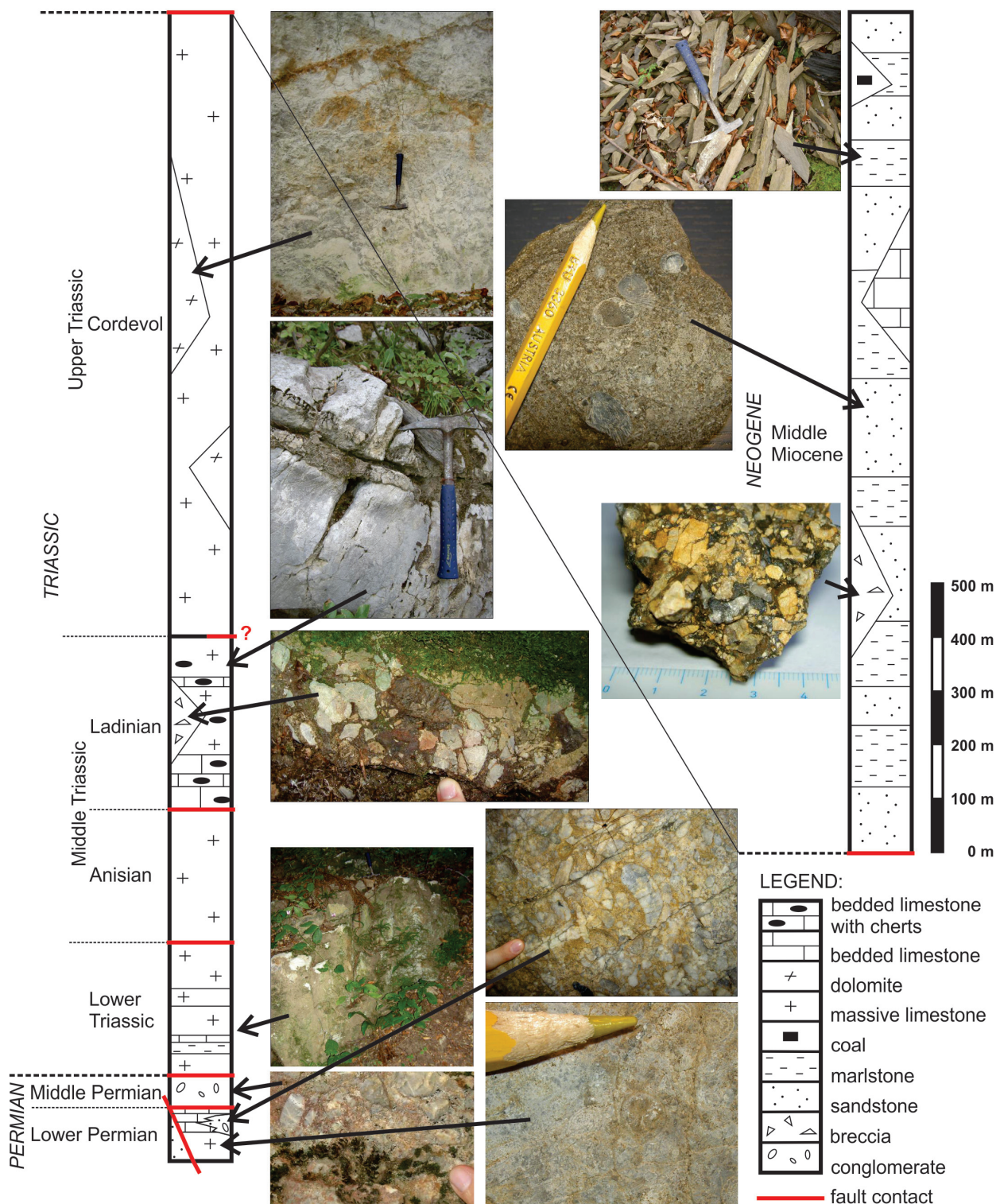


Fig. 4. Mapped lithological units. Thicknesses of each lithological unit is adopted after ANIČIĆ & JURIŠA (1984).

Mapped contacts between the individual stratigraphic units are in general tectonic, only transition from Ladinian to Cordevol in some places might be stratigraphic (Fig. 4). The dominantly



Fig. 5. An example of subvertical SW-NE striking fault plane (Tolsti vrh fault).

observed structures in the study area are SW-NE striking faults, dipping 75° to subvertically, mostly towards SE (Fig. 5). Characterized by few to ten meters wide belt of highly deformed rock, mapped faults are subparallel to the Donat fault zone (Fig. 1b). In the same time, within the mapped area, two principal NE-SW striking faults were identified. The first one is situated in the SE part, near Tolsti vrh (TVF in Fig. Fig. 6), whereas the second one is situated in the NW part of the study area, near village Studenice (SF in Fig. 6). The Studenice fault is accompanied by a few subparallel NE-SW striking fault segments. In the central part of the researched area, between TVF and SF striking fault zones, several subvertical NNE-SSW striking faults were mapped (Fig. 6). This faulted area was characterized by significantly narrower belt of deformed rocks than the belt of deformed rock along NE-SW striking faults. Field mapping show that SSW-NNE striking faults do not crosscut NE-SW striking faults. Therefore it could be suggested that NE striking faults are the principal faults within the study area, whereas NNE striking faults are a lower order faults, formed between the main structures. The third documented fault group are E-W to ESE-WNW striking steep faults with dextral and normal slips, evident from fault slip microcriteria observed on those fault planes in Lower Miocene rocks. The fault planes of this

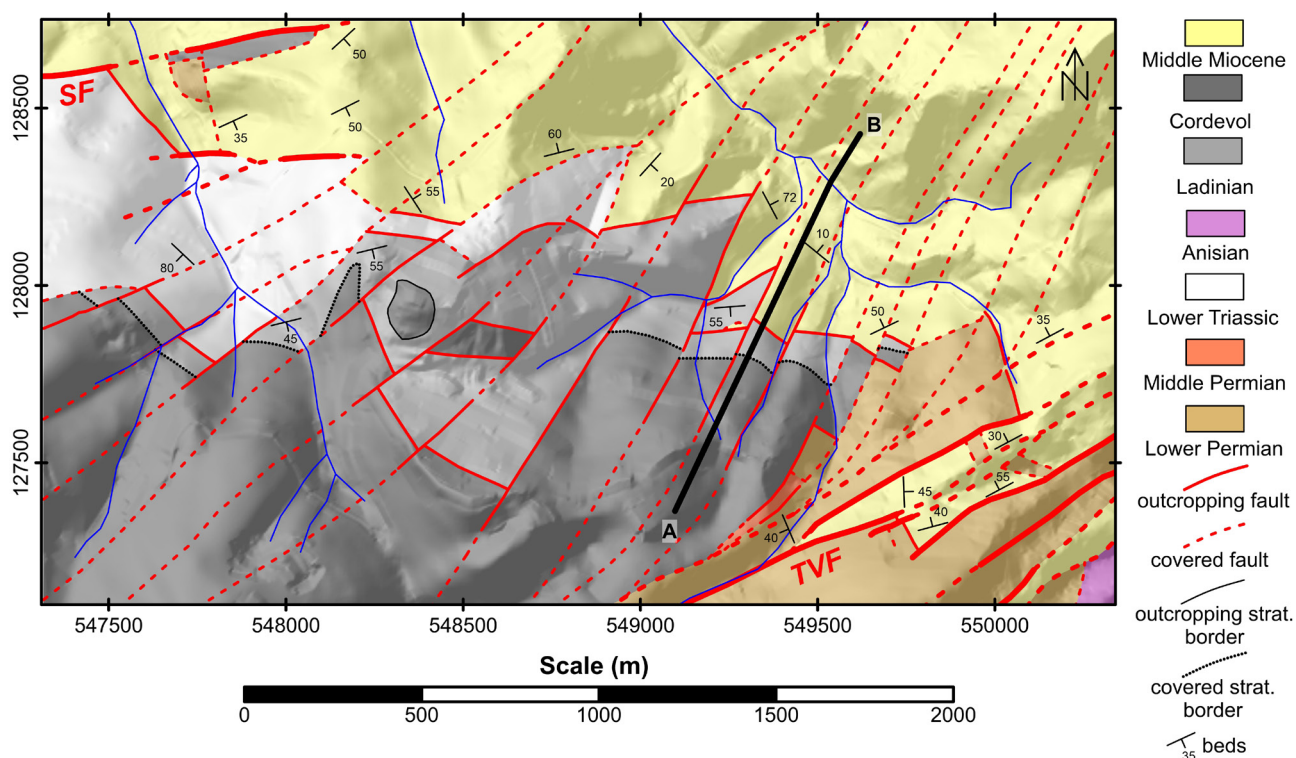


Fig. 6. Structural map of the Northeastern Boč region. The major fault zones – Studenice fault (SF) and Tolsti vrh fault (TVF) are highlighted by thicker lines.

orientation were mapped in the Eastern part of the area. The estimated deep structures are shown on an interpretative cross-section AB (Fig. 7a), where the presented geometry is based on measured bedding (Fig. 6) and observed fault plane geometry (Fig 7b).

Results of paleostress analysis

The mapped territory is highly deformed and structurally represents the most complex part of the Boč Mt. Therefore fault planes with well-preserved striation and reliable kinematic criteria in

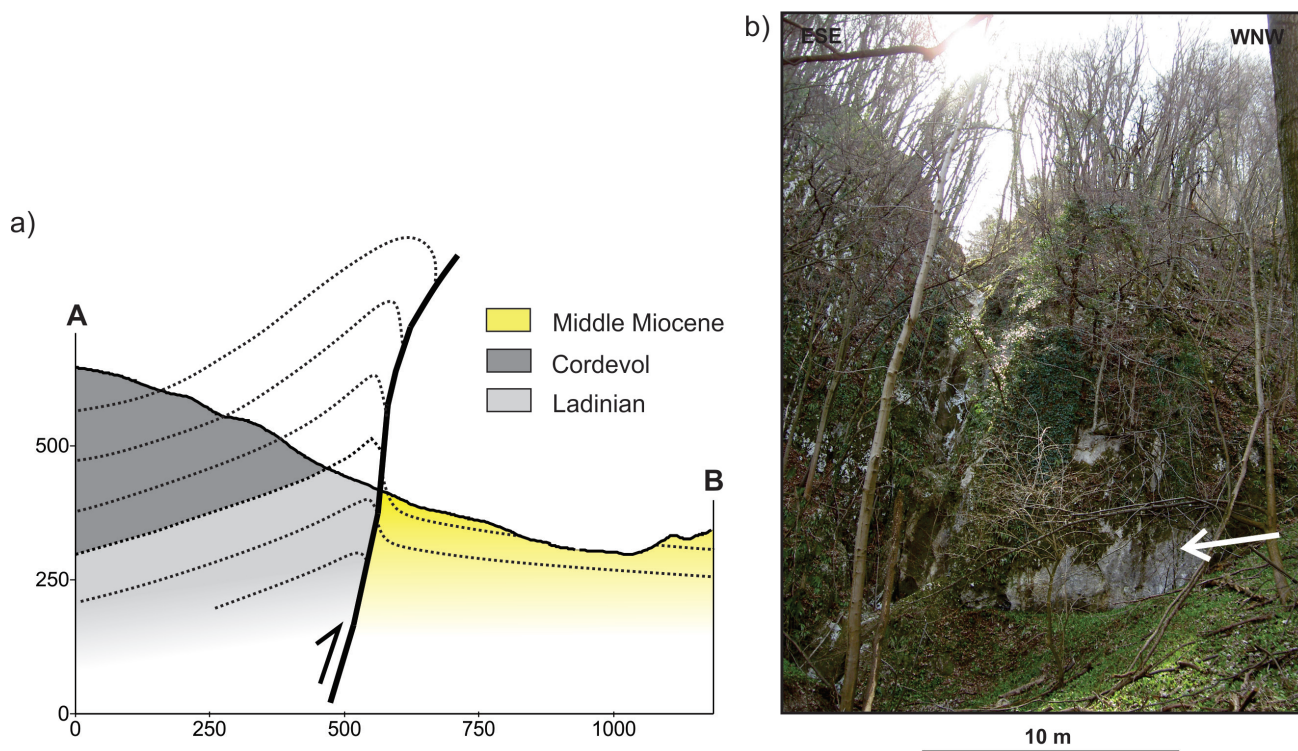


Fig. 7. a) Interpretative cross-section AB, oriented perpendicular to the contact between Miocene and Triassic rocks. b) Photograph of subvertical contact between Miocene and Triassic rocks from the cross-section (a).

Table 1. Results of fault-slip data analysis.

Location	Age	Number of measurements	σ_1	σ_2	σ_3	P -axis	B -axis	T -axis	Phase
1	Lower Permian	2				121/1	199/77	29/11	Phase 4
2	Middle Miocene	7	257/48	128/30	21/27	307/65	121/34	211/0	Phase 1
		2				338/24	110/56	237/22	Phase 4
3	Cordevol	5	6/2	102/70	275/20	319/9	82/74	227/14	Phase 4
		9	175/55	42/26	301/22	211/12	6/77	119/5	Phase 4
		5	138/1	45/67	228/23	176/6	37/77	267/10	Phase 4
		7	180/30	80/17	325/55	238/75	48/14	325/9	Phase 2
		9	186/43	18/47	282/6	215/50	17/30	296/9	Phase 2
4	Oligocene-Miocene	4	35/41	138/14	243/45	311/49	108/42	205/15	Phase 1
		1				22/8	109/36	283/54	?
		2				277/19	214/29	150/8	Phase 3
5	Oligocene-Miocene	4	91/2	200/85	1/5	231/8	99/80	323/6	Phase 3
		3				332/45	35/35	149/44	?
		10	303/39	100/49	204/12	255/17	44/68	159/4	Phase 3
		4	159/77	296/10	27/9	92/86	284/7	195/3	Phase 1

the mapped area were very rare, only one location was suitable to collect some fault-slip data (location 1 on Fig. 2). For this reason fault-slip data for paleostress analysis were measured also on four locations in a wider Boč area (locations 2-5 on Fig. 2). Since the territory presented on Fig. 2 is relatively small, we can presume that regional paleostress and kinematic pattern does not change on such small distances. Therefore general tectonic phases, characteristic for the mapped area should be evident also on the locations of measured fault-slip data in the surrounding of the Boč Mt. One location is within Lower Permian limestone, one in Upper Triassic dolomite, two locations are within Oligocene-Miocene sandstone and one in Lower Miocene siltstone. The number of measurements that were included in the individual kinematic compatible fault group, results of fault-slip data analysis and indication of individual paleostress phase, are presented in Table 1.

The results show four different paleostress tensors in the study area. These stress tensors can be explained by four individual paleostress

phases though crosscutting relations of different fault striations were not observed, as well as no cross-cutting relationships between different fault planes. Therefore, ages of documented paleostress phases are assumed after previous structural studies in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (PERESSON & DECKER, 1997; FODOR et al., 1998; FODOR et al., 1999; TOMLJENOVIC & CSONTOS, 2001; ILIĆ & NEUBAUER, 2005; USTASZEWSKI et al., 2010; BARTEL et al., 2015; MLADENOVIC et al., 2015; ŽIBRET & VRABEC, 2016).

The first phase (Phase 1, Figs. 8, 12) is characterized by SW-NE directed minimum paleostress axis σ_3 and NW-SE directed maximum paleostress axis σ_1 (at least partly) in strike-slip stress regime. This stress state is typically represented by normal to oblique-normal slips on moderately S to SW dipping, W to WNW striking fault planes. This phase that is characterized by NE-SW oriented tension (partly in strike-slip stress regime) can be correlated with Early and Middle Miocene tension, documented in the SW margin of the Pannonian Basin (e.g. TOMLJENOVIC & CSON-

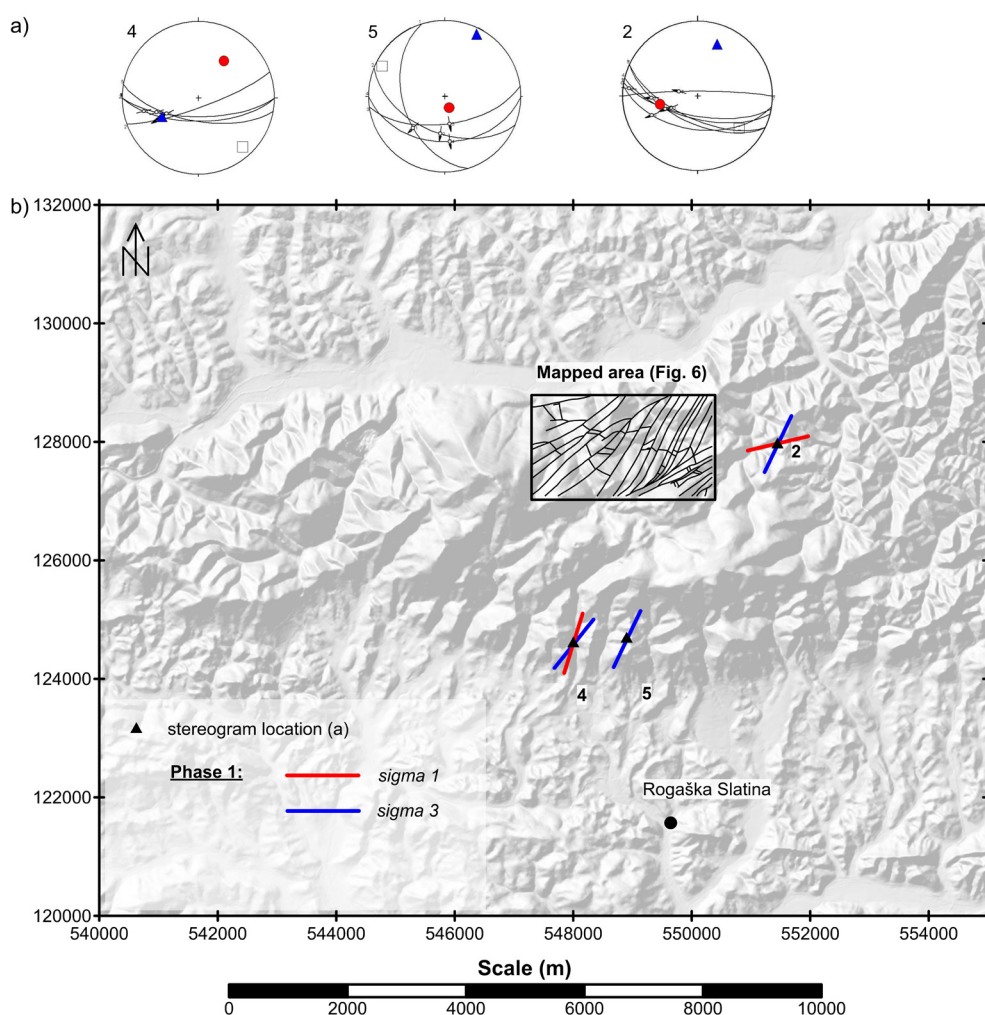


Fig. 8. a) Examples of fault-slip data and main stress/strain orientation for Phase 1 (Schmidt net, lower hemisphere). Arrows on fault plane show relative movement of the hanging-wall block. Red circle represents σ_1 , blue triangle σ_3 and white rectangle σ_2 . b) Local stress field of Phase 1 in the Boč Mt. region (in present-day reference frame, not accounting for any vertical-axis rotations).

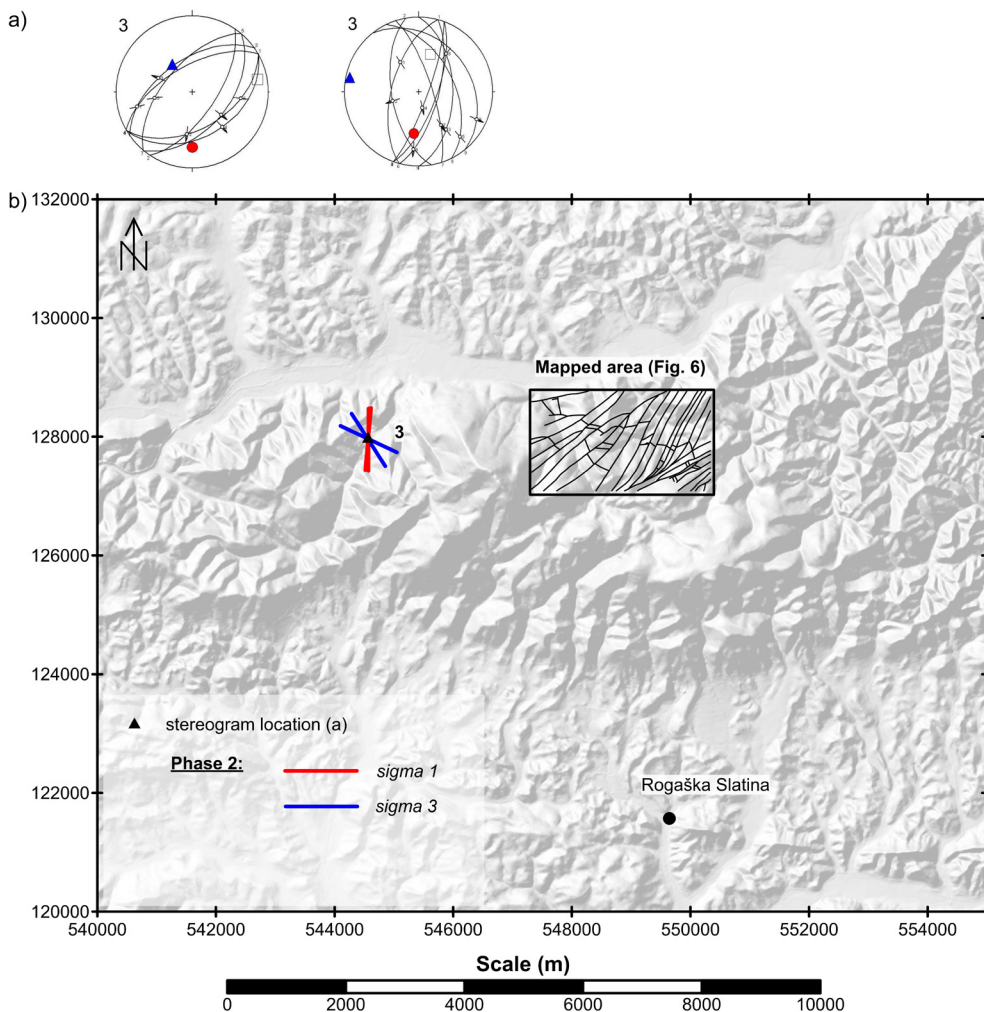


Fig. 9. a) Examples of fault-slip data and main stress/strain orientation for Phase 2 (Schmidt net, lower hemisphere). Arrows on fault plane show relative movement of the hanging-wall block. Red circle represents σ_1 , blue triangle σ_3 and white rectangle σ_2 . b) Local stress field of Phase 2 in the Boč Mt. region (in present-day reference frame, not accounting for any vertical-axis rotations).

TOS, 2001), in the Internal Dinarides (e.g. ILIĆ & NEUBAUER, 2005), in the Internal Dinarides-Pannonian Basin transitional area (USTASZEWSKI et al., 2010), in the NW External Dinarides of Slovenia (ŽIBRET & VRABEC, 2016) and in the central, eastern and northern parts of the Pannonian Basin system (FODOR et al., 1999). Mentioned studies geodynamically relate to Early and Middle Miocene NE-SW oriented tension to the Lower and Middle Miocene back arc extension with corresponding normal faulting in the Pannonian Basin system.

The second documented phase (Phase 2, Figs. 9, 12) is characterised by a NW-SE to WNW-ESE directed minimum paleostress axis σ_3 , with generally N-S directed maximum paleostress axis σ_1 in a strike-slip stress regime. This stress state is typically represented by normal to oblique-normal slip motions on moderately NW and SE dipping fault planes and by sinistral motions on steep NNE striking fault planes. This dominant NW-SE to WNW-ESE oriented tension (partly in strike-slip stress regime) can be cor-

related with Middle and Late Miocene tension, transtension, previously described in the SW margin of the Pannonian Basin (e.g. TOMLJENOVIC & CSONTOS, 2001), in the Internal Dinarides (e.g. ILIĆ & NEUBAUER, 2005) and in the Internal Dinarides-Pannonian Basin transitional area (MLADENOVIC et al., 2015). Middle to Late Miocene NW-SE to WNW-ESE oriented tension corresponds to the break-up of the ALCAPA block into East-Alpine and Pannonian-Carpathian part (FODOR et al., 1998; FODOR et al. 1999; TOMLJENOVIC & CSONTOS, 2001).

The third documented phase (Phase 3, Figs. 10, 12) is characterised by a W-E directed maximum paleostress axis σ_1 and N-S directed minimum paleostress axis σ_3 in a strike-slip stress regime. This stress state is typically represented by sinistral slip motions on steep to subvertical N striking fault planes and by dextral slip motions on steep to subvertical NNE- to NE- striking fault planes. This third phase characterized by E-W oriented compression, with N-S oriented tension in strike-slip stress regime can be correlated by

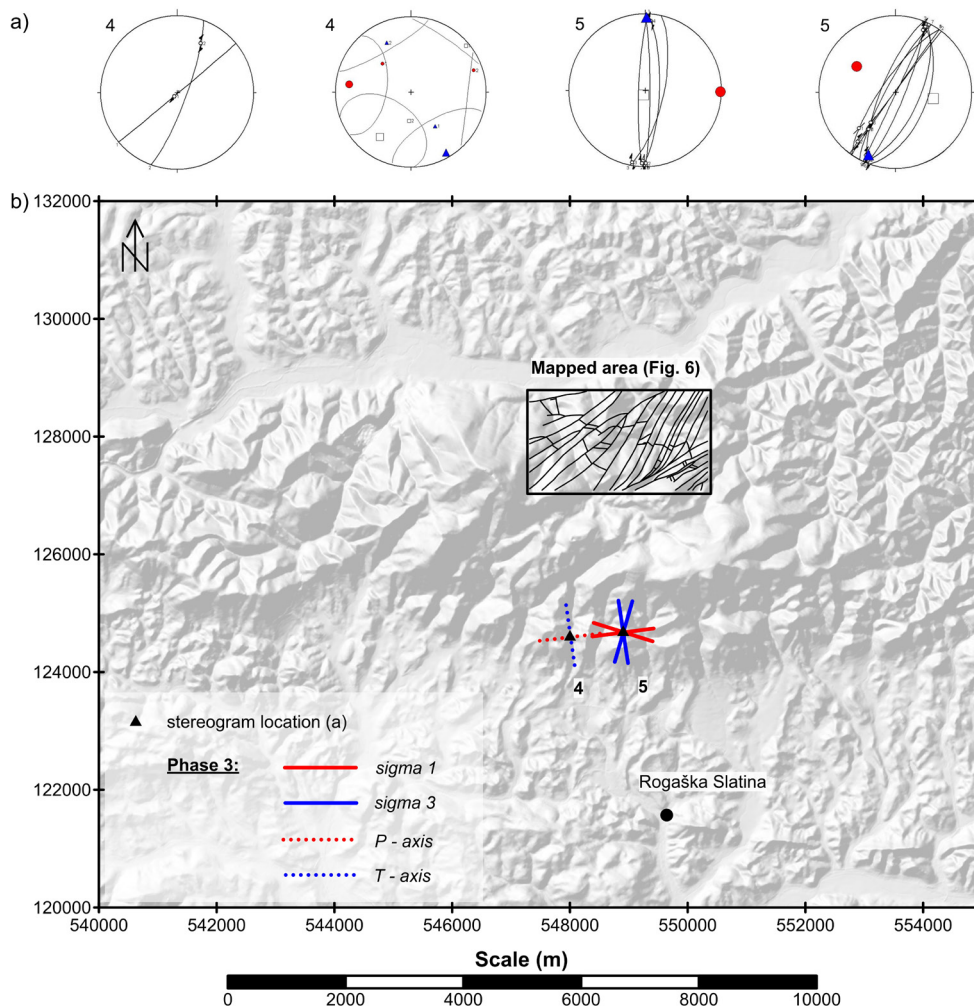


Fig. 10. a) Examples of fault-slip data and main stress/strain orientation for Phase 3 (Schmidt net, lower hemisphere). Arrows on fault plane show relative movement of the hanging-wall block. Red circle represents σ_1 (or P-axis where < 3 data), blue triangle σ_3 (or T-axis where < 3 data) and white rectangle σ_2 (or B-axis where < 3 data). b) Local stress field of Phase 3 in the Boč Mt. region (in present-day reference frame, not accounting for any vertical-axis rotations).

Late Miocene compression, documented in Vienna Basin (PERESSON & DECKER, 1997), in different parts of the Pannonian Basin system (e.g. FODOR et al., 1999) and in the NW External Dinarides of Slovenia (ŽIBRET & VRABEC, 2016). According to the aforementioned studies Late Miocene compression geodynamically relates to the cessation of the subduction in the Eastern Carpathians.

The fourth identified phase (Phase 4, Figs. 11, 12) is characterised by a NNW-SSE to N-S directed maximum paleostress axis σ_1 and WWS-EEN to W-E directed minimum paleostress axis σ_3 in a strike-slip stress regime. This stress state is typically represented by dextral slip motions on steep to subvertical NW-SE to W-E striking fault planes and oblique-reverse slip motions on steep to subvertical NE-SW striking fault planes. Phase 4 with NNW-SSE to N-S oriented compression and WWS-EEN to W-E oriented tension in strike-slip stress regime coincides with the recent stress tensors of the wider South Alpine-Dinarides border area (e.g.

HERAK et al., 2009; CAPORALI et al., 2013) and can be correlated to Pliocene and Quaternary inversion/transpression phase, documented in the NW External Dinarides (USTASZEWSKI et al., 2010; ŽIBRET & VRABEC, 2016), in the SW margin of the Pannonian Basin and in Central Dinarides (e.g. TOMLJENOVIC & CSONTOS, 2001), in the Internal Dinarides (e.g. ILIC & NEUBAUER, 2005), in the Internal Dinarides-Pannonian Basin transitional area (MLADENOVIC et al., 2015), in the northern and western parts of the Pannonian Basin (FODOR et al., 1999), in the SW part of the Pannonian Basin (CSONTOS et al., 2002) and in the Drau Range and Friuli South Alpine wedge (BARTEL et al., 2015).

Conclusions

According to the detailed structural mapping in the NE Boč region the contact between Mesozoic carbonates and Middle Miocene Central Paratethyan formations is characterized by steep to subvertical W-E or NW-SE striking faults, segmented inside a Donat-Lavanttäl

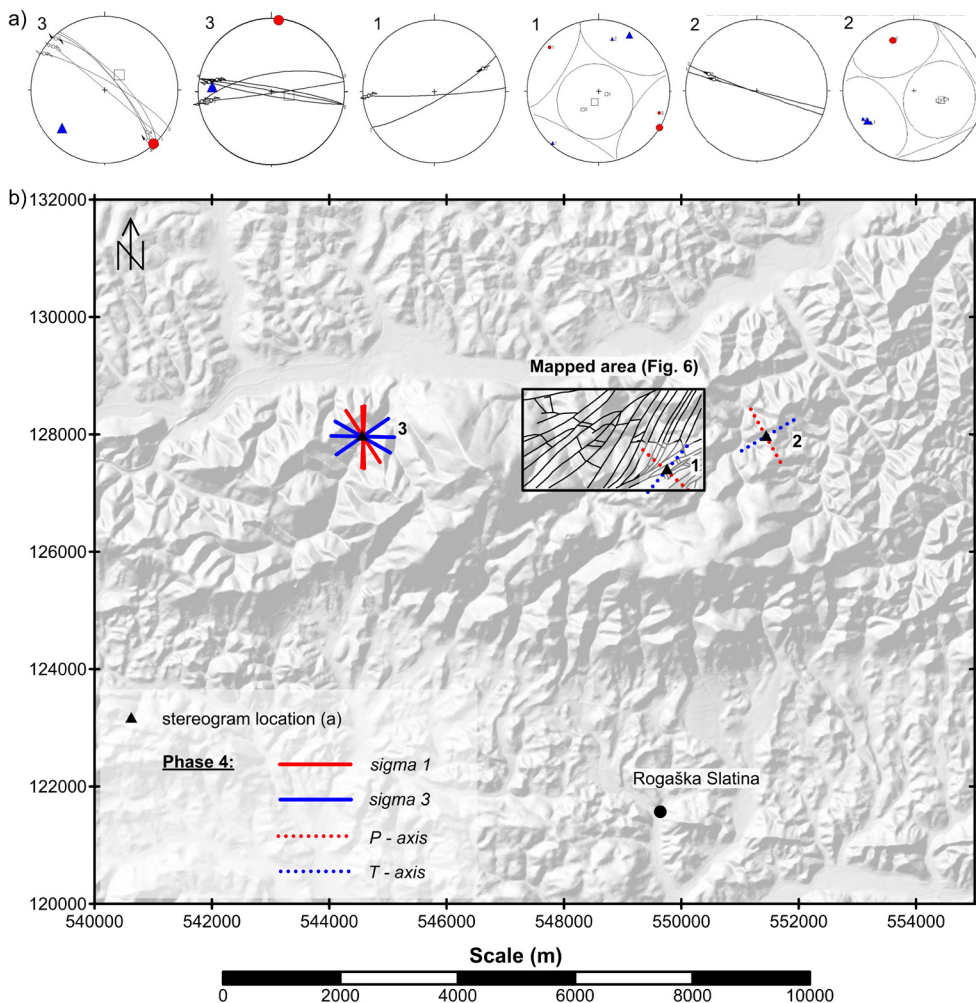


Fig. 11. a) Examples of fault-slip data and main stress/strain orientation for Phase 4 (Schmidt net, lower hemisphere). Arrows on fault plane show relative movement of the hanging-wall block. Red circle represents σ_1 (or P-axis where < 3 data), blue triangle σ_3 (or T-axis where < 3 data) and white rectangle σ_2 (or B-axis where < 3 data). b) Local stress field of Phase 4 in the Boč Mt. region (in present-day reference frame, not accounting for any vertical-axis rotations).

dextral transpressional zone. The regional acceptance of such contact was checked by paleostress analysis. Fault-slip data were measured in a wider Boč area and allowed to separate four paleostress tensors. Phase 1 tensor group is characterised by SW-NE directed minimum paleostress axis σ_3 (at least partly) in strike-slip stress regime, manifested by normal to oblique-normal slips on moderately dipping to steep W-E to WNW-ESE striking fault planes. It is well correlated with Lower and Middle Miocene tension, and may be attributed to the back arc extension in the Pannonian Basin system. Phase 2 tensor group is characterised by NW-SE to WNW-ESE directed minimum paleostress axis σ_3 and generally N-S directed maximum paleostress axis σ_1 in a strike-slip stress regime, manifested by normal to oblique-normal slips on moderately dipping SW-NE striking fault planes and by sinistral slips on steep NNE-SSW striking fault planes. Identified phase could correlate with Middle to Late Miocene tension, attributed to the break-up of the Alcapa block into East-Alpine and Pannonian-Carpathian part. Phase 3 tensor group

is characterized by W-E directed maximum paleostress axis σ_1 and N-S directed minimum paleostress axis σ_3 in a strike-slip stress regime, manifested by sinistral slips on steep to subvertical N-S striking fault planes and by dextral slips on steep to subvertical NNE-SSW to NE-SW striking fault planes. This phase could coincide with Late Miocene compression, attributed to cessation of the subduction in the Eastern Carpathians. Phase 4 tensor group is characterised by a NNW-SSE to N-S directed maximum paleostress axis σ_1 and WWS-EEN to W-E directed minimum paleostress axis σ_3 in a strike-slip stress regime, manifested by dextral slips on steep to subvertical NW-SE to W-E striking fault planes and oblique-reverse slips on steep to subvertical NE-SW striking fault planes. This final phase could represent recent stress state and most probably represent Pliocene and Quaternary inverse/transpressive phase. The documented stress tensors are compatible with structural data from the Alps-Dinarides-Carpathians region which confirms the result of this study (the subvertical contact in the NE part of the Boč Mt.).

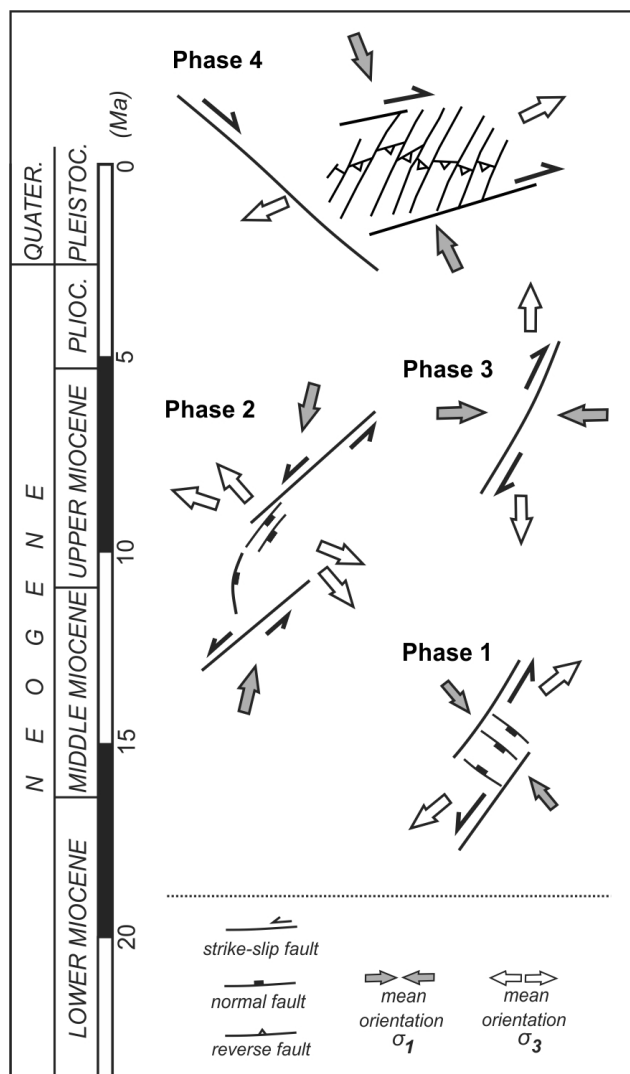


Fig. 12. Schematic structural patterns for the Boč region.

Acknowledgments

This research was conducted within the scope of Diploma Thesis titled "Structural analysis of the northeastern Boč region" by Lea Žibret, supervised by Prof. dr. Marko Vrabec. The results were used for the ARRS applied research project L1-0073 "Assessing the optimal balance between environmental protection and economic use of mineral and spring groundwater resources – a case study of the Rogaška Slatina fractured aquifer system" (head dr. Branka Trček). I would like to thank to dr. Bogomir Celarc and dr. Matevž Novak from the Geological Survey of Slovenia for introducing me the territory, for help at recognising stratigraphic units and for showing me some good locations for collecting fault-slip data. I would also like to thank to anonymous reviewers for many constructive comments that improved the manuscript.

References

- ANGELIER, J. 1994: Fault slip analysis and paleo-stress reconstruction. In: HANCOCK, P.L. (ed.): Continental deformation. Pergamon Press. Oxford, 53-99.
- ANIČIĆ, B. & JURIŠA, M. 1984: Basic Geological Map SFRJ 1 : 100.000 – Sheet Rogatec. Beograd, Zvezni geološki zavod.
- ANIČIĆ, B. & JURIŠA, M. 1985: Basic Geological Map SFRJ 1 : 100.000. Explanations for sheet Rogatec L 33-68. Zvezni geološki zavod, Beograd: 76 p.
- BARTEL, E.M., NEUBAUER, F., GENSER, J. & HEBERER, B. 2014: States of paleostress north and south of the Periadriatic fault: Comparison of the Drau Range and Friuli Southalpine wedge. *Tectonophysics*, 637: 305-327, doi:[10.1016/j.tecto.2014.10.019](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.10.019).
- BARTOL, M., MIKUŽ, V. & HORVAT, A. 2014: Palaeontological evidence of communication between the Central Paratethys and the Mediterranean in the late Badenian/early Serravalian. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.*, 394: 144-157, doi:[10.1016/j.palaeo.2013.12.009](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.12.009).
- BOTT, M.H.P. 1959: The mechanisms of oblique slip faulting. *Geol. Mag.*, 96: 109-117.
- CAPORALI, A., NEUBAUER, F., OSTINI, L., STANGL, G. & ZULIANI, D. 2013: Modeling surface GPS velocities in the Southern and Eastern Alps by finite dislocations at crustal depths. *Tectonophysics*, 590: 136-150, doi:[10.1016/j.tecto.2013.01.016](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.016).
- CSONTOS, L., NAGYMAROSY, A., HORVÁTH, F. & KOVÁČ, M. 1992: Tertiary evolution of the intra – Carpathian area: a model. *Tectonophysics*, 199: 73-91.
- CSONTOS, L., MÁRTON, E., WÓRUM, G. & BENKOVICS, L. 2002: Geodynamics of SW-Pannonian inselbergs (Mecsek and Villány Mts, SW Hungary): Inferences from a complex structural analysis. *EGU Stepham Mueller Special Publication Series*, 3: 227-245.
- DOBLAS, M. 1998: Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295: 187-197.
- FODOR, L., JELEN, M., MÁRTON, E., SKABERNE, D., ČAR, J. & VRABEC, M. 1998: Miocene-Pliocene tectonic evolution of the Periadriatic line in Slovenia – implications for Alpine-Carpathian extrusion models. *Tectonics*, 17: 690-709.
- FODOR, L., CSONTOS, L., BADA, G., GYORFI, I. & BENKOVICS, L. 1999: Tertiary tectonic evolution of the Pannonian Basin system and neighbouring orogens: a new synthesis of paleostress data. In: DURAND, B., JOLIVET, L., HORVÁTH,

- F. & SERANNE, M. (eds.): The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen. Geological Society London, Special Publications, 156: 295-334.
- HASENHÜTTL, C., KRALJIC, B., SACHSENHOFER, R.F., JELEN, B. & RIEGER, R. 1999: Source rocks and hydrocarbon generation in Slovenia. *Mar. Petrol. Geol.*, 18: 115-132.
- HERAK, D., HERAK, M. & TOMLJENOVIC, B. 2009: Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia. *Tectonophysics*, 465: 121-220, doi:[10.1016/j.tecto.2008.12.005](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.12.005).
- HORVATH, F. & ROYDEN, L. 1981: Mechanism for the Formation of the Intra-Carpathian Basins: a Review. *Earth Evolution Science*, 3: 307-316.
- HORVATH, F. & CLOETHING, S. 1996: Stress-induced late stage subsidence snomalies in the Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 266: 287-300.
- ILIĆ, A. & NEUBAUER, F. 2005: Tertiary to recent oblique convergence and wrenching of the Central Dinarides: Constraints from palaeostress study. *Tectonophysics*, 410/1-4: 465-484, doi:[10.1016/j.tecto.2005.02.019](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.02.019).
- JELEN, B., ANIČIĆ, B., BREZIGAR, A., BUSER, S., CIMERMAN, F., DROBNE, K., MONOSTORI, M., KEDVES, M., PAVLOVEC, R., PAVŠIČ, J. & SKABERNE, D. 1992: Model of positional relationships for Upper Paleogene and Miocene strata in Slovenia. In: MONTANARI, A., COCCIONI, R., ODIN, G. S. (eds.): *Interdisciplinary Geological Conference on the Miocene Epoch with Emphases on the Umbria-Marche Sequence. Abstracts and Field Trips*. International Union of Geological Sciences, Subcommission on Geochronology, Ancona, 71-72.
- JELEN, B. & RIFELJ, H. 2002: Stratigraphic structure of B1 Tertiary tectonostratigraphic unit in eastern Slovenia. *Geologija*, 45/1: 115-138, doi:[10.5474/geologija.2002.010](https://doi.org/10.5474/geologija.2002.010).
- KERTAI, G.Y. 1957: The structures of Basins and oil reservoirs in Hungary, based on oil exploration wells (in Hungarian). *Földtani Közlöny*, 87: 383-394.
- KÖRÖSSY, L. 1988: Hydrocarbon geology of the Zala Basin in Hungary. *Általános Földtani Szemle*, 23: 3-162.
- MÁRTON, E., FODOR, L., JELEN, B., MÁRTON, P., RIFELJ, H. & KEVRIĆ, R. 2002: Miocene to Quaternary deformation in NE Slovenia: complex paleomagnetic and structural study. *J. Geodyn.*, 34: 627-651.
- MIKUŽ, V., BARTOL, M. & ULAGA, Š. 2012: The brachiopod *Lingula* from the Middle Miocene – Badenian beds of Slovenia. *Geologija*, 55/2: 271-274, doi:[10.5474/geologija.2012.017](https://doi.org/10.5474/geologija.2012.017).
- MIOČ, P. 1977: Geologic structure of the Drava Valley between Dravograd and Selnica. *Geologija*, 20: 193-230.
- MIOČ, P. & ŽNIRADČIČ, M. 1996: Geological characteristics of the oil fields in the Slovenian part of the Pannonian Basin. *Geol. Croat.*, 49: 271-275.
- MANCKTELOW, N.S., STÖCKLI, D.F., GROLLMUND, B., MÜLLER, W., FÜGENSCHUH, B., VIOLA, G., SEWARD, D. & VILLA, I.M. 2001: The DAV and Periadriatic fault systems in the Eastern Alps south of the Tauern window. *Int. J. Earth Sciences (Geol. Rundsch.)*, 90: 593-622, doi:[10.1007/s005310000190](https://doi.org/10.1007/s005310000190).
- MLADENOVIC, A., TRIVIĆ, B. & CVETKOVIĆ, V. 2015: How tectonics controlled post-collisional magmatism within the Dinarides: Inferences based on study of tectono-magmatic events in the Kopaonik Mts. (Southern Serbia). *Tectonophysics*, 646: 36-49, doi:[10.1016/j.tecto.2015.02.001](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.02.001).
- NOVAK, M., CELARC, B., ŽIBRET, L., LEIS, A. & TRČEK, B. 2010: Geologic structure of the Rogaška Slatina aquifer system and its geochemical characteristics. In: KOŠIR, A., HORVAT, A., ZUPAN HAJNA, N. & OTONIČAR, B. (eds.): *Povzetki in ekskurzije = Abstracts and field trips*, 3. Slovenski geološki kongres, Bovec, 16.-18. september 2010. Postojna: Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa; Ljubljana: Paleontološki inštitut Ivana Rakovca, 36 p.
- ORTNER, H., REITER, F. & ACS, P. 2002: Easy handling of tectonic data: The programs TectonicVB for Mac and TectonicsFP for Windows. *Comput. Geosci.*, 28/10: 1193-1200.
- PALOTAI, M. & CSONTOS, L. 2010: Strike-slip reactivation of a Paleogene to Miocene fold and thrust belt along the central part of the Mid-Hungarian Shear Zone. *Geol. Carpath.*, 61/6: 483-493, doi:[10.2478/v10096-010-0030-3](https://doi.org/10.2478/v10096-010-0030-3).
- PERESSON, H. & DECKER, K. 1997: Far-field effects of Late Miocene subduction in the Eastern Carpathians: E-W compression and inversion of structures in the Alpine-Carpathian-Pannonian region. *Tectonics*, 16/1: 38-56.
- PETIT, J.P. 1987: Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *J. Struct. Geol.*, 9: 597-608.
- PLACER, L. 1998: Contribution to the macro-tectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. *Geologija*, 41: 223-255, doi:[10.5474/geologija.1998.013](https://doi.org/10.5474/geologija.1998.013).

- ROYDEN, L., HORVÁTH, F. & RUMPLER, J. 1983: Evolution of the Pannonian Basin System: 1. Tectonics. *Tectonics*, 2/1: 63–90, [doi:10.1029/TC002i001p00063](https://doi.org/10.1029/TC002i001p00063).
- SACHSENHOFER, R. 2001: Syn- and post-collisional heat flow in the Cenozoic Eastern Alps. *Int. J. Earth Sci.*, 90: 579–592, [doi:10.1007/s005310000179](https://doi.org/10.1007/s005310000179).
- SCHMID, S.M., BERNOULLI, D., FÜGENSCHUH, B., MATENCO, L., SCHEFER, S., SCHUSTER, R., TISCHLER, M. & USTASZEWSKI, K. 2008: The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss J. Geosci.*, 101: 139–183, [doi:10.1007/s00015-008-1247-3](https://doi.org/10.1007/s00015-008-1247-3).
- SPERNER, B. & ZWEIGEL, P. 2010: A plea for more caution in fault-slip analysis. *Tectonophysics*, 482/1–4: 29–41, [doi:10.1016/j.tecto.2009.07.019](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.07.019).
- SZENTGYÖRGYI, K. & JUHÁSZ, G.Y. 1988: Sedimentological characteristics of the Neogene sequences in SW Transdanubia, Hungary. *Acta Geologica Hungarica*, 31: 209–225.
- TOMLJENVIĆ, B. & CSONTOS, L. 2001: Neogene-Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac Basins, Croatia). *Int. J. Earth Sci.*, 90/3: 560–578, [doi:10.1007/s005310000176](https://doi.org/10.1007/s005310000176).
- USTASZEWSKI, K., KOUNOV, A., SCHMID, S.M., SCHALTEGGER, U., KRENN, E., FRANK, W. & FÜGESCHUH, B. 2010: Evolution of the Adria-Europe plate boundary in the northern Dinarides: From continent-continent collision to back-arc extension. *Tectonics*, 29: 1–34, [doi:10.1029/2010TC002668](https://doi.org/10.1029/2010TC002668).
- VRABEC, M. & FODOR, L. 2006: Late cenozoic tectonics of Slovenia: Structural styles at the north-eastern corner of the Adriatic microplate. In: PINTER, N., GYULA, G., WEBER, J., STEIN, S. & MEDAK, D. (eds.): *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards*. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, 61: 151–168.
- WALLACE, R.E. 1951: Geometry of shearing stress and relation to faulting. *J. Geol.*, 59: 118–130.
- ŽIBRET, L. 2009: Structural analysis of the northeastern Boč region. Diploma Thesis, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana: 70 p.
- ŽIBRET, L. & VRABEC, M. 2016: Paleostress and kinematic evolution of the orogeny-parallel NW-SE striking faults in the NW External Dinarides of Slovenia unraveled by mesoscale fault-slip data analysis. *Geol. Croat.*, 69/3: 295–305, [doi: 10.4154/gc.2016.30](https://doi.org/10.4154/gc.2016.30).



Landslide prediction system for rainfall induced landslides in Slovenia (Masprem)

Sistem opozarjanja na nevarnost proženja zemeljskih plazov v Sloveniji (Masprem)

Mateja JEMEC AUFLIČ¹, Jasna ŠINIGOJ¹, Matija KRIVIC¹, Martin PODBOJ¹, Tina PETERNEL¹ & Marko KOMAC²

¹Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: mateja.jemec@geo-zs.si, jasna.sinigoj@geo-zs.si, matija.krivic@geo-zs.si, martin.podboj@geo-zs.si, tina.peternel@geo-zs.si

²Marko Komac, Independent researcher, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: m.komac@telemach.net

Prejeto / Received 21. 10. 2016; Sprejeto / Accepted 14. 12. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Key words: shallow landslides, prediction, hazard, validation, rainfall thresholds

Ključne besede: zemeljski plazovi, opozarjanje, nevarnost, validacija, sprožilne količine padavin

Abstract

In this paper we introduce a landslide prediction system for modelling the probabilities of landslides through time in Slovenia (Masprem). The system to forecast rainfall induced landslides is based on the landslide susceptibility map, landslide triggering rainfall threshold values and the precipitation forecasting model. Through the integrated parameters a detailed framework of the system, from conceptual to operational phases, is shown. Using fuzzy logic the landslide prediction is calculated. Potential landslide areas are forecasted on a national scale (1: 250,000) and on a local scale (1: 25,000) for five selected municipalities where the exposure of inhabitants, buildings and different type of infrastructure is displayed, twice daily. Due to different rainfall patterns that govern landslide occurrences, the system for landslide prediction considers two different rainfall scenarios (M1 and M2). The landslides predicted by the two models are compared with a landslide inventory to validate the outputs. In this study we highlight the rainfall event that lasted from the 9th to the 14th of September 2014 when abundant precipitation triggered over 800 slope failures around Slovenia and caused large material damage. Results show that antecedent rainfall plays an important role, according to the comparisons of the model (M1) where antecedent rainfall is not considered. Although in general the landslides areas are over-predicted and largely do not correspond to the landslide inventory, the overall performance indicates that the system is able to capture the crucial factors in determining the landslide location. Additional calibration of input parameters and the landslide inventory as well as improved spatially distributed rainfall forecast data can further enhance the model's prediction.

Izvleček

V članku predstavljamo sistem za napovedovanje verjetnosti nastanka plazov v času v Sloveniji (Masprem). Sistem napovedovanja plazov, ki se bodo sprožili zaradi padavin, je osnovan na karti verjetnosti pojavljanja plazov, sprožilnih/mejnih količin padavin za posamezne geološke enote ter modelskih napovedi padavin. Preko vključenih parametrov je prikazan potek dela, od idejne do operativne stopnje. Pri izračunu napovedovanja plazov je bila uporabljena mehka logika. Območja nastanka možnih plazov se računajo dvakrat dnevno, in sicer na državni ravni (v merilu 1:250.000) ter na lokalni ravni (merilo 1:25.000), kjer se za pet izbranih občin računa izpostavljenost prebivalcev, objektov in infrastrukture. Zaradi različnega vpliva padavin na pojav plazov, sistem napovedovanja upošteva dva različna scenarija za padavine (M1 in M2). Plazovi, ki jih napovedujeta ta dva modela, so primerjani z plazovi v bazi plazov, z namenom preverjanja ujemanja in validacije. Posebej so obravnavane obsežne padavine med 9. in 14. septembrom 2014, ki so botrovale sprožiti preko 800 plazov po celotni Sloveniji ter povzročile veliko gmotno škodo. Rezultati modelov kažejo, da so predhodne padavine pomembne pri napovedovanju. Kar je razvidno iz rezultatov modela 1 (M1), kjer le te niso upoštevane. Čeprav so bili plazovi napovedani nekoliko pogostejše kot so se prožili, je na splošno učinkovitost pokazala, da sistem zajema ključne dejavnike za ugotavljanje lokacije plazov. Dodatne kalibracije vnesenih parametrov in same baze plazov ter izboljšanje natančnosti prostorske napovedi padavin bodo izboljšale napovedovanje plazov.

Introduction

The spatial-temporal prediction of landslide hazards is one of the important fields of geoscientific research. The aim of these methods is to identify landslide-prone areas in space and/or time based on the knowledge of past landslide events and terrain parameters, geological attributes and other information. In the last 25 years many countries, regions and cities have been affected by intense precipitation that led to catastrophic landslides. Therefore, public awareness of extreme events has adequately increased across the world in different sectors.

Landslides are serious geological hazards caused when masses of rock, earth, and debris flow down a steep slope during periods of intense rainfall or rapid snow melt (VARNES, 1978; CRUDEN, 1991; HUNGR et al., 2014). In our particular case, almost one quarter of territory of Slovenia is subjected to landslides (KOMAC & RIBIČIČ, 2006). According to technical reports and bulletins of the Administration for Civil Protection and Disaster Relief from 1991 to 2014, landslides claimed 15 people, disrupted communication and transportation on many roads and have caused

considerable damage and economic loss (HAQUE et al., 2016).

Possible solutions for reducing damage are focused on landslide detection and the identification of causes which lead to slope failures. In Slovenia intense short and less intense, long duration rainfall is the primary cause of shallow landslides that to some estimations sum up to the number of 10,000 (JEMEC AUFLIČ & KOMAC, 2012; JEMEC AUFLIČ & KOMAC, 2013; JEMEC AUFLIČ et al., 2015). Landslide density per square kilometer can be seen in Figure 1. For this purpose, the available landslide records (6946) gathered from different sources of information (JEMEC AUFLIČ et al., 2015) were transformed into a point layer. The 1 km reference grid from the European Environment Agency (EEA) was used to calculate the landslide density for each 1 km² of the territory. A color scale was used to depict landslide density per 1 km². From Fig.1 the landslide density for the territory of Slovenia, produced from the available landslide records can be seen where green color indicates areas with no landslides per 1 km² and red the maximum number of landslides per 1 km².

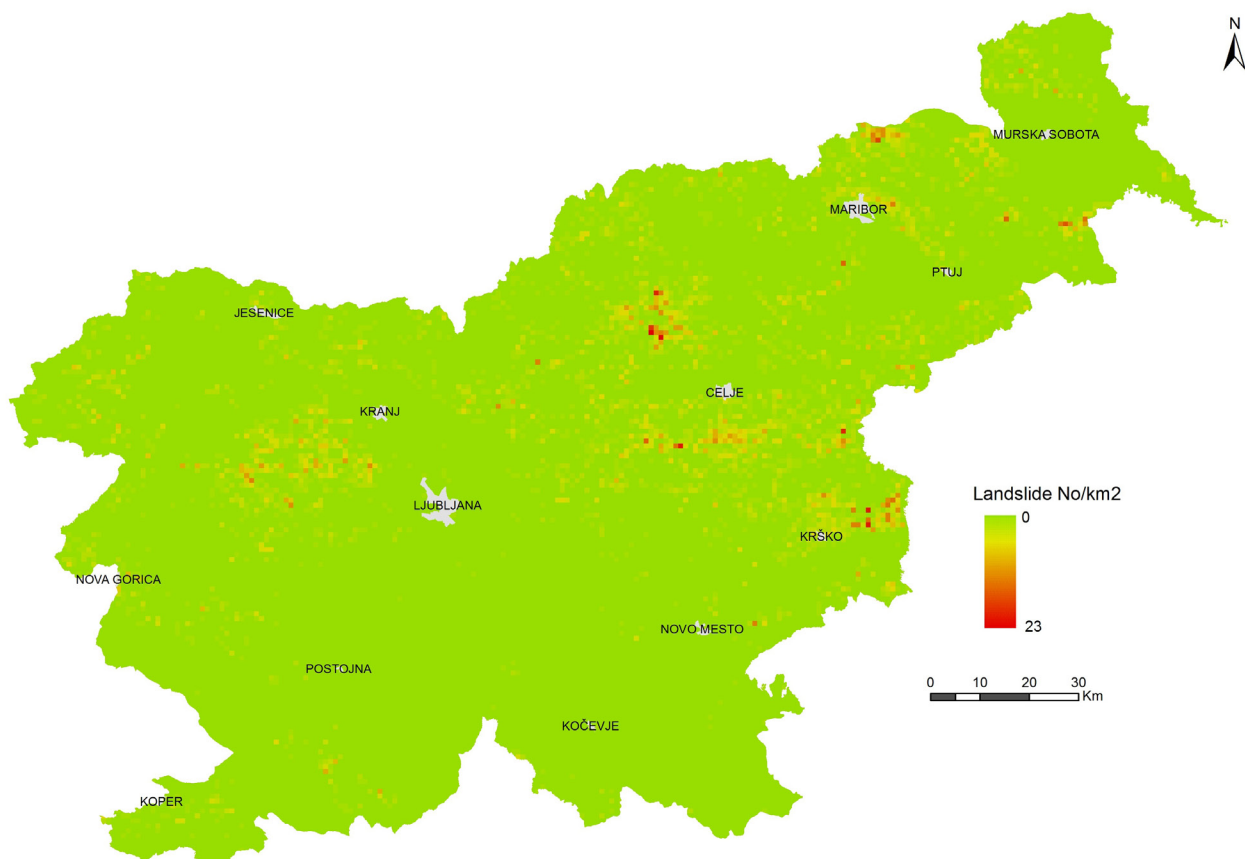


Fig. 1. Landslide density map from the available landslide records.

These events could be identified and to some extent also minimized if better knowledge on the relation between landslides and rainfall would be available. For example Rosi et al. (2016) calculated intensity-duration thresholds for Slovenia, where its territory was divided into four areas. One of the alternatives is the prediction of landslides in time, in relation to rainfall forecasts. Providing sufficient warning time before the impending landslide allows taking precautionary measures, minimizing the damage caused by the landslide. The primary objective of a modelling system to forecast landslide probability is to inform civil agencies or responsible authorities of an increased probability of landslide occurrence as a consequence of heavy precipitation that exceed the rainfall thresholds.

Various similar landslide prediction systems have been developed worldwide (ALLASIA et al., 2013; BAUM et al., 2010; OSANAI et al., 2010; MERCOGLIANO et al., 2010; TIRANTE et al., 2014; THIEBES, 2012). In general, they vary by their observed parameters, technology used, and technological readiness level. For example, the landslide prediction system can be a prototype that is near, or at, planned operational system level or the system technology has been proven to work in its final form under expected conditions. Table 1 shows the range of technologies by country for some of the developed landslide prediction systems.

In Slovenia, the system for landslide prediction in time (acronym is Masprem) was developed in 2013 for the whole country and was financed by the Slovenian Disaster Relief Office and Ministry for Defense (KOMAC et al., 2013, KOMAC et al., 2014; JEMEC AUFLIČ et al., 2015, ŠINIGOJ et al., 2015). At the moment, Masprem predicts landslide probability at a national scale (1: 250,000) and at a local level (1: 25,000) for five selected municipalities where the potential exposure of inhabitants, buildings and different type of infrastructures is displayed, twice daily for both. The system is now in validation phase. When rainfall induced landslide is reported the evaluation of the prediction models reliability is taken.

This paper aims to give an overview of the landslide prediction system in Slovenia, from the conceptual to operational phase. In this study predicted landslide areas are validated with landslides that occurred in September 2014.

Framework of the landslide prediction system

Landslides are triggered by the complex interaction of multiple factors (REICHENBACH et al., 1998). In general, physical, mechanical and hydraulic soil properties, soil thickness, groundwater level, lithology and structural-geological features, vegetation cover and its contribution to soil strength, and local seepage conditions are particular to a geographical site and may induce variable instability conditions in response to rainfall (CROSTA, 1998). In this study, we developed a landslide prediction system on national level that integrates three major components: (1) a landslide susceptibility map; (2) landslide triggering rainfall threshold values and (3) a precipitation forecasting model (i.e., ALADIN) (Fig. 2). Landslide prediction is also calculated on a local level, including exposure maps of inhabitants, buildings and different types of infrastructure to potential landslide occurrence at a scale of 1: 25,000 for five selected municipalities (PETERNEL et al., 2014). Probability of landslide occurrences on a local scale is calculated similarly to the calculations done for the probability of landslide occurrences on a national scale, the difference being in the scale of the landslide susceptibility map (1: 25,000).

The system is operational as of September 2013 and runs in a 12 hour cycling mode, for 24 hours ahead. The results of the probability of landslide models are classified into five classes, with values ranging from one to five; where class one represents areas with a negligible landslide probability and class five areas with a very high landslide probability. Landslide forecast models are automatically transferred to Administration for Civil Protection and Disaster Relief to inform them about the increased probability of landslide occurrences as a consequence of heavy precipitation, which exceeds the rainfall threshold. This landslide prediction system is now in validation phase using the landslide inventory. Therefore, the results need to be treated with care and within their reliability.

Landslide prediction system is a fully automated system based on open source software (PostgreSQL) and web applications for displaying results (Java, GDAL). When ALADIN/SI models are transferred to the GeoZS server the conversion process to raster data starts and stores data in a PostgreSQL database. The same procedure is repeated with the remaining two rasters data or static input data sets presented

Table 1. Developed landslide early warning systems by countries

Country	Type	Monitored area	Observed parameter	Name	Set up	Developer
USA	No longer in operation	San Francisco Bay	Rainfall thresholds		1986–1995	U.S. Geological Survey; National Weather Service
UK	Operational	Blackgang (local)	Ground movement		1994	Isle of Wight Council
Italy	Operational	Tessina landslide	Ground movement		1994	National Research Council
Brazil	Operational	Rio de Janeiro (regional)	Rainfall thresholds, intensity	Alerta Rio	1996	The Geotechnical Engineering Office of Rio de Janeiro
Malaysia	Operational	Kuala Lumpur Highway	Rainfall thresholds		1996	University of Malaya
China	Operational	Hong Kong	Rainfall thresholds, nowcasting		1997	Geotechnical Engineering Office
USA	Operational	Western Oregon	Rainfall thresholds		1997	Oregon
Italy	Operational	Valtellina (regional)	Ground movement, rainfall thresholds	EYDENET	1998	Istituto Sperimentale Modelli E Strutture
Switzerland	No longer in operation, destroyed in a rock slide	Preonzo (local)	Ground movement		1999–2012	Institute for Snow and Avalanche Research
China	Operational	Three Gorges Dam reservoir (specific locations)	Ground movement, pore pressure		1999	China Geological Survey
Italy	Operational	Nals (local)	Ground movement		2000	
New Zealand	Operational	Mt Ruapehu volcano	Lake water level, dam integrity	ERLAWS	2000	GNS Science
Italy	Operational	Lanzo Valleys (regional)	Antecedent rainfall, rainfall intensity	MoniFLaIR	2004	Environmental Protection Agency of Piedmont; University of Calabria
USA	Operational	Apalachians	Rainfall thresholds		2004	U.S. Geological Survey
China	Operational	Zhejiang Province (regional)	Rainfall thresholds		2004	China University of Geosciences
China	Operational prototype	Yaan (regional)	Rainfall thresholds		2005	China Institute of Geo-Environment Monitoring
USA	Operational prototype	Southern California burned areas	Rainfall thresholds		2005	National Oceanic and Atmospheric Administration; U.S. Geological Survey
Canada	Operational	Turtle Mountain (specific locations)	Ground movement		2005	Alberta Geological Survey; University of Lausanne; University of Alberta
USA	Operational prototype	Seattle	Rainfall, precipitation, soil moisture, pore pressure		2006	U.S. Geological Survey; National Weather Service; City of Seattle
China	Operational	Hubei Province (regional)	Precipitation		2006	China University of Geosciences
Switzerland	Operational	Illgraben catchment (local)	Ground movement, flow depth		2007	Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research
Indonesia	Operational prototype	Central Java, West Java, East Java, South Kalimantan, South Sulawesi (local)	Ground movement, rainfall intensity		2007	Gadjah Mada University; DPRI of Kyoto University; Asian Institute of Technology Thailand

Country	Type	Monitored area	Observed parameter	Name	Set up	Developer
Japan	Operational	Country-wide	Rainfall thresholds, soil moisture		2007	Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism; Japan Meteorological Agency
Colombia	Operational	Combeima-Tolima Region	Rainfall, ground movement		2008	Swiss Agency for Development and Cooperation
Indonesia	Operational	Ledokasari village (local)	Precipitation, rainfall thresholds, ground movement		2008	Geological Engineering Department
Philippines	Operational	Albay (specific locations)	Rainfall thresholds	The Bell and Bottle EWS	2009	University of the Philippines Los Baños; Center for Initiative and Research on Climate Change Adaptation
India	Operational	Anthoniari Colony (local)	Soil moisture, ground movement, pore pressure		2009	Amrita Center for Wireless Networks and Applications; Amrita University
Italy	Operational	Country-wide	Rainfall thresholds	SANF	2009	Geo-Hydrological Hazard Assessment; Italian National Research Council
Italy	Operational prototype	Montagu earthflow	Surface displacement	ADVICE	2010	Geohazard Monitoring Group; CNR IRPI
Italy	Operational	Emilia Romagna (regional)	Rainfall thresholds	SIGMA	2010	Civil Protection Agency
Italy	Operational prototype	Umbria (regional)	Soil saturation	PRESSCA	2011	Umbria Region Civil Protection Centre
Italy	Operational	Torgiovannetto landslide	Ground movement		2011	National Civil Protection, Umbria Region, Perugia Province; University of Firenze
Italy	Operational prototype	Piemonte (regional)	Nowcasting	DEFENSE	2011	Regional Agency for Environmental Protection of Piemonte
Philippines	Operational	Tambis 2 and Lipanto, Cali and Limburan, Sitio Lunas	Ground movement	WSN FLEWS	2011, 2013, 2014	
Sri Lanka	Operational	Muzaffarabad (local)	Ground movement, rainfall thresholds, ground water levels	AsaniWasi	2013	Sri Lanka Institute of Information Technology
Norway	Operational	Country-wide	Rain, snowfall intensity		2013	Norwegian Water Resources and Energy Directorate
Slovenia	Operational	National	Rainfall forecast, landslide susceptibility, rainfall threshold	Masprem	2013	Geological Survey of Slovenia
Italy	Operational	Tuscany (regional)	Rainfall intensity		2014	University of Firenze
Bangladesh	Operational	Chittagong (local)	Rainfall thresholds		2015	Institute for Risk and Disaster Reduction; University College London

by landslide triggering threshold values and the landslide susceptibility map. Based on final results, the WMS service for distribution of data is created and displayed in a web application (Fig. 2). When the probability of landslide occurrences is increased, the system automatically sends an email to people responsible for disaster management at Civil protection Agency of Slovenia and to landslide experts at the Geological Survey of Slovenia.

were selected (landslide learning set) and used for the univariate statistical analyses (χ^2) to analyze the landslide occurrence in relation to the spatio-temporal precondition factors (lithology, slope inclination, slope curvature, slope aspect, distance to geological boundaries, distance to structural elements, distance to surface waters, flowlength, and landcover type). The landslide testing subset (33 % of all landslides in database) and representative areas with no landslides were used for the validation of all models developed.

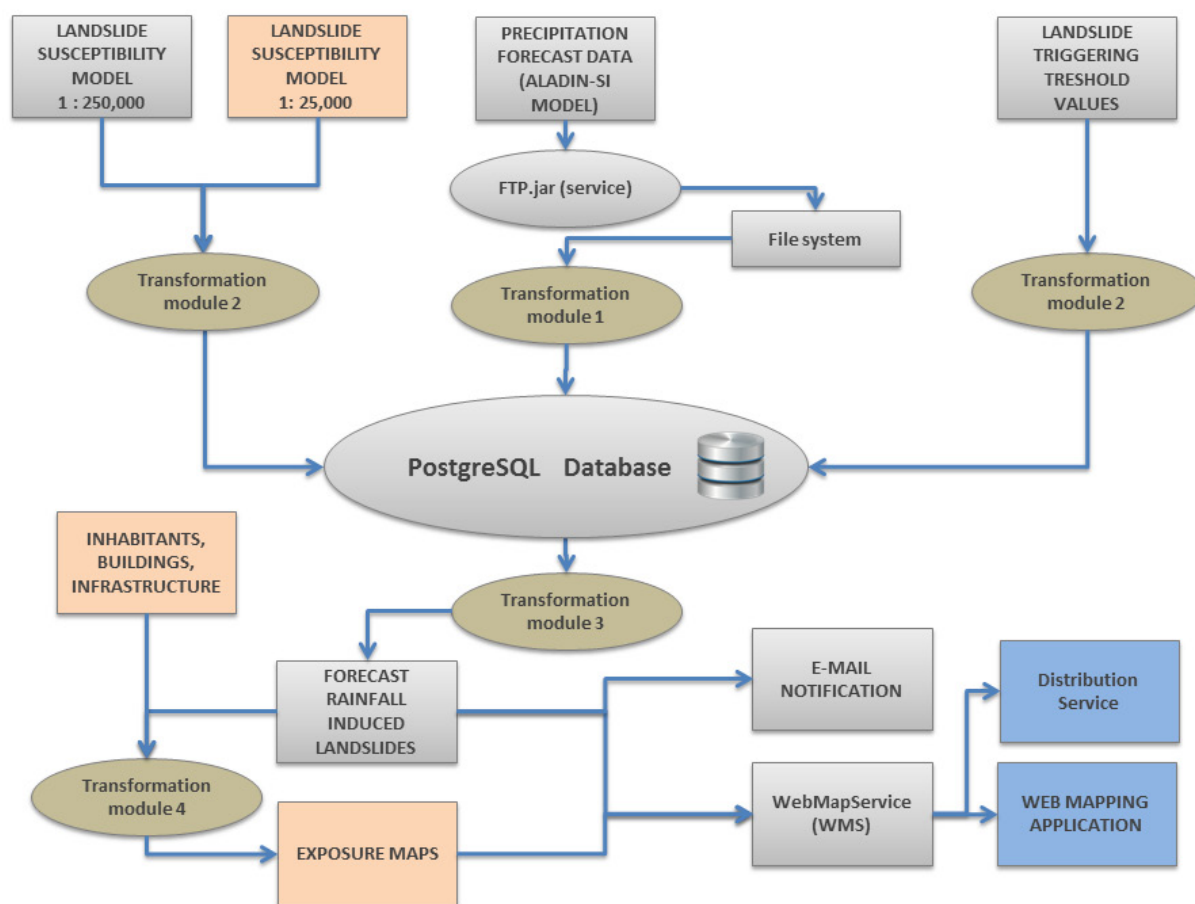


Fig. 2. Conceptual framework of the landslide prediction system on national and local level (after ŠINIGOJ et al., 2015).

Input parameters

Landslide susceptibility map

Based on the extensive landslide database that was compiled and standardized at the national level, and based on analyses of landslide spatial occurrence, a landslide susceptibility map of Slovenia at a scale of 1:250,000 was produced (KOMAC & RIBIČIČ 2006; KOMAC 2012) (Fig. 3A). Altogether more than 6,600 landslides were included in the national database. Of the 3,241 landslides with known location, random but representative 67 %

The results showed that relevant precondition factors for landslide occurrence are (with their weight in a linear model): lithology (0.33), slope inclination (0.23), landcover type (0.27), slope curvature (0.08), distance to structural elements (0.05), and slope aspect (0.05).

For 14 Slovene municipalities, maps and web application were also elaborated based on archive data, detailed field inspection, and computer modeling (using own code) that enables state of the art landslide susceptibility prediction at a scale of 1:25,000 (BAVEC et al., 2012).

Landslide triggering rainfall threshold values

Analyses of landslide occurrences in the area of Slovenia have shown that in areas where intense rainstorms occur (maximum daily rainfall for a 100 years period), and where the geological settings are favorable (landslide prone), an abundance of shallow landslides can be expected (KOMAC, 2005; JEMEC AUFLIČ & KOMAC, 2013). This clearly indicates the spatial and temporal dependence of landslide occurrence upon the intensive rainfall. For defining rainfall thresholds the frequency of spatial occurrence of landslide per spatial unit was correlated with a lithological unit, and 24-hour maximum rainfall data with the return period of 100 years. The result of frequency of landslide occurrence and rainfall data provides a good basis for determining the critical rainfall threshold over which landslides occur with high probability. Thus, the landslide rainfall threshold values were determined using non parametric statistical method chi-square (χ^2) for each lithological unit. In this order we separately cross-analyzed the occurrence of landslides within each unique class derived from the spatially cross analysis of lithological units and classes of 24-hour maximum rainfall. Maximum daily rainfall above 100 mm proved to be critical for landslide occurrence, especially in more loose soils and in less resistant rocks (e.g., Quaternary, Tertiary, Triassic, and Permo-Carbonian rocks). The critical 24-hour rainfall intensities (thresholds for engineer-geological units) can be found in Figure 3B.

Precipitation forecasting model

A regional ALADIN/SI model for Slovenia predicts the status of the atmosphere over the area of Slovenia up to 72 hours ahead (PRISTOV et al., 2012). A model simulates the precipitation (kg/m²), snowfall, water in snow pack,

and air temperature data. ALADIN/SI is a grid point model (439×2421×43), where the horizontal distance between the grid points is 4,4 km and it runs in a 6 hour cycling mode for the next 54 hours by the Environmental Agency of Republic of Slovenia (ARSO). In Figure 3C an example of numerical meteorological model ALADIN/SI is shown. Precipitation forecast as a real time rainfall data is used for modelling probability of landslides through time.

Methodology

The landslide prediction system aims to predict landslide occurrences for the next 24-hours over the study region. Modelling of landslide prediction is one of the key elements of the system. This model highlights fuzzy logic that allows a gradual transition between the variables (Krol & Bernard, 2012). The precise boundaries of the rainfall threshold over which a landslide always occur are very difficult to define. In this order, the model considers continuous rainfall threshold values for each engineering geological unit:

IF ([forecasted precipitation value (RT(x,y))]) > [rainfall triggering value (R_{FALL} (x,y))] AND [landslide susceptibility value] = 1-5 THEN [forecasted rainfall induced landslide value] = 1-5.

The minimum threshold (R_{TMIN}) defines the lowest level, below which a landslide does not occur. The maximum threshold (R_{TMAX}) is defined as the level above which a landslide always occurs (White et al., 1996). Below certain value (R_{TMIN}) the probability of the triggering event is almost none (0), while above certain value (R_{TMAX}) the probability of the triggering event is almost certain (1). Between the two values the probability of triggering rises from 0 to 1, depending upon the membership function that defines the transition. The difference between the R_{TMIN} and R_{TMAX} is set to 30 mm to account for the classification

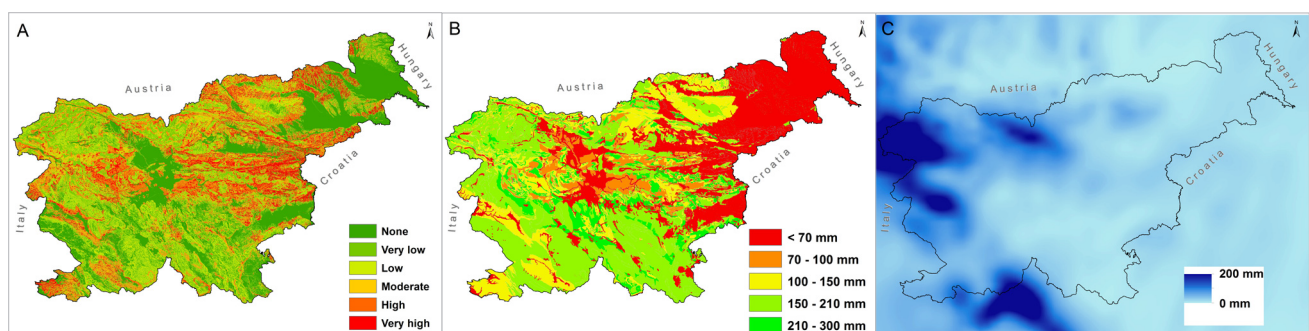


Fig. 3. Three major components (A - landslide susceptibility model; B - landslide triggering rainfall threshold values; C - an example of precipitation forecasting model) which are integrated into the prediction system through separate modules. Calculation of forecast models is performed through dynamic forecast modelling module.

error. R_{SUM} is a total amount of forecasted precipitation and rainfall threshold. It follows that landslide triggering rainfall threshold (R_{FALL}) for each location (cell) x, y in the time interval $[0, t]$ is:

$$R_{FALL}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } R_{sum}(x, y) < R_{TMAX}(x, y) \\ s, s \in (0, 1) & \text{if } R_{TMIN}(x, y) \leq R_{sum}(x, y) \leq R_{TMAX}(x, y) \\ 1 & \text{if } R_{sum}(x, y) > R_{TMAX}(x, y) \end{cases}$$

Final landslide prediction (LandP) is expressed as:

$$\text{LandP} = R_{FALL}(x, y) \times \text{LSM}$$

where LSM is landslide susceptibility map. The final model values are classified into five probability classes –very low (1), low (2), moderate (3), high (4), and very high (5) (Fig. 4).

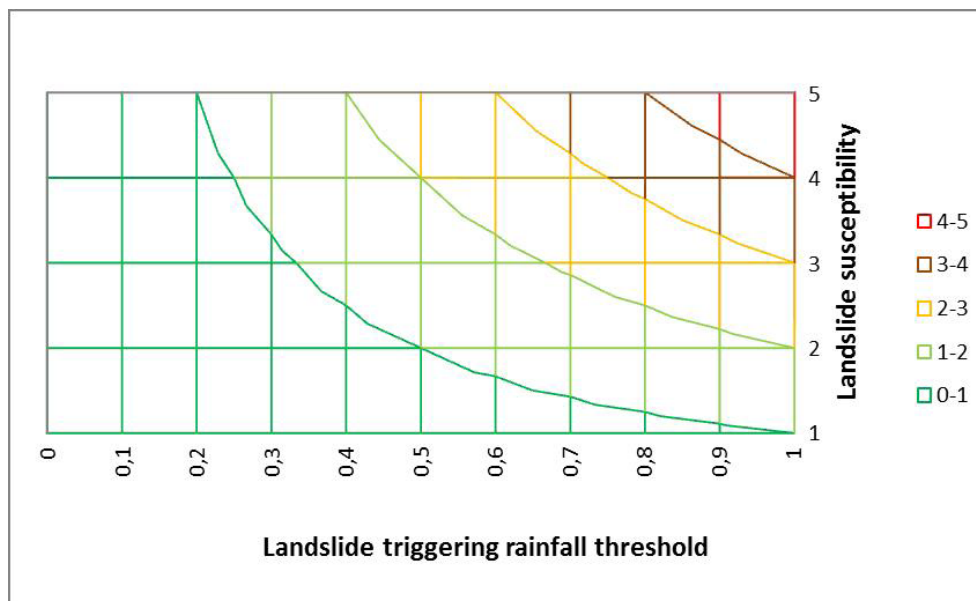


Fig. 4. Gradual transition between landslide triggering rainfall thresholds and landslide susceptibility.

Results and discussion

In the observed period, from September 2013 to August 2016, the system for calculating landslide prediction gave an alert about the probability of landslide occurrences in 84 cases.

System for landslide prediction considers two different rainfall scenarios (JEMEC AUFLIČ et al., 2015). The first one (*M1*) utilizes the landslide susceptibility map, landslide triggering rainfall threshold values and the ALADIN precipitation forecasting model for 24 hours ahead, while the second (*M2*) also integrates two days of antecedent rainfall. Significant impact of antecedent rainfall on landslide occurrences has been shown

in Jemec and Komac (2013).

In this study we highlight the rainfall event that lasted from the 9th to the 14th of September 2014, with the peak on the 13th of September when abundant precipitation triggered over 800 slope failures around Slovenia and caused large material damage (JEMEC AUFLIČ et al., 2016). Precipitation was mainly concentrated in central, south-eastern and north-eastern part of Slovenia (Fig. 5). In these parts of the country, from 70 mm to 160 mm precipitation was measured (ARSO, 2015). The highest amounts of rainfall were measured in Murska Sobota (161 mm), Lisca (160 mm), Planina under Golica (149 mm), Novo mesto (143 mm), Cerklje airport (139 mm), Brežice (140 mm) and Malkovec (130 mm). Fig. 6 shows precipitation forecast posted on the evening of 12th September 2014 and the morning next day for the next 24 hours. Landslide prediction system calculated landslide probability;

particularly both models *M1* and *M2* were forecasted for the zones with high probability for landslide occurrences presented in Figure 7. In general, both models predicted landslides for the eastern and north eastern part of country, with the difference that the *M2* model calculated higher potential for landslides to occur. As can be seen from Figure 8 the landslide susceptibility classes of *M2* predict larger area prone to landslides.

According to reports of Administration for Civil Protection and Disaster Relief numerous landslides occurred between the 12th and the 13th of September 2014. The location of landslides is shown on Fig. 7.

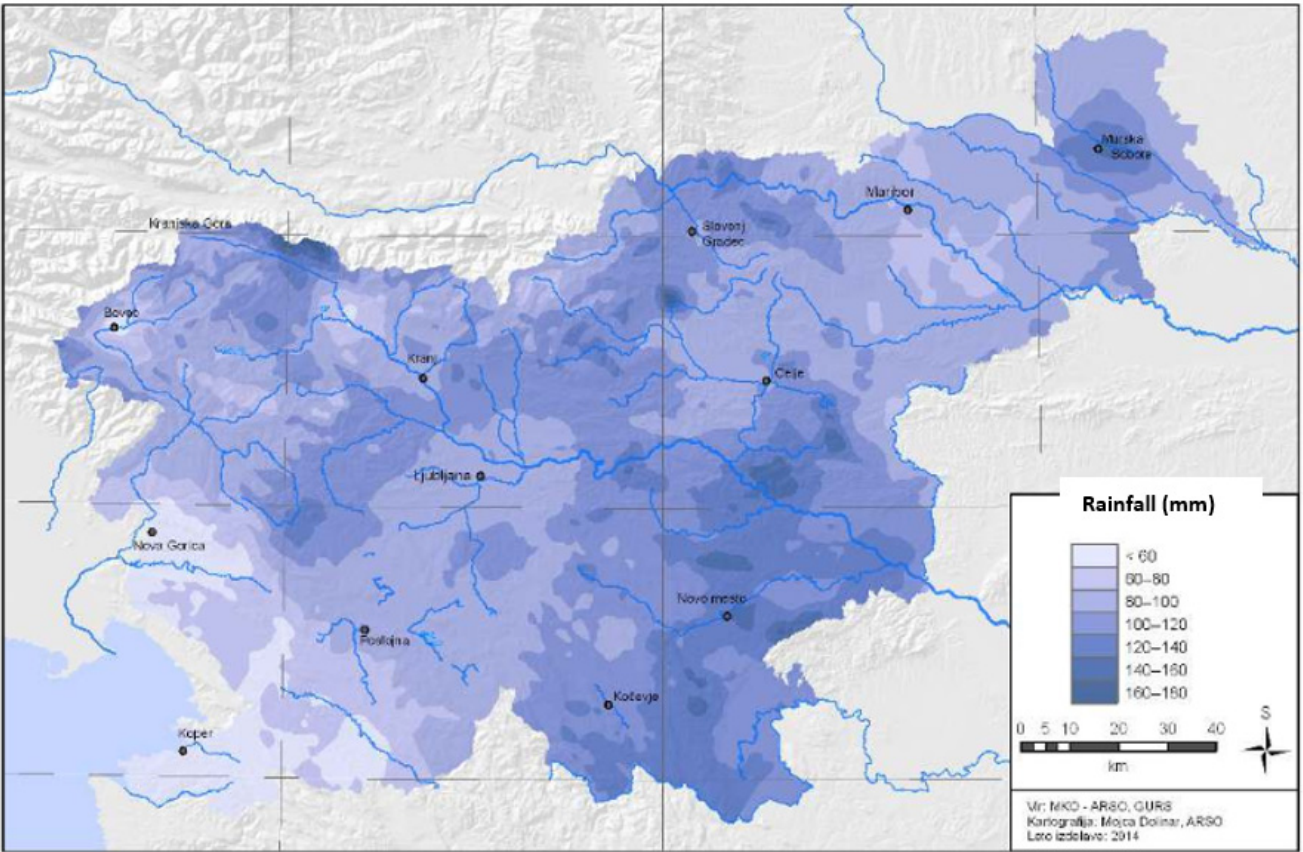


Fig. 5. Rainfall accumulation (mm) from the 9th of September in the morning until the 14th of September in the morning. Map is made on the basis of automatic meteorological data (ARSO).

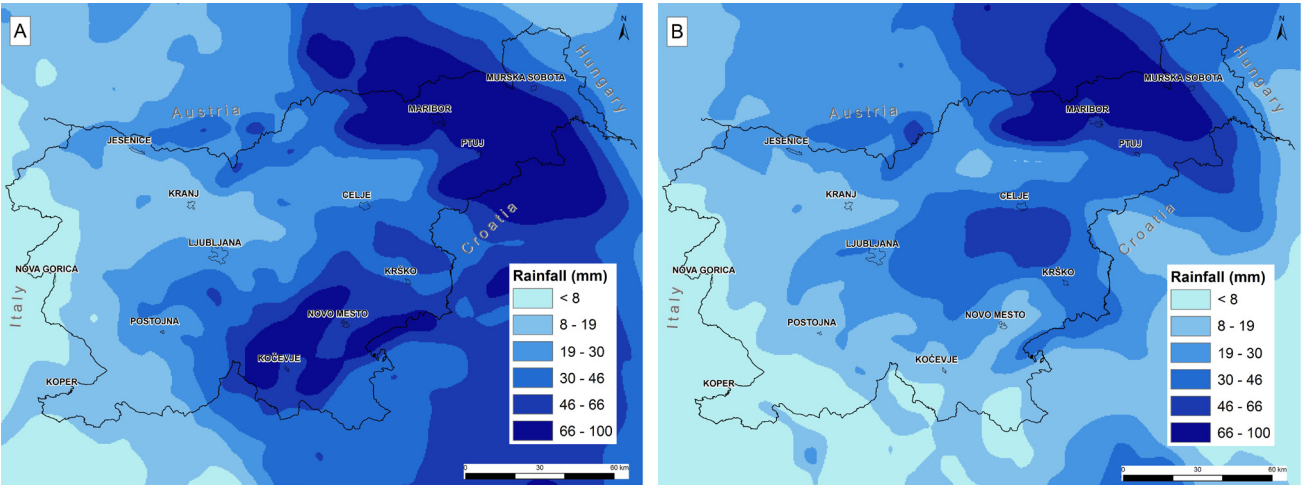


Fig. 6. ALADIN rainfall forecast posted on the evening of 12.9.2014 (A) and the morning of 13.9.2014 (B) (ARSO).

From the results, it is evident that M2 model (integrates two days of antecedent rainfall) forecast more areas where the probability of landslide occurrences is higher. Moreover, in M2 model more landslides correspond to classes with higher landslide susceptibility (Table 2). Altogether we investigated 102 landslides.

Table 2. Distribution of landslides according to the 5-level susceptibility scale considering two different rainfall scenarios (M1 and M2)

LSC	M1	M2
1	92	75
2	1	9
3	1	5
4	4	6
5	4	7

N=102

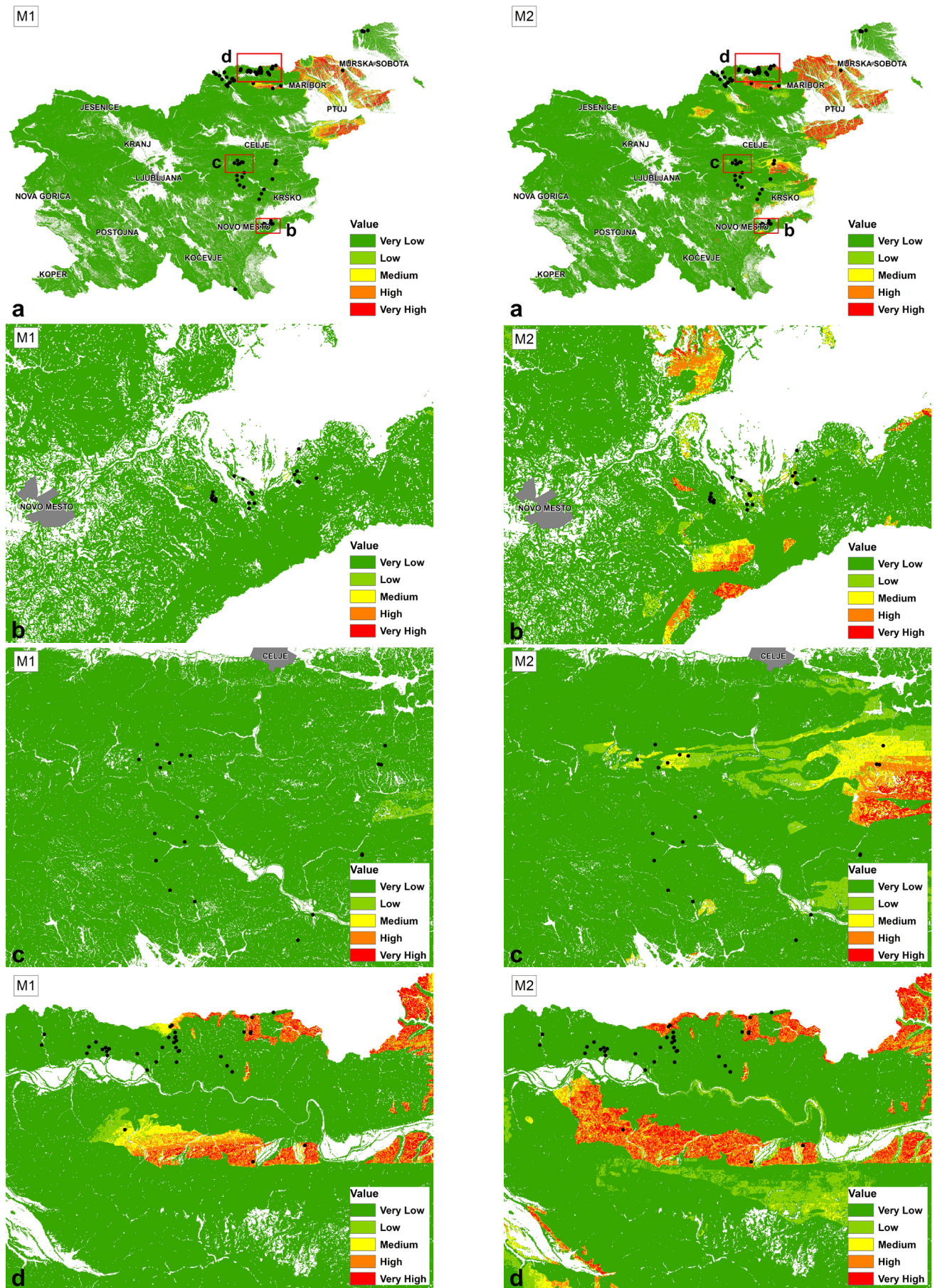


Fig. 7. Visualization of landslide prediction maps calculated on the evening of 12.9.2014, matched to occurred landslides. Note that the M1 indicates the model 1 and M2 model 2; black dots are landslides. a – landslide prediction maps on a national level; b – landslide prediction map on a local level close to town Novo mesto; c – landslide prediction map on a local level close to town Celje; d – landslide prediction maps on a local level close to Maribor.

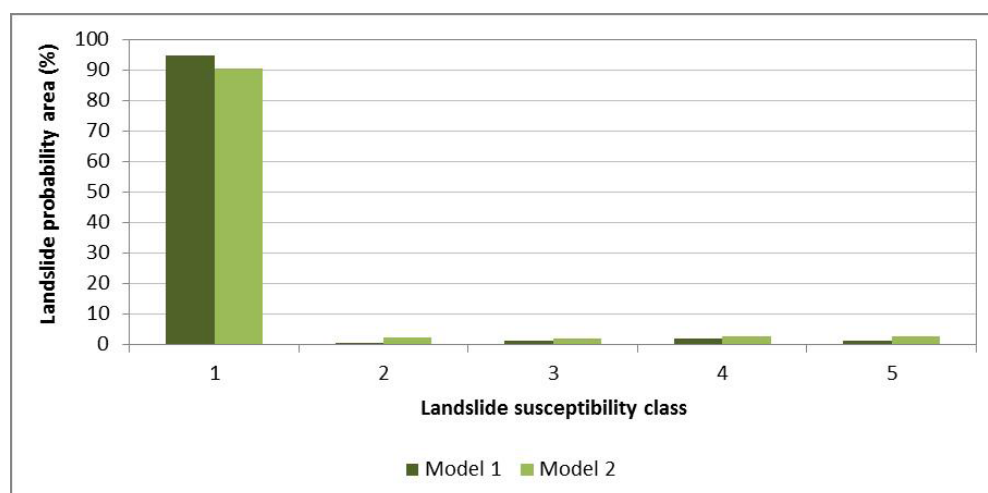


Fig. 8. Relative proportion of predicted landslide area (i.e., susceptibility class 5) according to models M1 and M2.

While the system has potential to become operational in use after the validation phase, there are also limitations related to the input data that should not be neglected: spatial resolution of the ALADIN model, the incomplete landslide inventory that is important for the validation, defining how many days of antecedent rainfall significantly influence the landslide occurrences, characteristic of lithological units according to water contents.

Conclusions

In Slovenia, precipitation and related phenomena represent one of the most important triggering factors for the occurrence of landslides. In the past decade, extreme rainfall events in which a very high level of precipitation occurs in a relatively short rainfall period have become increasingly important and more frequent, causing numerous undesirable consequences. Intense rainstorms cause flash floods and mostly trigger shallow landslides and soil slips. These events could be identified and to some extent also minimized if better knowledge on the relation between landslides and rainfall would be available. To tackle the problem from a prevention aspect, a landslide prediction system has been developed in 2013. The system aims to (1) predict rainfall induced landslides at national and local level by integrating a landslide susceptibility map, rainfall threshold values and a precipitation forecasting model and (2) inform inhabitants of an increased probability of landslide occurrences.

Despite the limitations currently affecting the landslide prediction system, results show that the system demonstrates capability in predicting rainfall induced landslides by considering the most important triggering factor, which is rainfall in

this study. When the validation phase will be finished and the certainty of system will be high enough, the system will be able to inform infrastructure owners, civil agencies, and operators of potential landslide hazards.

Acknowledgment

The authors would like to thank the Administration for Civil Protection and Disaster Relief and the Ministry for Defense for financing the project Masprem, the Slovenian Environment Agency (ARSO) for providing ALADIN-SI data and DG Information Society at the European Commission for financing the project InGeoClouds (Ref. 297300). Authors would also like to thank colleagues, with whom they conducted the research and worked on the project.

References

- ALLASIA, P., MANCONI, A., GIORDAN, D., BALDO, M. & LOLLINO, G. 2013: ADVICE: A New Approach for Near-Real-Time Monitoring of Surface Displacements in Landslide Hazard Scenarios. *Sensors* 13/7: 8285-8302, [doi:10.3390/s130708285](https://doi.org/10.3390/s130708285)
- ARSO 2015: National Meteorological Service of Slovenia. Ministry for Environment and Spatial Planning, Environmental Agency of the Republic of Slovenia, Internet: <http://meteo.arso.gov.si/met/en/app/webmet/> (19.10.2016)
- BAVEC, M., ČARMAN, M., DURJAVA, D., JEŽ, J., KRIVIC, M., KUMELJ, Š., POŽAR, M., KOMAC, M., ŠINIGOJ, J., RIŽNAR, I., JURKOVŠEK, B., TRAJANOVA, M., POLJAK, M., CELARC, B., DEMŠAR, M., MILANIČ, B., MAHNE, M., OTRIN, J., ČERTALIČ, S., ŠTIH, J., HRVATIN, M. et al.: 2012 Izdelava prostorske baze podatkov in spletnega informacijskega

- sistema geološko pogojenih nevarnosti zaradi procesov pobočnega premikanja, erozijskih kart ter kart snežnih plazov - pilotni projekt: sumarno poročilo. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 40 p.
- BAUM, R.L. & GODT, J.W. 2010: Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, 7/3: 261, [doi:10.1007/s10346-009-0177-0](https://doi.org/10.1007/s10346-009-0177-0).
- CROSTA, G. 1998: Rationalization of rainfall threshold: an aid to landslide hazard evaluation. *Environ. Geol.*, 35: 131-145.
- CRUDEN, D.M. 1991: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 43/1: 27, [doi:10.1007/BF02590167](https://doi.org/10.1007/BF02590167).
- HUNGR, O., LEROUÉIL, S. & PICARELLI, L. 2014: The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11/2: 167-194, [doi:10.1007/s10346-013-0436-y](https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y).
- IVERSON, R.M. 1997 The physics of debris flows. *Rev. Geophys.* 35/3: 245-296.
- JEMEC AUFLIČ, M. & KOMAC, M. 2012: From national landslide database to national hazard assessment. In: MAMBRETTI, S. (ed.): *Landslides*. Wit Press: 11-26, [doi:10.2495/978-1-84564-650-9/02](https://doi.org/10.2495/978-1-84564-650-9/02).
- JEMEC AUFLIČ, M. & KOMAC, M. 2013: Rainfall patterns for shallow landsliding in perialpine Slovenia. *Natural hazards*, 67/3: 1011-1023, [doi:10.1007/s11069-011-9882-9](https://doi.org/10.1007/s11069-011-9882-9).
- JEMEC AUFLIČ, M., KUMELJ, Š., PRKIĆ, N. & ŠINIGOJ, J. 2015: Zbiranje podatkov o zemeljskih plazovih in zanesljivost napovedovanja njihovega proženja = Landslide data collection and evaluation of predicted models. *Ujma*, 29: 363-370.
- JEMEC AUFLIČ, M., ČARMAN, M., MILANIČ, B. & JEŽ, J. 2016 Vpliv obilnih padavin na pobočne nestabilnosti na območju občine Šentjernej jeseni 2014. In: JOVIČIĆ, V. (ed.): *Zbornik sedmega posvetovanja slovenskih geotehnikov*, 16 - 18. junij, 2016 v Podčetrtku. Ljubljana: Slovensko geotehniško društvo, 227-234.
- HAQUE, U., BLUM, P., DA SILVA, P., ANDERSEN, P., PILZ, JÜRGEN, C., SERGEY, R., MALET, J-P, JEMEC AUFLIČ, M., ANDRES, N., POYIADJI, E., et al. 2016: Fatal landslides in Europe. *Landslides*, Online First, [doi:10.1007/s10346-016-0689-3](https://doi.org/10.1007/s10346-016-0689-3).
- KOMAC, M. 2005: Rainstorms as a landslide-triggering factor in Slovenia. *Geologija*, 48/2: 263-279, [doi:10.5474/geologija.2005.022](https://doi.org/10.5474/geologija.2005.022).
- KOMAC, M. & RIBIČIČ, M. 2006. Landslide susceptibility map of Slovenia at scale 1:250,000 = Karta verjetnosti pojavljanja plazov v Sloveniji v merilu 1:250.000. *Geologija*, 49/2: 295-309, [doi:10.5474/geologija.2006.022](https://doi.org/10.5474/geologija.2006.022).
- KOMAC, M. 2012: Regional landslide susceptibility model using the Monte Carlo approach - the case of Slovenia. *Geol. Q.*, 56/1: 41-54.
- KOMAC, M., ŠINIGOJ, J., JEMEC AUFLIČ, M., ČARMAN, M. & KRIVIC, M. 2013: Landslide hazard forecast in Slovenia - MASPREM. In: MIHALIĆ ARBANAS, S. & ARBANAS, Ž. (eds.): *Landslide and flood hazard assessment, 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region with the 3rd Workshop of the Croatian-Japanese Project "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia"*, Zagreb, Croatia from March 6th to 9th, 2013: 225-23.
- KOMAC, M., ŠINIGOJ, J. & JEMEC AUFLIČ, M. 2014: A national warning system for rainfall-induced landslides in Slovenia. In: SASSA, K., CANUTI, P. & YIN, Y. (eds.): *Landslide science for a safer geoenvironment, 2, Methods of landslide studies*, 577-582, [doi:10.1007/978-3-319-05050-8_89](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8_89).
- KROL, O. & BERNARD, T. 2012: ELDEWAS - Online early warning system for landslide detection by means of dynamic weather nowcasts and knowledge based assessment. In: SEPPELT, R., VOINOV, A.A., LANGE, S. & BANKAMP (eds.): *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet: Pathways and Visions under Uncertainty, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany*: 212-219.
- MERCOGLIANO, P., SCHIANO, P., PICARELLI, L., OLIVARES, L., CATANI, F., TOFANI, V., SEGONI, S. & ROSSI, G. 2010: Short term weather forecasting for shallow landslide prediction. *Int. Conf. Mountain Risks: Bringing Science to Society*: 525-530, [doi:10.1007/978-3-642-31337-0_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31337-0_16).
- OSANAI, N., SHIMIZU, T., KURAMOTO, K., KOJIMA, S. & NORO, T. 2010: Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network. *Landslides*, 7/3: 325-338, [doi:10.1007/s10346-010-0229-5](https://doi.org/10.1007/s10346-010-0229-5).
- PETERNEL, T., ŠINIGOJ, J., KOMAC, M., JEMEC AUFLIČ, M. & KRIVIC, M. 2014: Izpostavljenost prebivalstva, objektov in infrastrukture zaradi pojavljanja zemeljskih plazov: primer petih slovenskih občin = Exposure of inhabitants, buildings and infrastructure to landslides: a case of five Slovenian municipalities. *Geologija*, 57/2: 193-202, [doi:10.5474/geologija.2014.017](https://doi.org/10.5474/geologija.2014.017).

- PRISTOV, N., CEDILNIK, J., JERMAN, J. & STRAJNAR, B. 2012: Priprava numerične meteorološke napovedi ALADIN-SI. Vetrnica, 17-23.
- REICHENBACH, P., CARDINALI, M., DE VITA, P. & GUZZETTI, F. 1998: Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy). *Environ. Geol.*, 35/2-3:146-159, [doi:10.1007/s002540050301](https://doi.org/10.1007/s002540050301).
- ROSI, A., PETERNEL, T., JEMEC AUFLIČ, M., KOMAC, M., SEGONI, S., CASAGLI, N.: 2016 Rainfall thresholds for rainfall-induced landslides in Slovenia. *Landslides*, 13/6: 1571-1577, [doi:10.1007/s10346-016-0733-3](https://doi.org/10.1007/s10346-016-0733-3)
- ŠINIGOJ, J., JEMEC AUFLIČ, M., KUMELJ, Š., KRIVIC, M., POŽAR, M., PODBOJ, M., TUKIĆ, M., PETERNEL, T. & PRKIĆ, N. 2015: Nadgradnja sistema za obveščanje in opozarjanje v primeru proženja zemeljskih plazov - Masprem2: poročilo ob prvem mejniku. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 42 p.
- TIRANTE, D., CREMONINI, R., MARCO, F., GAETA, A.R. & BARBERO, S. 2014: The DEFENSE (debris Flows triggERed by storms – nowcasting system): An early warning system for torrential processes by radar storm tracking using a Geographic Information System (GIS). *Computers & Geosciences* 70: 96-109, [doi:10.1016/j.cageo.2014.05.004](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.05.004).
- THIEBES, B. 2012: Landslide Analysis and Early Warning Systems. Springer Berlin Heidelberg, 35-54, [doi:10.1007/978-3-642-27526-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27526-5).
- VARNES, D.J. 1978: Slope movement types and processes. *Landslides, analysis and control*. Sp. Rep. Nat. Acad. of Sci., 176: 11-33.
- WHITE, I.D., MOTTERSHEAD, D.N. & HARRISON, S.J. 1996: *Environmental Systems*, 2nd edition. Chapman & Hall, London: 616 p.



Longitudinal profiles of torrential channels in the Western Karavanke mountains

Vzdolžni profili hudourniških strug v Zahodnih Karavankah

Nejc MOHORIČ¹, Dejan GRIGILLO¹, Mateja JEMEC AUFLIČ², Matjaž MIKOŠ¹ & Bogomir CELARC²

¹Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenia;
e-mail: nejc.moh@gmail.com, dejan.grigillo@fgg.uni-lj.si, matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

²Geological survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia;
e-mail: mateja.jemec@geo-zs.si, bogomir.celarc@geo-zs.si

Prejeto / Received 22. 12. 2015; Sprejeto / Accepted 16. 12. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 23. 12. 2016

Key words: torrents, morphometry, faults, erosion, knickpoints, Western Karavanke Mts.

Ključne besede: hudourniki, morfometrija, prelomi, erozija, prevojne točke, Zahodne Karavanke

Abstract

From the national digital elevation model DMV 5 of the Western Karavanke longitudinal profiles of fifty-three torrents were extracted. Longitudinal profiles of torrential channels in study area have generally convex sections and do not correspond to equilibrium state. In this paper, changes in lithology across faults and other potential influences are discussed as possible cause for observed convex longitudinal profiles. Some typical cases where it has been found, that convex sections could be result of faults, are graphically showed. Also lithology of torrential stream bed could be one of main factors for convexity. This applies in particular if the torrent crosses from soft to solid rock.

Izvleček

Iz državnega digitalnega modela višin DMV 5 območja Zahodnih Karavank so bili določeni vzdolžni profili 53 hudourniških strug. Vzdolžni profili hudournikov imajo večinoma odsekoma konveksno obliko in ne ustrezajo pogojem ravnovesnega stanja. V članku so kot možni vzroki za konveksnost vzdolžnih profilov obravnavane spremembe v litologiji preko prelomov in nekateri drugi potencialni dejavniki. Grafično so prikazani posamezni značilni primeri, kjer je bilo ugotovljeno, da so lahko konveksni odseki vzdolžnih profilov hudourniških strug posledica prelomov. Prav tako se je ugotovilo, da je lahko litologija podlage dna hudourniške struge eden izmed glavnih razlogov za pojavljanje konveksnih odsekov. To velja še posebej za primere, kjer hudournik preide iz mehkih v trdne kamnine.

Introduction

Longitudinal profiles of torrential channel have been investigated by many authors (SNOW & SLINGERLAND, 1987; HANTKE & SCHEIDEGGER, 1999; RĂDOANE et.al., 2003; GOSWAMI et al., 2012). The most explored phenomenon related to longitudinal profiles is their form. Steady-state longitudinal stream profiles normally have a concave shape, which is not typical for torrential channels, where other shapes are often recognized. Their profiles commonly exhibit a variation of concave, convex and flat sections, which are characteristics of morphologically-active streams with significant erosion activity.

Extreme phenomenons like debris flows can occur in morphologically-active streams. This can result in significant damage to property and can threaten lives. Landslides, rockfalls and even snow avalanches can be triggered into the stream channel because of steep slopes and steady-state form can fail.

In this paper, we investigated torrents in the Western Karavanke on northern slopes of the Upper Sava Valley from the Završnica torrent to the East to the Trebiža torrent to the West. Our main objective was to define possible reasons for the evolution of convexity, based on longitudinal profile form of torrential streams in the study area.

In order to attain this objective, we are taking the following steps: (1) to define study area and data basis; (2) to characterize the form of the longitudinal profiles by using DMV data; (3) to study lithological settings and faults.

Steady-state longitudinal profiles of headwater torrents

The steady-state form of torrential longitudinal profiles in general has concave shape (slope decreases downstream) (HACK, 1957, RĂDOANE et al., 2003, PAZZAGLIA et al., 1998, SEIDL et. al., 1994). The torrent gradient typically decreases in the downstream direction. These characteristics are typical for morphologically non-active torrential watercourses, subject to deviations with respect to the geological structure of an area (HACK, 1957). Different empirical equations to describe steady-state form were developed. For example, FLINT (1974) described steady-state longitudinal profiles with empirical power law:

$$S = k_s A^{-\theta}$$

Where S is the local channel slope, A is the upstream contributing drainage area, and k_s and θ are the steepness index and concavity index.

A characteristic of morphologically active torrents are convex longitudinal profiles. Torrential channels are generally young morphological formations and rarely have a concave shape of their longitudinal profiles. They can be segmented into concave, convex, and flat sections,

and they exhibit knickpoints (Fig. 1). The reason for these features may be tectonic activity, erosion processes, or changes in the composition of the bedrock. Such features also form where a large part of the headwater torrent runs over the bedrock, except close to the junction with the main stream where it usually flows in its own deposits. The cause may also be different erosion ability between two torrential streams which merge together. The process of establishing equilibrium in longitudinal profiles in nature can take up to several million years (STOCK & MONTGOMERY, 1999). The interpretation of a historical development of longitudinal profiles of headwater torrential streams is based on the understanding of the governing processes under which a torrential channel incises (WOHL, 1998). The bedrock and channel incision are particularly important because they can regulate how fast erosion changes expand along the torrential channel (TINKLER & WOHL, 1998). The grade of alluvial channels is determined by their hydraulic regime, whereas the grade of bedrock channels may be an independent variable, if weathering takes over erosion (HOWARD, 1980; HOWARD, 1998). In bedrock channels alluvial reaches may occur when and if transport capacity reduces due to a low channel grade.

For upper reaches of torrential channels, large grades and flow intermittency are typical. In middle reaches somewhat lower grades and more steady flow prevail, whereas in the lower reaches an inflection point or a major knickpoint at the fan apex can be present. The largest grades can also occur in middle or lower reaches at conflu-

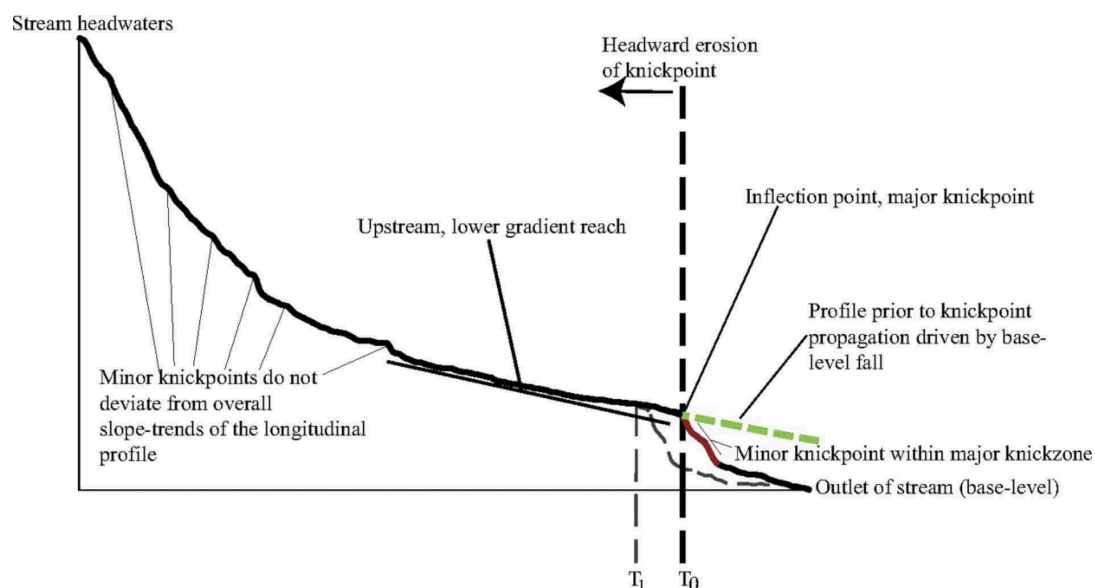


Fig. 1. Sample of a typical longitudinal profile of morphologically-active torrential channel (FOSTER & KELSEY, 2012)

ences with larger torrential streams; in this case the long-term and more pronounced incision of the main torrent prevails. These non-specific phenomena may also be affected by other erosion processes, e.g. glacial erosion.

The continuous alternation of concave and convex reaches is a sign of an unstable channel with pronounced geomorphological activity (GAVRILOVIĆ, 1972). Torrential tributaries with pronounced erosion activity and sediment supply can contribute to this situation. Channels, with concave longitudinal profiles and one major knickpoint at confluence with tributary, can occur. This is a sign of an active tributary with high erosion capacity that contributes to the main stream large amounts of sediment (GAVRILOVIĆ, 1972). However, this dependence is not always evident or reliable, as the main stream, due to the geological characteristics of the bedrock or a local sediment source, can have a convex form.

Since they are close to their (final) stable stage, sediment potential of mature torrents is much lower than that of immature torrents. The longitudinal profiles of torrential streams usually follow the ideal parabolic curve that corresponds with the terminal grade when a torrent does not degrade nor aggrade any more under given geological settings in its catchment (GAVRILOVIĆ, 1972). Even if a torrential stream exhibits a steady longitudinal profile, it is still susceptible to change. Landslides, rock falls and even avalanches can disturb the equilibrium and lead to adjustments to a new one. From a longitudinal profile of a torrential stream it is also possible to predict which reaches could undergo degradation, and which ones the aggradation of the channel. Of course, this is true for natural (unregulated) torrents. In regulated torrents, equilibrium in their longitudinal profiles is reached by e.g. transverse structures, such as check dams.

Study area

Study area belongs to the Slovenian part of Western Karavanke (Fig. 2A). Structurally, they are part of the Southern Alps. The mountain range has a distinct SE-NW orientation, with well-expressed and narrow ridge crests (Fig. 2C). Geological composition of the range is rather heterogeneous, with occurrences of carbonate, clastic, volcanoclastic and volcanic rocks of different ages, and with complex tectonic structure (JURKOVŠEK, 1985, BUSER & CAJHEN, 1978). For the

purpose of research, the compiled geological map and structural subdivision from BREŇČIĆ & POLTNIG (2008) was used (Fig. 2B, C). Presently the area has a well-distributed network of torrential watercourses, most of which are located in narrow valleys. Springs often have character of contact karst and emerge at the junction between permeable (eg. carbonate rocks) and impermeable rocks (eg. sandstone) (BUNČIĆ, 2014). Activity of the Upper Sava Glacier in Quaternary also had a large impact on geomorphic characteristics of the area. The glacier formed the typical U-shaped Upper Sava Valley along the southern foot of the Western Karavanke range.

Geological background

Western Karavanke structurally belongs to the Southern Alps (PLACER, 2008) and are composed of the following tectonic units (BREŇČIĆ & POLTNIG, 2008, modif. from JURKOVŠEK, 1986, BUSER & CAJHEN, 1978 and BUDKOVIĆ, 1999) (Fig. 2B): Paleozoic of Carnic Alps, Golica Syncline, Košuta Unit, Young Paleozoic of Jesenice Unit, Southalpine Triassic Unit. Their boundaries are mainly steep compressive strike-slip faults. POLINSKI & EISBACHER (1992) investigated the origins of deformations and structure of the Karavanke, describing them as a consequence of the multi-phase oblique convergence.

The study area is characterized by the presence of wide varieties of lithological units (Fig. 2C) as a consequence of their origin in the different paleogeographical environments during geological history (BREŇČIĆ & POLTNIG, 2008; BREŇČIĆ et al., 1995). The majority of faults are WNW-ESE orientated with dextral strike-slip displacement in the transpressional regime. Subordinately, there are also NE-SW directed, left-lateral strike-slip faults, and accommodating rotation of blocks between main faults. Recent morphology of Karavanke is a consequence of the on-going tectonic movements evidenced by the current seismic activities (JAMŠEK RUPNIK, 2013), active tectonics (POLINSKI & EISBACHER, 1991; NEMES et al., 1997; JAMŠEK RUPNIK, 2013; MIHEVC et al., 2013) and accurate GPS measurements (VRABEC et al., 2006).

The oldest rocks in the research area are highly erodible, predominately shales of Hochwipfel beds (Lower Carboniferous) with subordinately more resistant limestone lenses. Auernig beds (Upper Carboniferous – Lower Permian) are similar by their lithological composition. Mas-

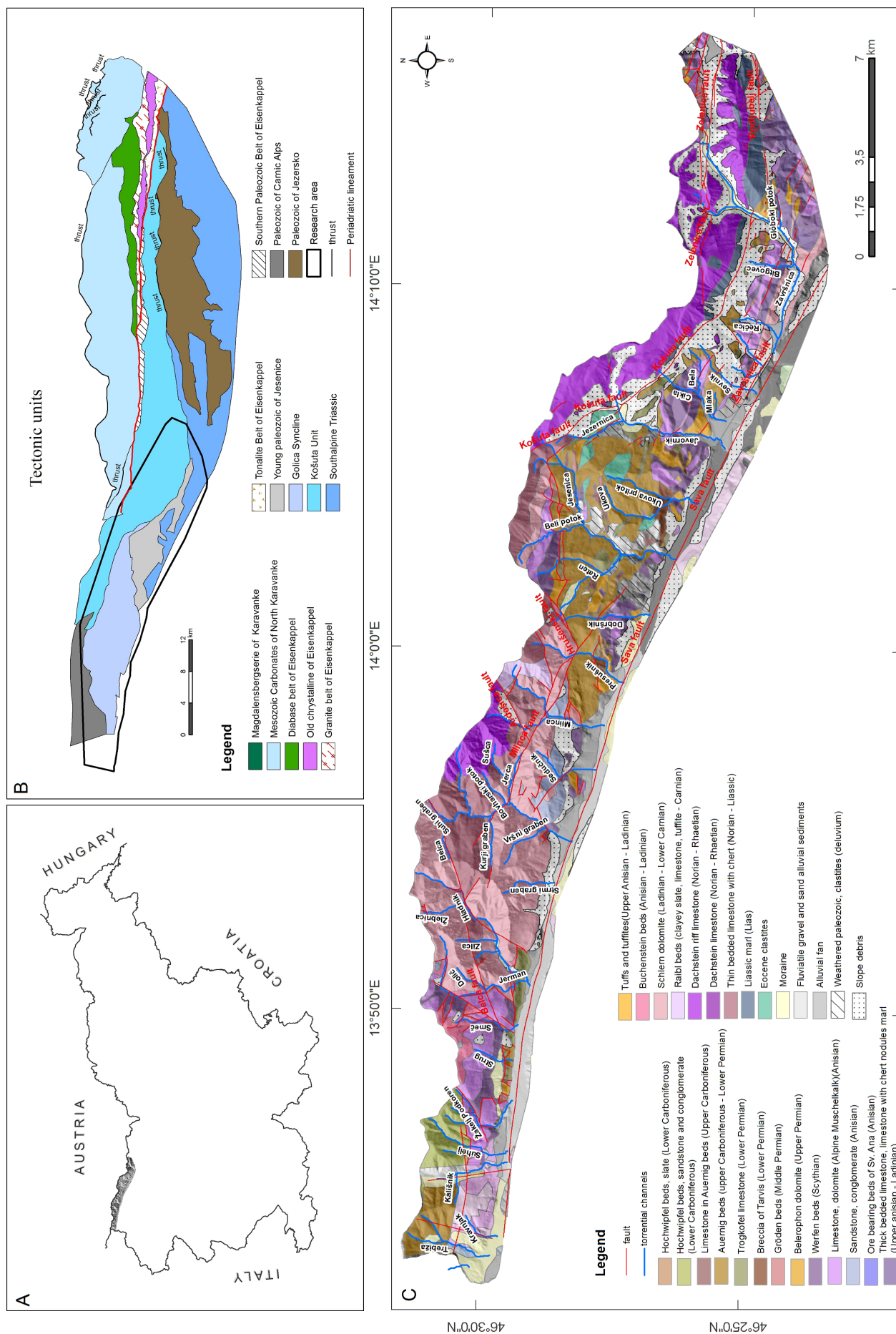


Fig. 2. Location of the Western Karavanke and the study area (modif. after BRENCIČ & POLTNG, 2008). A. Geographic position; B. Tectonic Units of Karavanke; C. Geological map of western Karavanke (Slovenian part).

sive Trogkofel limestones (Lower Permian) are comparably more resistant than overlying Brecia of Tarvis and Gröden sandstones (Lower and Middle Permian, respectively). Belerophon dolomites (Upper Permian) are positioned above. Lower Triassic Werfen beds are of mixed clastic – carbonate origin, less resistant compared to the overlying limestones and dolomites of the Anisian Alpine Muschelkalk. In the upper part of the Anisian and in the Ladinian, again mixed siliciclastic, volcanoclastic and carbonate rocks prevail, followed laterally and upward by more resistant Schlern dolomite (Ladinian – Lower Carnian). In the Carnian Raibl beds, there again dominate more erodible siliciclastic component, followed by predominately thin bedded dolomite and limestone succession (Upper Triassic – Jurassic), occasionally also marlstones in Golica syncline. On the other hand, the highest peaks of the research area are composed of the highly resistant massive and thick-bedded Upper Triassic Dachstein limestones. There are also small patches of the Eocene clastites present in the area. Quarternary sediments are represented mainly by moraine, alluvial sediments and slope debris.

Generally, the studied torrential areas are strongly heterogeneous from the geological point of perspective.

Methodology

National digital elevation model DMV 5 (GURS, 2011-2014) was used to calculate the longitudinal profiles of the torrential channels. DMV 5 is given as x, y and z coordinates in Slovenian national grid D48/GK and organized in a grid cell with spatial resolution of 5 meters. DMV 5 was produced in years 2006 and 2007 by fusion of the results from stereophotogrammetric restitution of aerial images and resampling of the national digital elevation model DMV 12.5 (PODOBNIKAR, 2008). Update of DMV 5 was performed in 2011 within the project of Cyclical Aerial Survey of Slovenia and orthophoto production (GURS, 2011-2014). DMV 5 was chosen for our project over the DMV 12.5 because of better spatial resolution, although some of the past studies showed that both elevation models are useless for more precise mathematical modelling (e.g. SODNIK et al., 2009). Since this paper describes complete torrents, from springs to confluences with larger streams, good approximations of the longitudinal profiles can be obtained already by using DMV 5 (MOHORIČ, 2015). For the quality of the elevation

model not only the spatial resolution, but also the data acquisition, height accuracy and processing of the data are important factors.

Fifty-three torrential channels situated in the Western Karavanke were analysed in the research. The analysis included the torrents whose watershed area exceeded 1.5 km² and are situated between torrents of Trebiža on the west and Završnica on the east.

The torrential streams were obtained within ArcGIS mapping platform (ESRI, 2013), the Environmental System Research Institute's software for data analysis in the Geographic Information Systems (GIS). Rasterised DMV 5 was used to calculate the flow direction and flow accumulation. Torrential network was produced by thresholding the flow accumulation raster as described in PARMENTER & MELCHER (2010). Furthermore, by vectorisation of the torrential network short reaches of potential torrential channels were obtained. Reaches that represented individual torrent were identified on the topographic map (SINERGISE, D.O.O. & MAPYX LIMITED, 2015) and manually joined into a single torrent. In order to calculate longitudinal profiles, the torrents' heights were interpolated from DMV 5. The whole methodology of the longitudinal profiles of torrential channels calculation and analysis is in detail discussed in detail in MOHORIČ (2015).

Fault network geometry was extracted from the geological map of the Karavanke at the scale of about 1:110.000 (BRENČIČ & POLTNIG, 2008). For areas not covered by this map, data of the Basic Geological Map of SFRJ in the scale 1 : 100.000, sheets Beljak in Ponteba (JURKOVŠEK, 1986) and Celovec (Klagenfurt) (BUSER & CAJHEN, 1978), were used. Using GIS, we determined the points where faults cross torrential streams.

Results and discussion

Extracted longitudinal profiles of torrential channels are shown in Figs. 3 to 10. Sites where channels are crossed by transversal faults are marked as points and longitudinal faults as point clouds. Faults which cross torrential channels under torrential sediment are excluded. Short sections of convex shape occur in all analyzed stream profiles. Extreme cases, such as Sevnik torrent, exhibit almost flat longitudinal profile. Obviously, analyzed stream profiles are not equilibrated.

Influence of faults

In some cases, knickpoint with convex longitudinal profile of torrential channel occurs in areas of faults. The most significant examples where faults are oriented transverse to the direction of torrential channel are Jelenji potok at length 0,7 km, Hladnik at length 5,9 km and Suhelj at length 1,95 km (Fig. 3). Such cases may occur when faults are oriented transverse to the direction of torrential channel and separate tectonic blocks of soft rock upstream from more resistant rocks downstream. In this place, it is probably not that important if they are fractured in direction of the slope or in opposite direction of slope (on the southern parts of Karavanke slopes usually dip steeply to the south). Typically, fault zones occur in strands of several parallel faults, with observed zone widths ranging from couple of ten meters up to 300 meters. Principal fault plane usually occurs at the contact between rheological more resistant and less resistant fault-blocks, whereas the parallel and anastomosing faults (where individual fault zones/faults in the fault zone are not parallel and can be wrapped, devided and reunited again) with smaller displacements are mainly positioned in less resistant rocks.

A significant number of torrential streams at least partly run parallel to the deformed zone along the fault traces. The influence of longitudinal faults along torrents on formation of knick-points is not observed. In a tectonically deformed zone where cataclastic sediments are present, a formation of concave, equilibrium profiles is expected. Therefore, erosion of torrential streams in cataclastic zone happens more easily. However, convex sections at some of the samples in study area most likely a result of other factors (eg. Hladnik at Fig. 3). For example, many studies have investigated the influence of tectonics on channel morphology, where channels steepen their longitudinal profiles in association with faster uplift (KIRBY & WHIPPLE, 2001; KIRBY et al., 2003, STARK, 2006; DIBIASE et al., 2010). Moreover, all other factors such as neotectonic movements and discontinuities caused by the different stages in the evolution of the profile, account for deviations from the general form of the profile. Due to lack of data, the tectonic structure of the study area is quite uncertain. Thus, the importance of tectonic evolution in this study has not been fully highlighted.

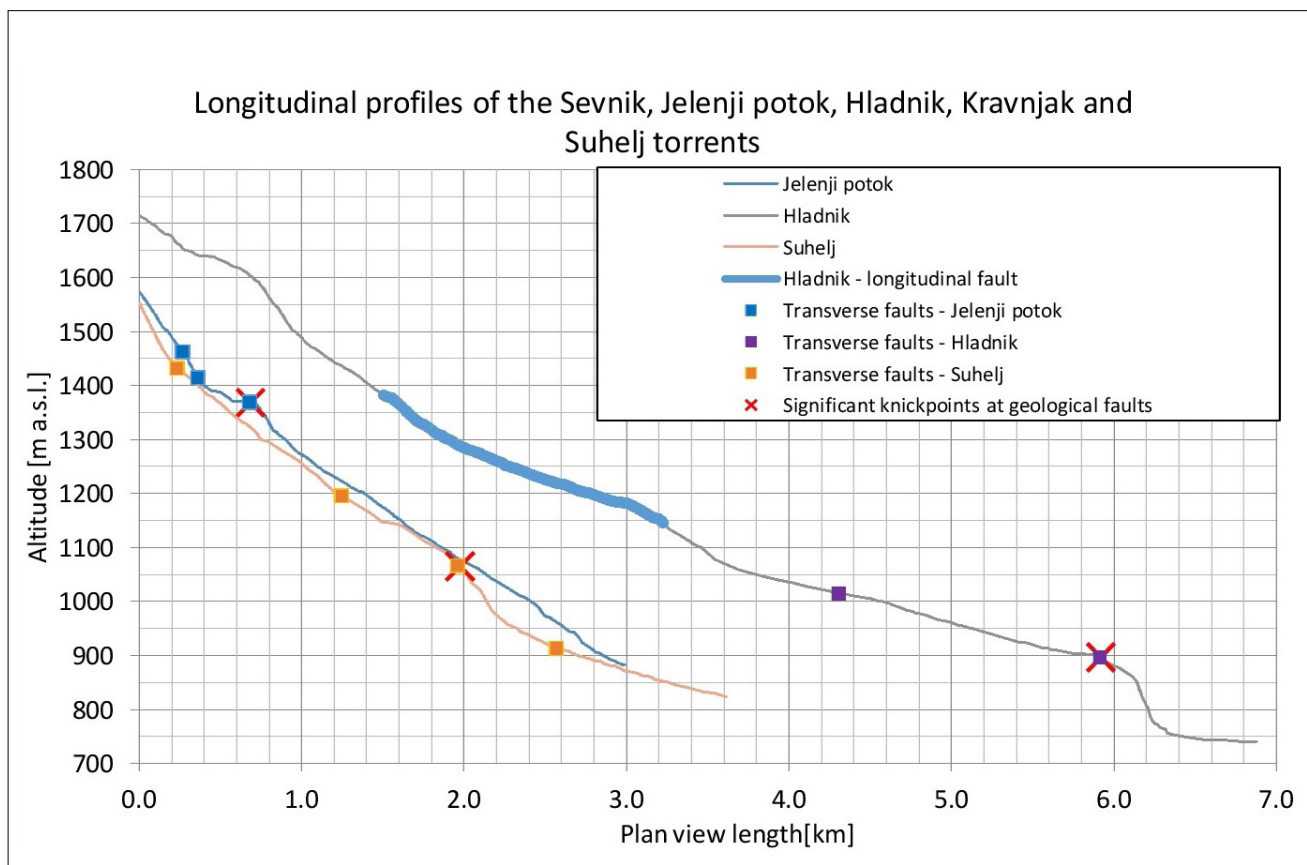


Fig. 3. Longitudinal profiles of the Sevnik, Jelenji potok, Hladnik, Kravnjak and Suhelj torrents with significant knickpoints at geological faults.

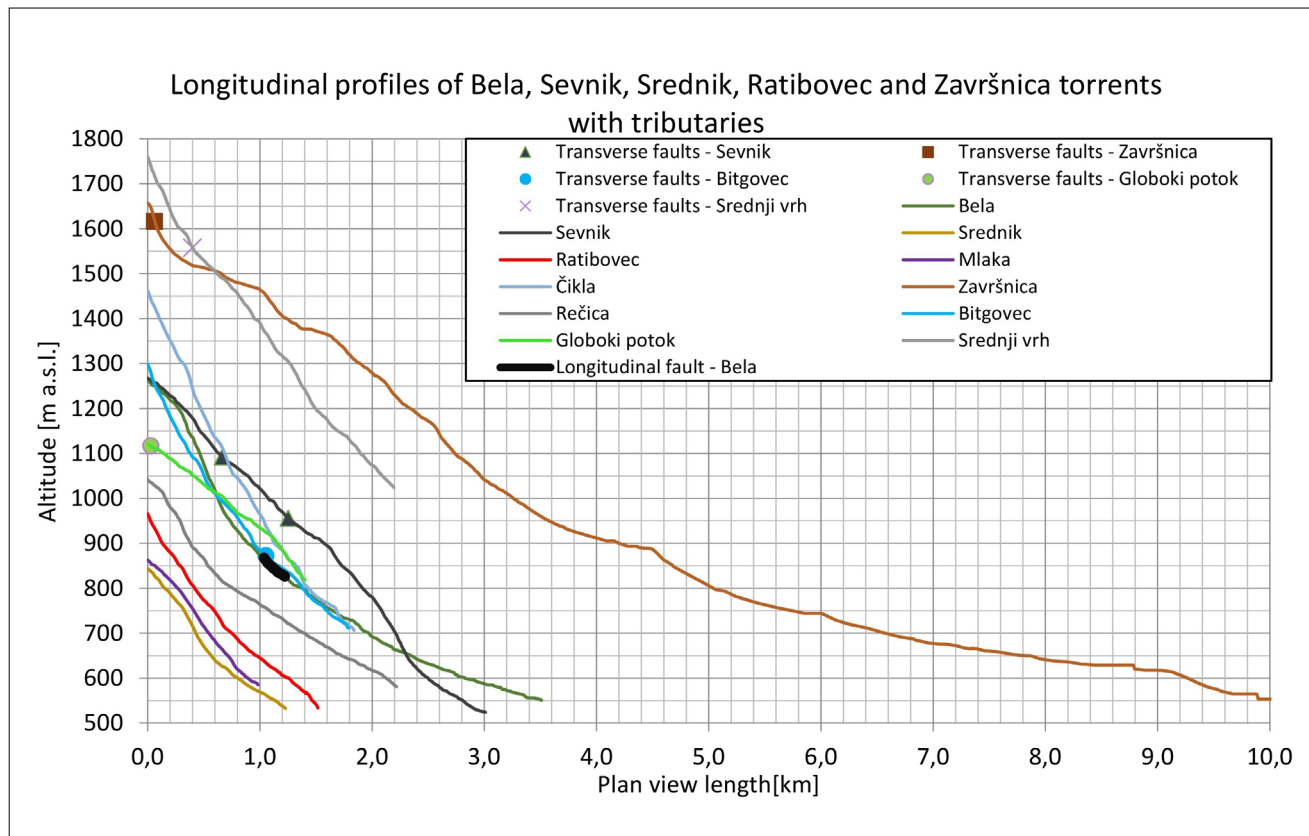


Fig. 4. Longitudinal profiles of the Bela, Sevnik, Srednik, Ratibovec, and Završnica torrents.

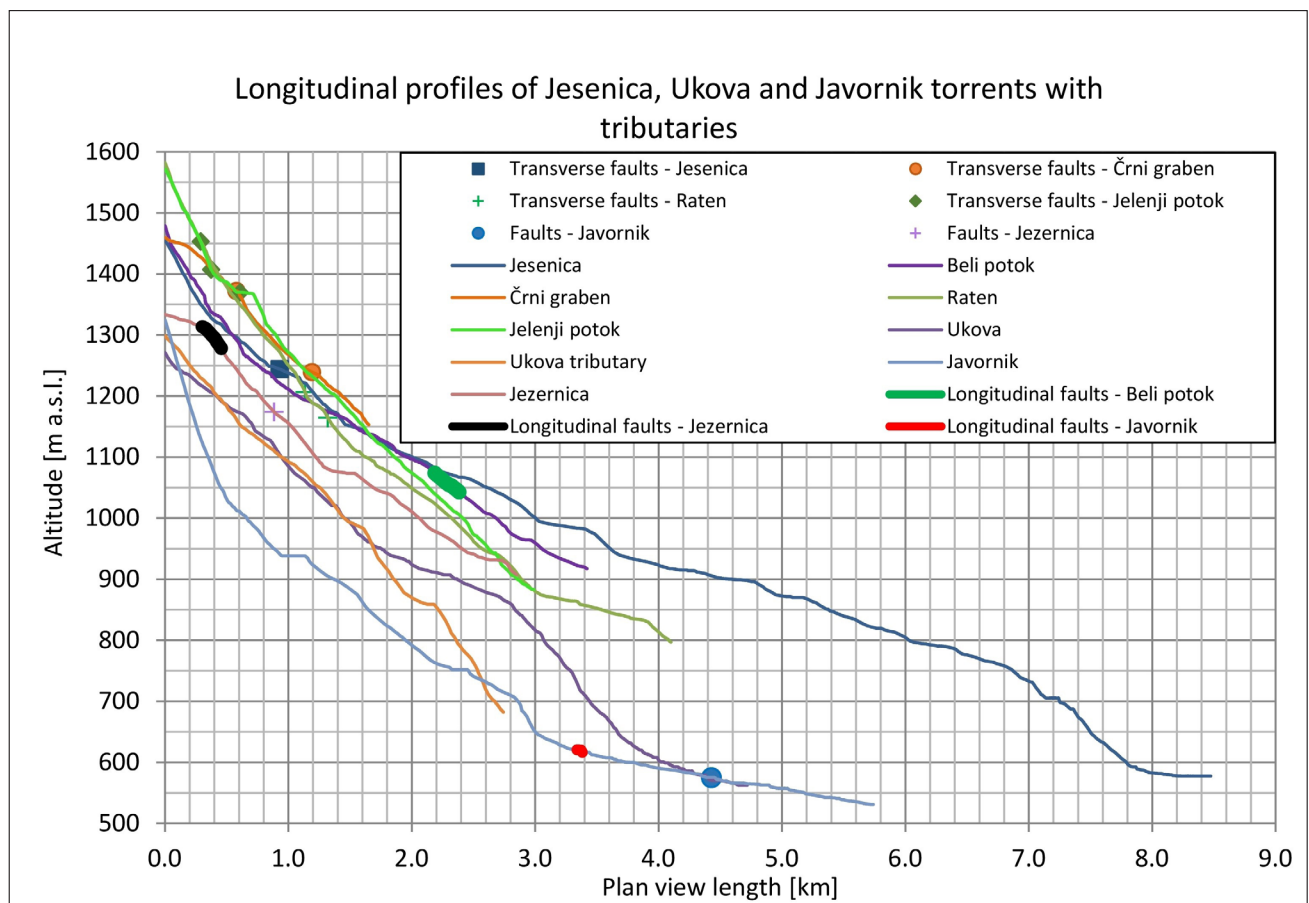


Fig. 5. Longitudinal profiles of the Jesenica, Ukova and Javornik torrents – with their tributaries.

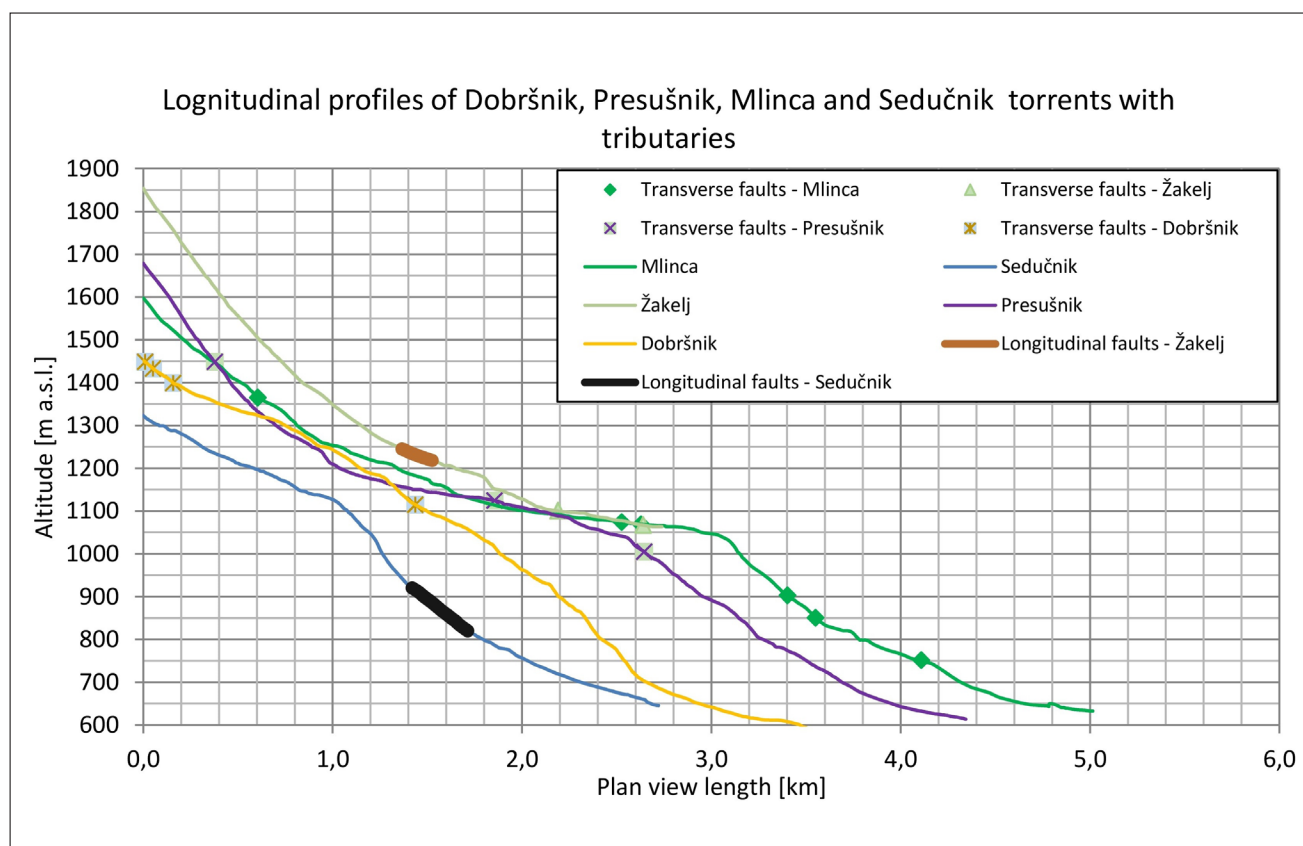


Fig. 6. Longitudinal profiles of the Dobršnik, Presušnik, Mlinca in Sedučnik torrents – with their tributaries.

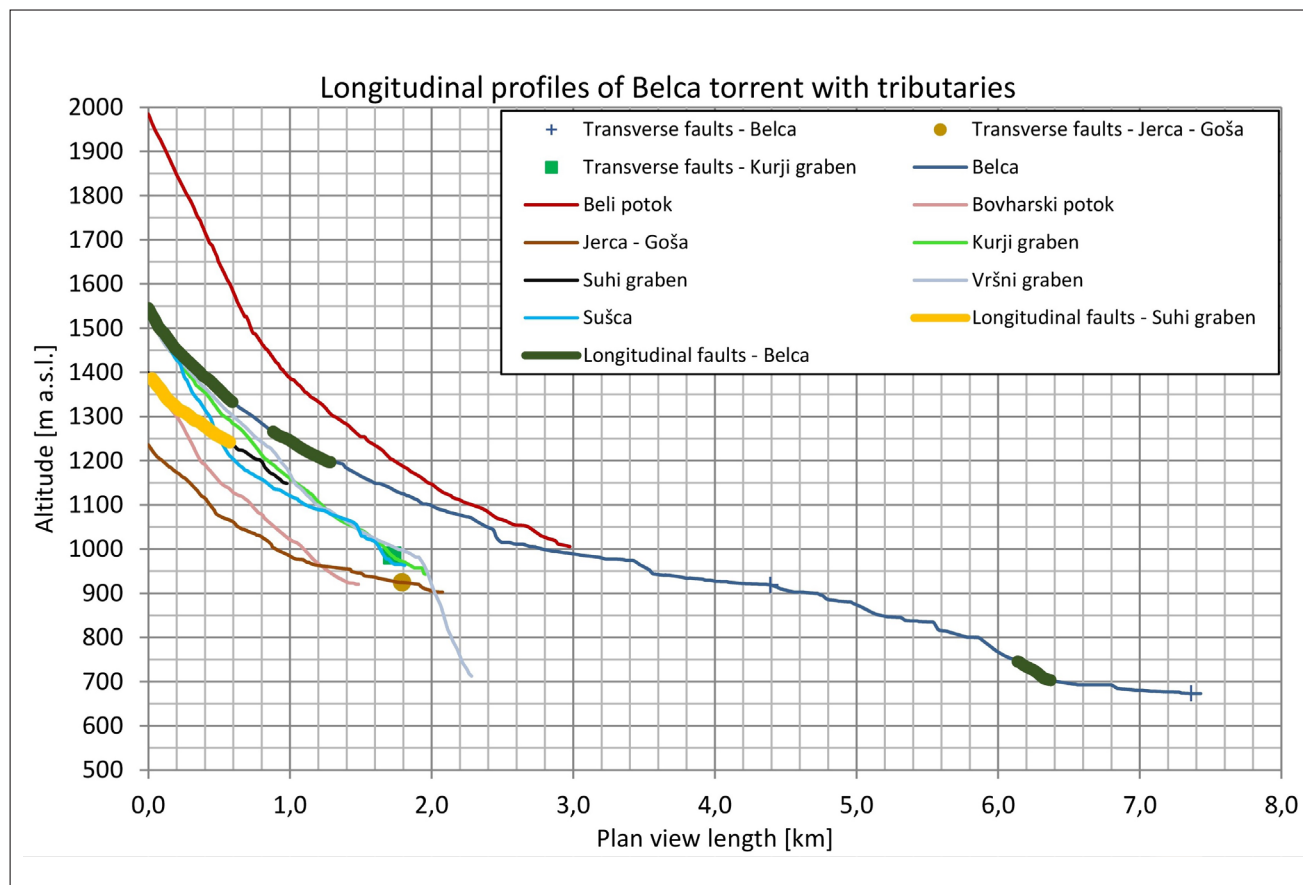


Fig. 7. Longitudinal profiles of the Belca torrent – with its tributaries.

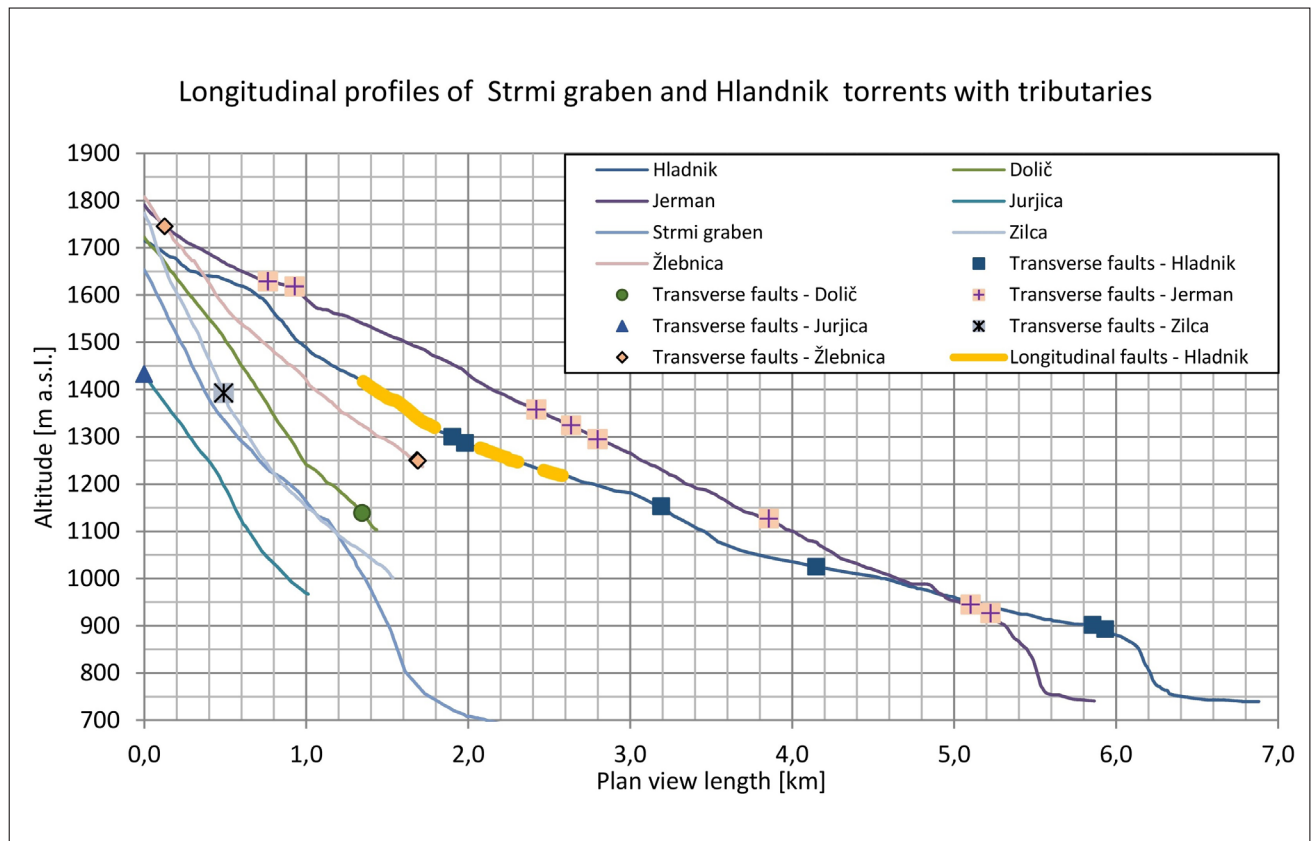


Fig. 8. Longitudinal profiles of the Strmi graben in Hladnik torrents – with their tributaries.

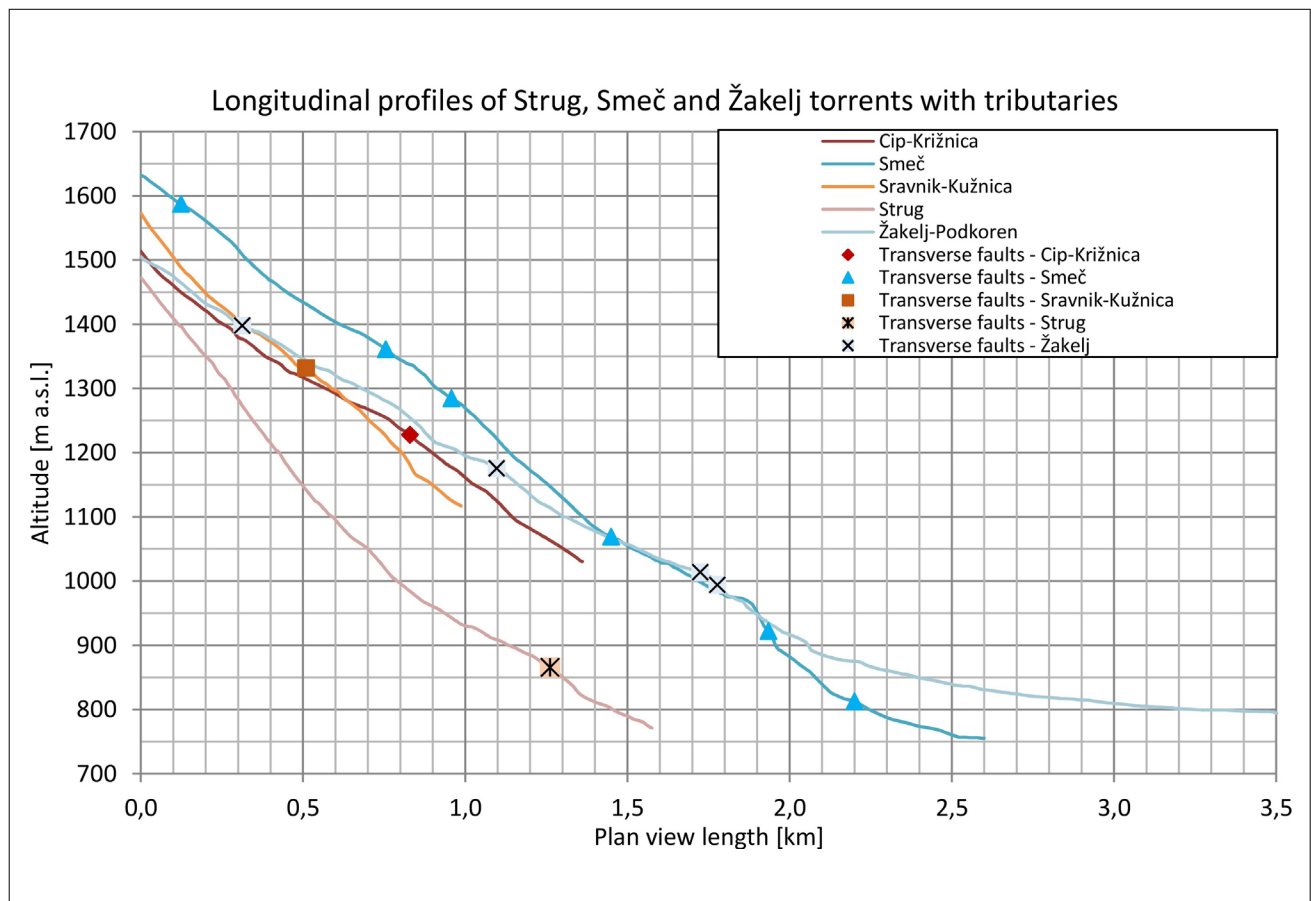


Fig. 9. Longitudinal profiles of the Strug, Smeč and Žakelj torrents – with their tributaries.

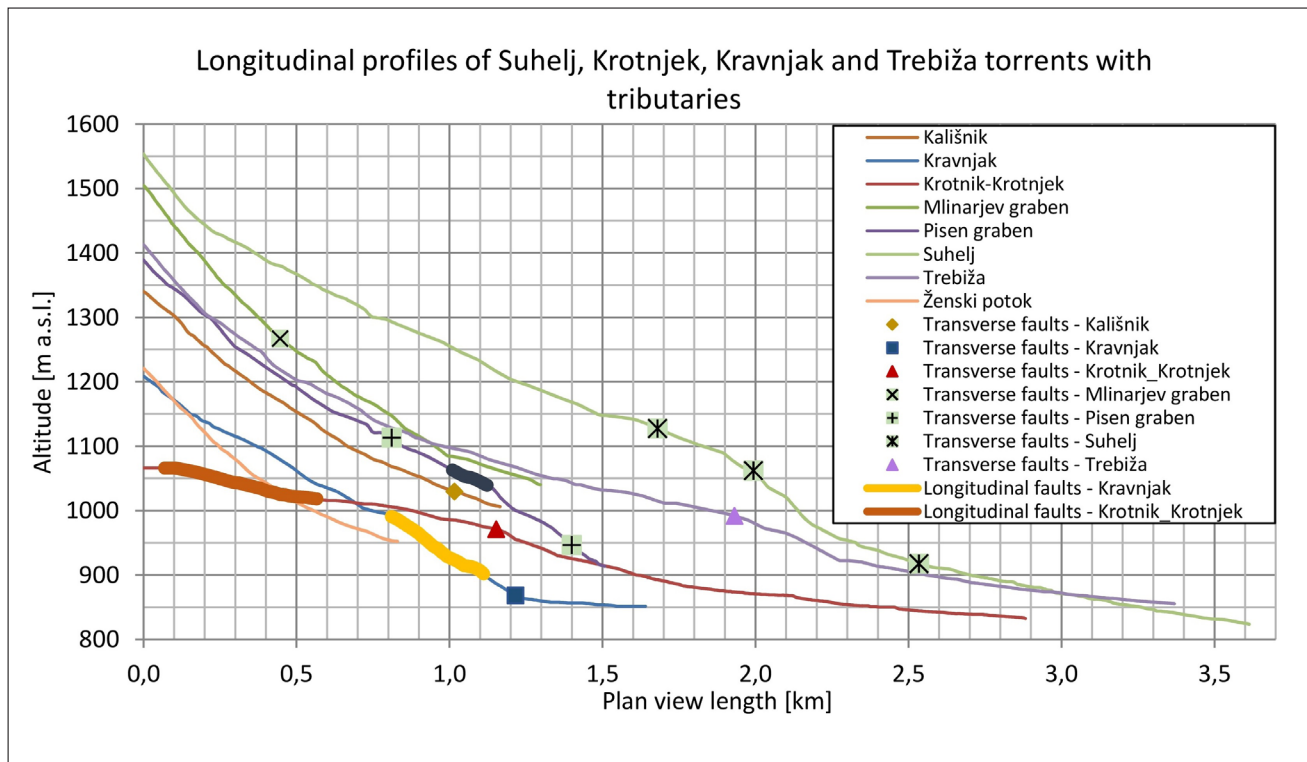


Fig. 10. Longitudinal profiles of the Suhelj, Krotnjek, Kravnjak and Trebiža torrents – with their tributaries.

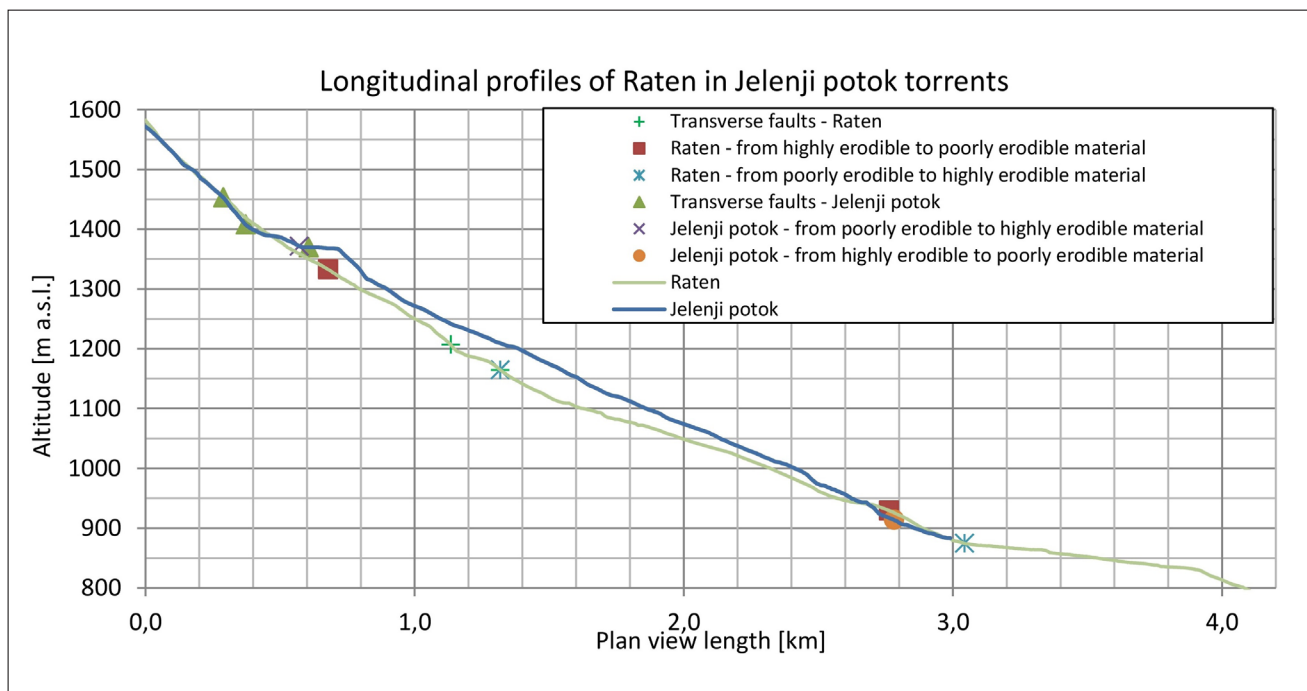


Fig. 11. Longitudinal profile of Jelenji potok with significant knickpoints at contact of highly erodible and poorly erodible material and contrary.

Impact of lithology on torrential stream bed

Due to the varying resistance of rocks to erosion, bedrock lithology presents an important factor influencing the stream profile shape. Additionally, when bedrock is impermeable the en-

hanced surface water runoff will mechanically erode soils. Orientation of various tectonic and non-tectonic structures may also significantly influence the rate of erosion. For example erosion tends to be stronger parallel to bedding in sedimentary rocks (PERRON & ROYDEN, 2012).

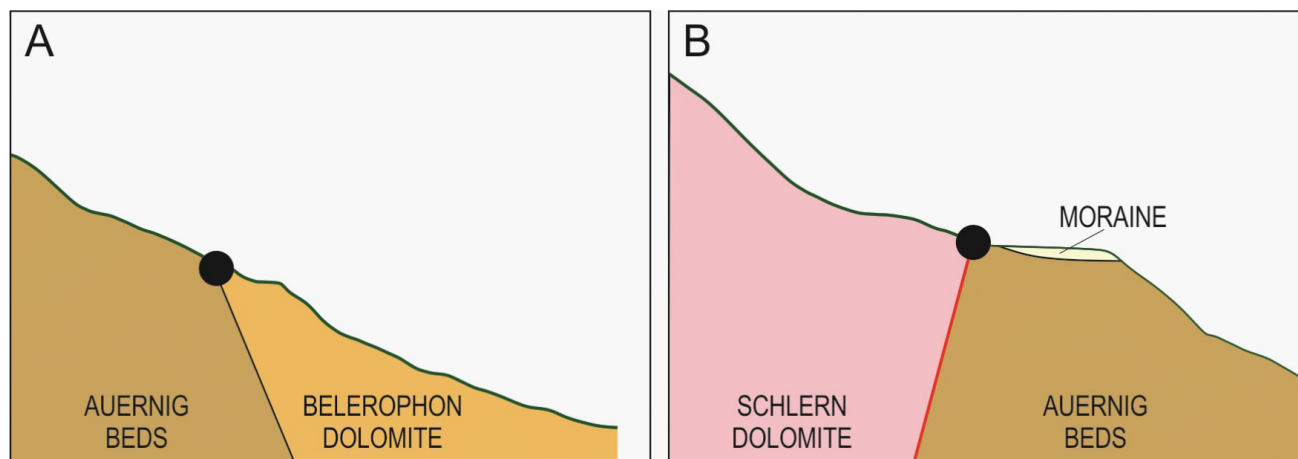


Fig. 12. Convexity and concavity between different erodible rocks, example of Jelenji potok. A – torrential streams flow from highly erodible to poorly erodible rocks; B – torrential stream from poorly erodible to highly erodible rocks.

Engineering geological classification categorizes Slovenian rocks into three groups (Ribičič et al., 2003). Highly erodible rocks of the first group comprise of soils and soft rocks (carbonate clastic rocks, marlstone, rocks composed of clay and silt fractions). The second group includes moderately erodible rocks with a thin weathered cover (clastic, pyroclastic and metamorphic rocks), whereas the third group comprises poorly erodible massive carbonates and igneous rocks. In general, torrential streams form concave shapes but in nature the concave and convex forms often exchange. Frequently the longitudinal profile of torrent is transformed at the contact between soft and solid rocks or at the contacts between clastic rocks and carbonates respectively. It is harder for torrents to erode carbonate rocks therefore in the case of contact from soft to solid rocks the longitudinal profile is converted from concave to convex shape. This can be clearly seen from Fig. 11 and Fig. 12A where torrential streams flow from

highly erodible (clastic sediments, fine grained clastic rocks, mixed clastic rocks with sandstone and breccia) to poorly erodible rocks (massive carbonates, thick bedded and massive carbonates). On the contrary, the longitudinal profiles of torrent in the Fig. 12B form concave shape.

Figure 13 shows the accumulated length of headwater torrents per rock erosivity class based on Erosion map and lithological properties (Ribičič et al., 2003). From the Figure 13 it can be seen that the majority (87.4 %) of investigated torrential streams in the Western Karavanke are cutting into highly erodible rocks (137.54 km), whereas the total length of torrents in poorly erodible rocks is 19.83 km. These results correspond to concavity of the longitudinal profiles in more easily erodible sedimentary rocks. Moreover, the impact of lithological background is reflected a great number of torrential streams that were determined on the research area of 1.5 km².

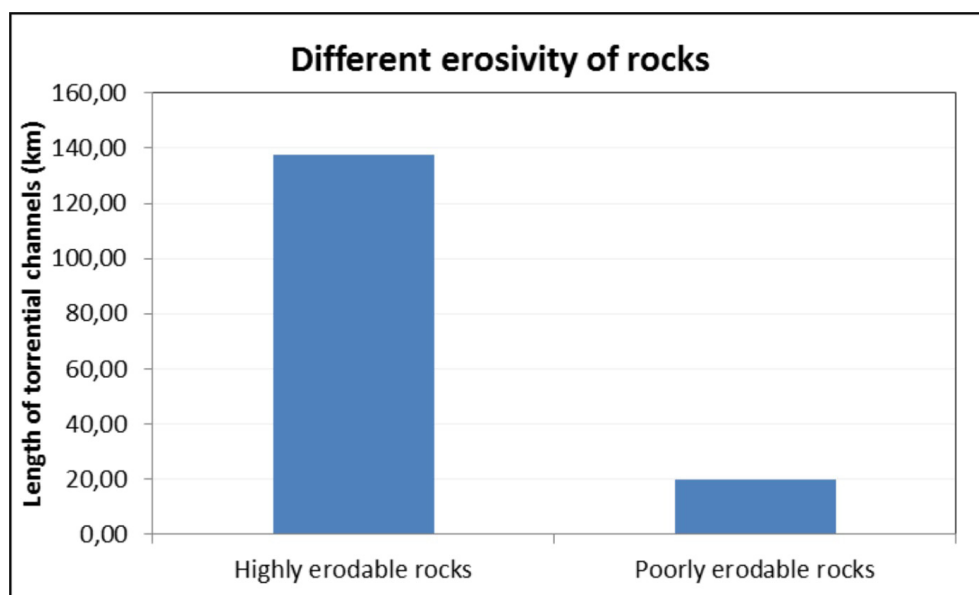


Fig. 13. Cumulative length of investigated torrents per erosivity class of the bedrock

Conclusions

In this paper, fifty-three longitudinal profiles of torrential channels in the Upper Sava Valley on the slopes of the Western Karavanke are discussed. ArcGIS mapping (ESRI, 2013) was used to obtain longitudinal sections of torrential channels from DMV 5. In general, accuracy of longitudinal profiles provided from DMV 5 does not correspond to more detailed mathematical modeling, but for describing complete torrents (from springs to confluences with larger streams) and for detecting main forms the accuracy of calculated profiles is sufficient.

For the Western Karavanke, a rather heterogeneous geological composition and a large number of faults are typical. Highly and poorly erodable rocks of stream bed often change along torrential channels. Majority of torrential channels in the study area are cutting into highly erodable rocks, consequently torrential watercourses are located in narrow vales. Frequently faults occur longitudinal or transverse to torrential channel.

From the research that has been carried out, it is possible to conclude that the longitudinal profiles of torrential channels do not correspond to equilibrium longitudinal profile. A lot of convex sections are presented. According to the availability of data it was found, that (1) transverse faults could be the reason for some knickpoints while longitudinal faults provide conditions for the formation of concave, equilibrium stream channel, and (2) at the contact between solid and soft rocks convex reaches with knickpoints occur.

Also, other factors could be the reason for convexity with knickpoints but were not presented in this article. Additionally, the erosion of Quaternary glaciations of the Upper Sava Glacier could have influenced the longitudinal profiles of torrential stream channels. Existing data about those glaciations are poor and glaciations were consequently not included in this study. Exceptionally, other reasons like the low erosion ability of lower order torrential streams, higher erosion capacity of the main torrential stream against the tributary torrential stream and as well human influence could have impact on convex longitudinal profiles with knickpoints. Knickpoints are the result of local conditions which affected formation of torrential channels and normally do not have a single reason for their formation.

Authors are aware that present study does not reflect the entire “story” of longitudinal profiles of torrential channels in the Western Karavanke Mountains. More research that will include detailed field surveys is still necessary before obtaining a more certain answer on the evolution of longitudinal profiles of torrential channels. Further in-depth analysis using higher resolution data, alongside palaeoenvironmental work, will greatly benefit our understanding of geological and tectonic controls upon longitudinal profile of torrent stream evolution.

Acknowledgements

The authors would like to thank Mr. Walter Poltnig for geological and tectonical data elaborated within the project “Grundwasser Der Karawanken”. The authors would also like to acknowledge the valuable comments and suggestions of the reviewers, which have improved the quality of this paper.

References

- BRENČIČ, M., BUDKOVIČ, T., FERJANČIČ, L. & POLTNIG, W. 1995: Hydrogeologie der Westlichen Karawanken. *Beiträge zur Hydrogeologie* 46: 5–42.
- BRENČIČ, M. & POLTNIG, W. 2008: Podzemne vode Karavank – skrito bogastvo = Grundwasser Der Karawanken – Versteckter Schatz. Ljubljana: Geological survey of Slovenia; Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Graz: 143 p.
- BUDKOVIČ, T. 1999: Geology of the Slovene Part of the Karavanke Road Tunnel. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 56/2: 34–48.
- BUNČIČ, G. 2014: Geographical potential for small hydroelectric power plants in Upper Sava Valley. Graduation thesis. Ljubljana: 82 p. Internet: http://geo.ff.uni-lj.si/pisnadela/pdfs/dipl_201405_gregor_buncic.pdf (12. 12. 2014).
- BUSER, S. & CAJHEN, J. 1978: Basic Geological Map of SFRJ, data sheet Celovec (Klagenfurt), 1:100 000. Federal Geological Survey, Beograd.
- DIBIASE, R.A., Whipple, K.X., Heimsath, A.M., Ouimet, W.B. 2010: Landscape form and millennial erosion rates in the San Gabriel Mountains, CA. *Earth and Planetary Science Letters* 289/1-2: 134–144, [doi:10.1016/j.epsl.2009.10.036](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.036)

- ESRI 2013: ArcGIS Desktop: Release 10.2. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- FLINT, J.J. 1974: Stream gradient as a function of order, magnitude and discharge. *Water Resour. Res.* 10/5: 969–973, [doi:10.1029/WR010i005p00969](https://doi.org/10.1029/WR010i005p00969).
- FOSTER, M.A. & KELSEY, M.A. 2012: Knickpoint and knickzone formation and propagation, South Fork Eel River, northern California. *Geosphere* 8/2: 403–416, [doi: 10.1130/GES00700.1](https://doi.org/10.1130/GES00700.1).
- GAVRILOVIĆ, S. 1972: Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji. Časopis »Izgradnja,« specijalno izdanje. Beograd, Jugoslavija, Republički fond voda SR Srbije, Vodoprivredna organizacija »Beograd«, Institut za eroziju, melioracije i vodoprivredu bujičnih tokova pri Šumarskom fakultetu u Beogradu: 292 p.
- GOSWAMI, R., BROCKLEHURST, S. & MITCHELL, N. 2012: Erosion of a tectonically uplifting landscape, NE Sicily, Italy. *Geomorphology* 171/172: 114–126, [doi:10.1016/j.geomorph.2012.05.011](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.011).
- GURS 2011–2014: DMV 5. The Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, Ljubljana.
- HACK, J.T. 1957: Stream profiles in Virginia and Maryland, Geological survey professional paper 294 – B. Washington, USA, U. S. Govt. Print. Off.: 59 p. Internet: <http://pubs.usgs.gov/pp/0294b/report.pdf> (11. 2. 2015).
- HANTKE, R., SCHEIDEGGER, A.E. 1999: Tectonic pre-design in geomorphology. In: HERGARTEN, S. & NEUGEBAUER, H.J. (eds.): *Process Modelling and Landform Evolution. Lecture Notes in Earth Sciences* 78. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 252 – 266.
- HOWARD, A.D. 1980: Thresholds in river regime. In: COATES, D.R. & VITEK, J.D. (eds.): *The Concept of Geomorphic Thresholds*. Boston, USA, Allen and Unwin: 227–258. Internet: <http://erode.evsc.virginia.edu/papers/papers.htm> (3. 2. 2015).
- HOWARD, A.D. 1998: Long profile development of bedrock channels: interaction of weathering, mass wasting, bed erosion and sediment transport. In: TINKLER, K.J. & WOHL, E.E. (eds.): *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 107: 297–319, [doi:10.1029/GM107p0297](https://doi.org/10.1029/GM107p0297).
- JAMŠEK RUPNIK, P. 2013: Geomorphological evidence of active tectonics in the Ljubljana Basin. Doctoral dissertation. Ljubljana: 214 p. Internet: <http://drugg.fgg.uni-lj.si/4532/> (13. 9. 2016).
- JURKOVŠEK, B. 1985: Basic Geological Map of SFRJ, data sheet Beljak (Villach) and Ponteba, 1:100 000. Federal Geological Survey, Beograd.
- KIRBY, E., WHIPPLE, K. 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology* 29/5: 415–418, [doi:10.1130/0091-7613\(2001\)029<0415:QDRURV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0415:QDRURV>2.0.CO;2).
- KIRBY, E., WHIPPLE, K.X., TANG, W. & CHEN, Z. 2003: Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from bedrock channel longitudinal profiles. *Journal of Geophysical Research*, 108/B4: 24, [doi:10.1029/2001JB000861](https://doi.org/10.1029/2001JB000861).
- MIHEVC, A., BAVEC, M., HÄUSELMANN, P. & FIEBIG, M. 2015: Dating of the Udin Boršt conglomerate terrace and implication for tectonic uplift in the northwestern part of the Ljubljana Basin (Slovenia) = Datacija konglomeratne terase Udin boršt in njena uporaba za določitev tektonskega dvigovanja v severozahodnem delu Ljubljanske kotline (Slovenija). *Acta carsologica*, 44/2: 169–176, [doi: 10.3986/ac.v44i2.2033](https://doi.org/10.3986/ac.v44i2.2033).
- MOHORIČ, N. 2015: Analysis of longitudinal profiles of torrential channels. Master thesis. Ljubljana: 117 p. Internet: http://drugg.fgg.uni-lj.si/5116/1/VO2002_Mohoric.pdf (4. 4. 2015).
- NEMES, F., NEUBAUER, F., CLOETHING, S. & GENSER, J. 1997: The Klagenfurt basin in the Eastern Alps: an intra-orogenic decoupled flexural basin. *Tectonophysics*, 282/1–4: 189–203, [doi:10.1016/S0040-1951\(97\)00219-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00219-9).
- PARMENTER, A. & MELCHER, J. 2010: Watershed and drainage delineation in ArcMap 9.3.1. Tufts University, Boston: 12 p. Internet: <http://sites.tufts.edu/gis/files/2013/11/Watershed-and-Drainage-Delineation-by-Pour-Point.pdf> (8. 3. 2015).
- PAZZAGLIA, F. J., GARDNER, T. W. & MERRITTS, D. J. 1998: Bedrock fluvial incision and longitudinal profile development over geologic time scales determined by fluvial terraces. In: TINKLER, K.J. & WOHL, E.E. (eds.): *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. Washington, USA, American geophysical union. Geophysical monograph 107: 207–235, [doi:10.1029/GM107p0207](https://doi.org/10.1029/GM107p0207).
- PERRON, J. T. & ROYDEN, L. 2012: An integral approach to bedrock river profile analysis. *Earth surface processes and landforms* 38/6: 570–576, [doi:10.1002/esp.3302](https://doi.org/10.1002/esp.3302).
- PLACER, L. 2008: Principles of the tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija*, 51/2: 205–217, [doi:10.5474/geologija.2008.021](https://doi.org/10.5474/geologija.2008.021).

- PODOBNIKAR, T. 2008: Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki. *Geodetski vestnik*, 52/4: 834–853. Internet: http://www.geodetski-vestnik.com/52/4/gv52-4_834-853.pdf (5. 5. 2015).
- POLINSKI, R.K. & EISBACHER, G.H. 1992: Deformation partitioning during polyphase oblique convergence in the Karawanken Mountains, southeastern Alps. *Journal of Structural Geology* 14: 1203–1213, [doi:10.1016/0191-8141\(92\)90070-D](https://doi.org/10.1016/0191-8141(92)90070-D).
- RĂDOANE, F., RĂDOANE, N. & DUMITRIU, D. 2003: Geomorphological evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians. *Geomorphology* 50/1: 293–306, [doi:10.1016/S0169-555X\(02\)00194-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00194-0).
- RIBIČIČ, M., ŠINIGOJ, J. & KOMAC, M. 2003: New general engineering geological map of Slovenia. *Geologija*, 46/2: 397–404.
- SEIDL, M. A., DIETRICH, W. E. & KIRCHNER, J. W. 1994: Longitudinal profile development into bedrock: an analysis of Hawaiian Channels. *The journal of Geology* 12/4: 457–474, [doi:10.1086/629686](https://doi.org/10.1086/629686).
- SINERGISE, D.O.O. & MAPYX LIMITED 2015: Geopedia, Quo, A Revolution in Digital Mapping for the Outdoors. Internet: <http://portal.geopedia.si> (5. 5. 2015), http://www.mapyx.com/quo/uk_digital_maps.asp#tab_top (5. 5. 2015).
- SODNIK, J., PETJE, U. & MIKOŠ, M. 2009: Topografija površja in modeliranje gibanja drobirskih tokov. *Geodetski vestnik*, 53/2: 291–304.
- SNOW, R.S. & SLINGERLAND, R.L. 1987: Mathematical modelling of graded river profiles. *J. Geol.* 95/1: 15–33, <http://www.jstor.org/stable/30081066>.
- STARK, C.P. 2006: A self-regulating model of bedrock river channel geometry. *Geophysical Research Letters* 33/4: 5, [doi:10.1029/2005GL023193](https://doi.org/10.1029/2005GL023193).
- STOCK, D. J. & MONTGOMERY D. R. 1999: Geologic constraints of bedrock river incision using the stream power law. *Journal of geophysical research*: 104/B3: 4983–4993. Internet: <http://rocky.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/journal-geo-res-98JB02139.pdf> (10. 5. 2015).
- TINKLER, K. & WOHL, E.E. 1998: A primer on bedrock channels. In: TINKLER, K.J. & WOHL, E.E. (eds.): *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. Washington, USA, American geophysical union. *Geophysical monograph* 107: 1–18, [doi:10.1029/GM107p0001](https://doi.org/10.1029/GM107p0001).
- VRABEC, M., PAVLOVČIČ PREŠEREN, P. & STOPAR, B. 2006: GPS study (1996–2002) of active deformation along the Periadriatic fault system in northeastern Slovenia: tectonic model. *Geologica Carpathica*, 57/ 1: 57–65.
- WOHL, E.E. 1998: Bedrock channel morphology in relation to erosional processes. In: TINKLER, K.J. & WOHL, E.E. (eds.): *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. Washington, USA, American geophysical union. *Geophysical monograph*, 107: 133–151, [doi:10.1029/GM107p0133](https://doi.org/10.1029/GM107p0133).

Nova knjiga

Matevž NOVAK & Nina RMAN (urednika), 2016: **Geološki atlas Slovenije**. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, 124 str.
(Geological Atlas of Slovenia. Geological Survey of Slovenia, Ljubljana, 124 p.)

Pri Geološkem zavodu Slovenije je izšel oktobra 2016 v okviru proslav ob sedemdestletnici ustanovitve Geološki atlas Slovenije. Dvojezično slovensko – angleško publikacijo sta odlično uredila zavodska geologa Matevž Novak in Nina Rman. Priprava 78 kart in njihovi opisi so delo 44 raziskovalcev in večjega števila sodelavcev s pomembnih slovenskih geoznanstvenih ustanov, in sicer poleg Geološkega zavoda Slovenije še z Oddelka za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, Agencije Republike Slovenije za okolje, Geoinženiringa d.o.o., Geografskega inštituta Antona Melika Znanstveno-raziskovalnega centra Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Infrastrukturnega centra za pedologijo in varstvo okolja Oddelka za agronomijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, Zavoda Republike Slovenije za varstvo narave, Geoparka Karavanke in Geoparka Idrija.

Zaslugo za enotno predstavitev raznorodnega gradiva in ažurno pripravo publikacije ve-

lja pripisati urednikoma Novaku in Rmanovi. Za odlično digitalno izvedbo kart sta poskrbeli Manja Žebre in Staška Čertalič, in za oblikovanje in tehnično uredništvo Staška Čertalič. Publikacijo je založil Geološki zavod Slovenije, za kar je zaslužen direktor Miloš Bavec, tudi za to, da je cena zahtevne in lično opremljene publikacije vsega 17 €. Izid knjige je finančno podprla poleg Geološkega zavoda še Javna agencija RS za raziskovalno dejavnost. Knjigo sta recenzirala Simon Pirc in Jože Ratej.

Nikjer ni navedeno, čigava je bila zamisel, izdati take vrste publikacijo. Vsekakor si zasluži neimenovana oseba veliko pohvalo slovenske znanosti.

Knjiga na 124 straneh primerno velikega formata 34 cm × 23 cm je prva tovrstna zbirka kartografskih prikazov geoznanstvenih podatkovnih baz v Sloveniji. Karte so razporejene v 11 tematskih poglavjih: Osnovne geološke karte (geotektonske lege, geološke sestave, litologije in paleogeografskih enot), Geofizikalne karte (globine do Mohorovičićeve nezveznosti, Bouguerovih anomalij, magnetne intenzitete, električne upornosti), Geotermične karte (gostote toplotnega toka, temperature v dveh globinah, globine dveh izoterm, možnosti uporabe toplotnih črpalk), Hidrogeološke karte (dveh vrst hidrogeološke, vodonosnikov, mineralnih in termalnih voda, pa ranljivosti, obnovljivih količin in razpoložljivih količin podtalnice), Geokemične karte (radioaktivnosti, živega srebra, elementnih združb in kritične onesnaženosti, in sicer vse v tleh), Hidrogeokemične karte (hidrogenkarbonata, karbonatne trdote, izotopske sestave kisika in nitrata, vse v podtalnici, in nitrata v vodi podkoreninske cone), Karte mineralnih surovin (kovinskih, nekovinskih s koncesijo, premogov), Inženirsko-geološke in karte geološke ogroženosti (inženirsko-geološka, verjetnosti plazov in drobirskih tokov, aktivnih prelomov, seizmotektonska, dve vrsti karte potresne nevarnosti), Geomorfološke karte (reliefnih tipov, morfoloških enot in krasa), Pedološke (karte tipov, kislosti, globine tal) in Karte geološke dediščine (naravnih vrednot in Unescovih geoparkov v Sloveniji). Našteta zbirka se zaključuje



na strani 124 s karto vrtin, globljih od 500 metrov. Vse našete karte, 59 po številu, spremljajo kratki opisi na kartah prikazanih lastnosti slovenskega ozemlja. Dragocene so navedbe poglavitnih virov, ki omogočajo bralcu dostop do bolj poglobljene informacije. Vedeti namreč moramo, da predstavljajo karte, prikazane v Atlasu, figurativno povedano samo prislovični vrh ledene gore. V podatkovnih bazah slovenskih geoznanstvenih institucij je količina prostorske informacije za nekaj velikostnih redov obilnejša od te, ki je prikazana v kartah Atlasa. Večina teh kart, in sicer 42, je v merilu 1:1.000.000, ostale pa 1:1.800.000.

Izjemni pomen Geološkega atlasa Slovenije je torej v tem, da izredno olajšuje dostopnost do vse obstoječe prostorske geološke informacije o Sloveniji. Prikazana gradiva pričajo tudi o visoki uporabni vrednosti geoznanstvenega raziskovalnega dela za sonaravno in trajnostno reševanje žgočih ekoloških in ekonomskih problemov sodobnega sveta. Javnosti manj očitna, vendar nič manjša je njihova bazična znanstvena teža, njihova pomembnost za razumevanje najrazličnejših vidikov geološkega prostora, na katerem živimo. In slednjič, omeniti moramo dejstvo, da je obilje

prikazanih sodobnih raziskovalnih dosežkov rezultat dela domačih, slovenskih raziskovalcev. Pred sedemdesetimi leti, v času, ko je bila ustanovljena leta 1946 Uprava za vrtanje SR Slovenije, prednik Geološkega zavoda Slovenije, si takega razcveta domače znanosti o Zemlji sploh nismo mogli zamisliti. Na to pomensko razsežnost moramo biti še posebej ponosni ob izidu Geološkega atlasa Slovenije.

Kritično oko zasledi v Geološkem atlasu tudi napake, nedoslednosti in nepravilnosti, kar je razumljivo, saj so sestavljavci in urednika v tovrstnem predstavljanju javnosti v mnogočem orali ledino. Lastnosti, prikazane na kartah, so kvantitativne količine, katerih sodobna obravnava zahteva upoštevanje vrste pravil, zlasti kar zadeva nadzor in zagotavljanje kakovosti. Lahko pričakujemo, da bo naklada 300 izvodov Atlasa kmalu pošla, in potreben bo ponatis. Na to se bo kazalo ustrezno pripraviti, in sicer tako, da bodo sestavljavci in zanesljivi recenzenti kritično vzeli pod drobnogled pomensko, grafično in tekstovno plat pričujočega Atlasa in jih za novo izdajo ustrezno popravili in dopolnili, po načelu, da je boljše vselej sovražnik dobrega.

Simon Pirc

5. Evropski geotermalni kongres v Strasbourgu (Francija) 19. – 23. september 2016

Dušan RAJVER, Andrej LAPANJE & Mitja JANŽA

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija;
e-mail: dušan.rajver@geo-zs.si, andrej.lapanje@geo-zs.si, mitja.janza@geo-zs.si

V Strasbourgu je septembra 2016 potekal 5. evropski geotermalni kongres. Zadnji trije evropski geotermalni kongresi so bili v organizaciji Evropskega sveta za geotermalno energijo (European Geothermal Energy Council, EGENC), tokratni pa tudi v soorganizaciji francoskega združenja profesionalcev v geotermiji (Association Française des Professionnels de la Géothermie, AFPG). Prejšnji kongresi so bili junija 2013 v Italiji (Pisa), maja-junija 2007 v Nemčiji (Unterhaching pri Munchenu), maja 2003 na Madžarskem (Szeged) in septembra 1999 v Švici (Basel), zadnja dva omenjena pod okriljem evropske veje IGA in EGENC. Pred tem pa so se odvijali t.i. evropski geotermalni seminarji (International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy Research) v organizaciji Evropske Komisije z delovnim naslovom »European Geothermal Update«, in sicer aprila 1989 v Italiji (Firenze), pod isto organizacijo pa tudi novembra 1983 v Nemčiji (München), marca 1980 v Franciji (Strasbourg) in prvi že decembra 1977 v Belgiji (Bruselj).

Na kongresu se je zbralo okoli 600-700 udeležencev. Francija se je v neposredni rabi geotermalne energije povzpela na peto mesto v Evropi v proizvedeni toploti, tako iz globokih geotermalnih sistemov s 1.306 GWh, kakor tudi s tehnologijo toplotnih črpalk na plitvo geotermalno energijo s 3.060 GWh. Glede proizvodnje elektrike je Francija danes s 18,2 MW_e šesta v Evropi po instalirani moči geotermalnih elektrarn, kakor tudi glede proizvedene elektrike s 83 GWh v letu 2015 iz teh elektrarn, seveda daleč zadaj za Italijo, Islandijo in Turčijo, ki imajo ugodnejše geološke pogoje. Večina proizvodnje elektrike se odvija na otoku Guadaloupe, manj pa v Alzaciji, kjer deluje za enkrat le ena elektrarna, ki je razvita na principu »izboljšanege (spodbujenega) geotermalnega sistema« (EGS), z instalirano močjo 1,7 MW_e. Vseeno pa lahko priznamo, da je Francija upravičeno organizirala ta kongres s primerno predstavitvijo sodobnega stanja v razvoju in izkoriščanju geotermalne energije.

Kongres je bil, podobno kot prejšnji, leta 2013 v Italiji, tematsko zelo dobro opredeljen., Ob kon-

gresu so potekala srečanja v različnih projektih in združenjih (več o tem v nadaljevanju). Sprejeto je bilo 319 referatov iz skoraj vseh evropskih držav in tudi nekaterih izvenevropskih (ZDA, Mehika, Nova Zelandija, itd.), od teh je bilo okrog 80 posterjev.

Pod okriljem kongresa so bile organizirane plenarne sekcije, naslednje dni pa vzporedne sekcije z vodilnimi predavanji kakor tudi posterska sekcija. Pred pričetkom kongresa sta bila izvedena dva tečaja, (1) *Geotraining* in (2) *Deep geothermal*. Prvi je bil posvečen izkoriščanju plitve geotermalne energije s tehnologijo toplotnih črpalk, drugi pa izkoriščanju globokih geotermalnih vodonosnikov, tako za proizvodnjo elektrike kot za neposredno rabo termalne vode. V glavnem delu kongresa je bila prvi dan najprej **otvoritvena sekcija** s predavanji s politično-ekonomskim vidikom in nato še z vidika znanosti, tehnologije in industrije. Predstavitve, bodisi kot predavanja ali posterji, so bile v sekcijah porazdeljene na 3 glavne skupine, (i) *Politika in trgi* (Policy and Markets), (ii) *Znanost* (Science) ter (iii) *Tehnologija in najboljše prakse* (Technology and Best Practices). Med njimi je bilo uvrščenih 8 osrednjih (Keynote) predavanj. **Poročila držav** o najnovejšem stanju izkoriščanja geotermalne energije (Country update reports) so bila predstavljena le kot posterji (32 poročanj). V okviru omenjenih treh skupin so bile predstavitve porazdeljene na več tematik, navedenih v nadaljevanju. Skupina **Politika in trgi** je vsebovala podsklope: sposobnost bank (Bankability, 4 predstavitve), struktura podjetja (Corporate structure, 1), financiranje (Financing, 3), pravni vidiki (Legal aspects, 2), drugo (Other, 11), družbena sprejemljivost (Public acceptance, 4) in socialno-ekonomski vidiki (Socio-economic aspects, 7). Skupina **Tehnologija in najboljše prakse** je zajela naslednje podsklope: neposredna raba (Direct uses, 12 predstavitev), vplivi na okolje in rešitve (Environmental impacts and solutions, 13), raziskave in načrtovanje (Exploration and planning, 21), toplotne črpalke (Heat pumps, 27), drugo (Other, 13), proizvodnja elektrike (Power, 18) in podzemno skladiščenje toplotne energije (UTES, 11). Skupina **Znanost** pa je vsebovala

podsklope: geokemija (Geochemistry, 18 predstavitev), geologija (Geology, 34), geofizika (Geophysics, 55), drugo (Other, 17) in termodinamika (Thermodynamics, 7).

Aktualne geotermalne teme, izjemni predavatelji in aktivna izmenjava mnenj udeležencev je pripomogla k uspešnosti kongresa v celoti. Pokazalo se je, da so posredne in površinske metode (geofizika, geokemija in geologija) zelo pomembne pri raziskavah in upravljanju geotermalnih virov. Številni referati o raziskavah kažejo kako dejavno je iskanje novih virov. Po kongresu je bila izvedena enodnevna strokovna ekskurzija, ki je zajela obisk toplotne postaje v Rittershoffnu in geotermalne elektrarne v Soultz-sous-Forêts-ju. Na obeh lokacijah se izkorišča EGS sistem, le da gre v prvem primeru za izkoriščanje vročega fluida s temperaturo ca 166 °C za industrijsko rabo, v drugem pa za proizvodnjo elektrike iz vročega fluida s temp. ca 180 °C. Sledil je še povsem geološko usmerjen ogled izdankov kamnin (peščenjakov in apnencev, tipičnih za geotermalni rezervoar v globini v tem predelu Alzacije) pri Windsteinu.

Med kongresom se je odvijalo nekaj pomembnih stranskih dogodkov: *Generalna skupščina AFPG*, *Dnevi geotermije* (Journée de la Géothermie), *Uvodno srečanje projekta GeoPLASMA-CE* (Kick-off meeting), predstavitev *Mehke stimulacije v obravnavanju geotermalnih rezervoarjev*

(DESTRESS), predstavitev druge IGA univerzitetne knjige *Geothermal Exploration, Global strategies and applications*, srečanje v projektu *Geothermal ERA NET* itd.

Kongres v Strasbourgu je prikazal nadaljno rast izkoriščanja geotermalne energije in geotermalnega razvoja, predvsem neposredne rabe, tako iz termalne vode kot tudi iz plitve geotermalne energije. Skupno 32 držav je poročalo o izkoriščanju geotermalne energije, za proizvodnjo elektrike ali za neposredno rabo ali za oboje. Tu navajamo nekaj skupnih števil. Izredno je napredovala raba plitve geotermalne energije s tehnologijo geotermalnih toplotnih črpalk (GTČ). Skupno število enot delujočih GTČ znaša danes v Evropi okrog 1,713 milijona. Med kategorijami rabe termalne vode iz globokih vodonosnikov pa prevladuje daljinsko ogrevanje pred rabo za kopanje in plavanje v bazenih (in balneologijo) ter za rastlinjake.

Glede izkoriščanja geotermalne energije v Sloveniji znaša instalirana kapaciteta za neposredno rabo skoraj 202,2 MW_e, letna izkoriščena geotermalna energija pa 1218 TJ ali 338,4 GWh (stanje na 31. dec. 2015), vključno z geotermalnimi toplotnimi črpalkami na plitvo geotermijo (posodobljeno po RAJVER et al., 2016). Prispevek geotermalnih toplotnih črpalk znaša 136,64 MW_e

Tabela 1. Sedanje stanje izkoriščanja geotermalne energije v Evropi, s podatki poročanimi za kongres v letu 2016 (stanje dne 31. dec. 2015) in primerjava s podatki za kongres v letu 2013 (stanje dne 31. dec. 2012) (ANTICS et al., 2013; 2016).

Leto	EGC 2013	EGC 2016	pričakovano v 2020
Proizvodnja elektrike			
Instalirana kapaciteta (MW _e)	1847,9	2050	3023
Proizvedena elektrika (GWh/leto)	12158,3	13997,3	
Faktor obremenitve	75,1	77,9	91
Število držav	9	8*	
Neposredna raba: srednje do nizko temperaturni viri			
Instalirana kapaciteta (MW _t)	7800,3	9264,2	
Izkoriščena energija (GWh/leto)	18763,9	31199,1	
Koeficient izkoristka			
Število držav	28	32	
Neposredna raba: plitva geotermija (GTČ) in UTES			
Instalirana kapaciteta (MW _t)	16506,4	22891,4	
Izkoriščena energija (GWh/leto)	34898,9	49366,4	
Poprečje na enoto GTČ	58,7	22,2	
Število enot GTČ na plitvo geotermijo	> 1,33 milijona	> 1,71 milijona	
Število držav	32	31**	

*Rusija ni zajeta v tem poročanju.

**Estonija ni zajeta v tem poročanju.

oziroma 732,1 TJ/leto. Različne vrste uporabe zajemajo: individualno ogrevanje prostorov, daljinsko ogrevanje, klimatizacijo/hlajenje, ogrevanje rastlinjakov, kopanje in plavanje z balneologijo, taljenje snega ter geotermalne toplotne črpalke (v rabi plitve geotermalne energije).

Iz Slovenije smo se kongresa udeležili vsi trije avtorji tega prispevka, avtorji oziroma soavtorji pa smo bili v treh predstavitev, skupaj s še dvema sodelavcema iz GeoZS (RAJVER et al., 2016; JOHANNESSEN et al., 2016; TRUMPY et al., 2016). V sklopu kongresa je potekala še razstava nekaterih najbolj znanih razvojnih institucij ter proizvajalcev in serviserjev raziskovalne in proizvodne opreme (za vrtine, cevovode, toplotne postaje, itd.) v geotermalnih raziskavah in razvoju ter izkoriščanju geotermalne energije.

Viri

- ANTICS, M., BERTANI, R., SANNER, B., 2013: Summary of EGC 2013 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe. Proceedings, European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy, EGEC, UGI, IGA, 18 p.
- ANTICS, M., BERTANI, R., SANNER, B., 2016: Summary of EGC 2016 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe. Proceedings, European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, EGEC, AFPG, IGA, 16 p.
- JOHANNESSEN, G.A., INGOLFSSON, H.P., SIDDIQI, G., RAMSAK, P., BREEMBROEK, G., MANZELLA, A., TRUMPY, E., SCHREIBER, S., PETURSSON, B., STOKLOSA, A.W., BJÖRNSSON, S., CALCAGNO, P., LACIRIGNOLA, M., LAPANJE, A., NADOR, A., CUNHA, M., STADTRUCKEROVA, J., & KARAOZ, K., 2016: European cooperation on geothermal research through the GEOTHERMAL ERA NET. Proceedings, European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, EGEC, AFPG, IGA, 10 p.
- RAJVER, D., LAPANJE, A., RMAN, N. & PRESTOR, J. 2016: Geothermal energy use, Country update for Slovenia. Proceedings, European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, EGEC, AFPG, IGA, 18 p.
- TRUMPY, E., CORO, G., MANZELLA, A., PASQUALE, P., CASTELLI, D., CALCAGNO, P., GRELLIET, S., ALCANIÉ, M., SERRANO, J.J., NADOR, A., SORES, L., JOHANNESSEN, G.A., BRAGASSON, T. INGOLFSSON, PETURSSON, B., JAMSHIDNIA, H., SIDDIQI, G., OESTERLING, N., MINNIG, C., LAPANJE, A., MEGLIČ, P. & KRIVIC, M., 2016: Towards a European geothermal information platform, the EGIP pilot. Proceedings, European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, EGEC, AFPG, IGA, 9 p.

Poročila

Delavnica o popularizaciji geologije, 8.12.2016, Oddelek za geologijo, NTF

Nina RMAN¹ & Petra ŽVAB ROŽIČ²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana

²Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana

^{1,2}Slovensko geološko društvo, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana

V okviru tedna Univerze v Ljubljani je v četrtek 8.12.2016 na Naravoslovnotehniški fakulteti potekala Delavnica o popularizaciji geologije, ki sta jo soorganizirala Oddelek za geologijo (OG NTF) in Slovensko geološko društvo (SGD). Uvodni pozdrav so izrekli doc. dr. Petra Žvab Rožič, gostiteljica delavnice, izr. prof. dr. Nina Zupaničič, predstojnica OG NTF, in dr. Matevž Novak, predsednik SGD.

Dr. Nina Rman je v predstavitvi z naslovom »Možnost za nadgradnjo geoloških delavnic različnih zahtevnosti, od vrtca do srednje šole« povzela izkušnje iz približno 100 delavnic v izvedbi GeoZS in OG NTF v zadnjih 10 letih. Možnost nadgradnje predstavljajo predvsem nove teme, npr. praktični prikazi plazovitosti in mineralne surovine v krožnem gospodarstvu, priprava spletnih gradiv kot priprava na delavnico in delo po njej, terensko delo in delavnice za učitelje, pri čemer sta pomembna omejitvena dejavnika sprejemljiva cena delavnic (rentabilnost) ter trenutno omejena ekipa izvajalcev. Strinjali smo se, da je razlaga geološkega časa ena pomembnejših tematik v okviru delavnic, kar z uporabo dolžine razdelkov na vrstici uspešno prakticirajo v Kranjskem parku Kozjansko in Muzeju v Laškem.

Mag. Mojca Bedjanič in dr. Darja Komar sta predstavili GEO izobraževanja na Zavodu RS za varstvo narave (ZRSVN) in v Geoparku Karavanke, kjer pokrivajo celoten starostni spekter GEO izobraževanj, od vrtca do univerze za tretje življenjsko obdobje, izobraževanj za turistične vodnike, učitelje in vzgojitelje. Za slednje so imeli letos, v 6. letu izvajanja projekta »Zabavno, poučno in nič mučno«, že 53 udeležencev iz regije, katerim se želijo priključiti tudi iz drugih delov Slovenije. Izvajajo veliko aktivnosti v naravi, vendar dodatne aktivnosti lahko izvajajo le preko projektnega dela. Geopark Karavanke bo v letu 2017 teden Geoparka Karavanke razširili na dvotedenski Geofestival. V Kranju ZRSVN uspešno sodeluje pri uvajanju celoletnih geoloških vsebin v vrtce, kjer so pod strokovnim vodstvom geologinje in v izvedbi vzgojiteljic naredili celo

razstavo mineralov in fosilov ter film in bi lahko izkušnje prenesli v širši prostor.

Mojca Gorjup Kavčič je predstavila GEO izobraževanja v Geoparku Idrija. Aktivnosti v Geoparku Idrija se izvajajo od leta 2012, izvedenih je bilo veliko ureditev geoloških interpretacij na terenu, ponudba delavnic pa je zdaj tudi dostopna na spletu in v zloženki. Letos so v okviru programa Erasmus+ pridobili projekt ESTEAM (<http://esteemproject.wixsite.com/mysite>), v katerem bodo v sodelovanju 3 geoparkov in 3 osnovnih šol (Slovenija, Portugalska, Norveška) ter Univerze v Ljubljani (OG NTF) na podlagi analiz nacionalnih učnih načrtov ter potreb učiteljev in učencev pripravili naravoslovne učne programe in mobilno aplikacijo za poučevanje naravoslovnih predmetov v osnovnih šolah.

Mag. Matija Križnar je v okviru predavanja »Paleontološke zbirke – fosili iz narave v muzej« predstavil izkušnje pri postavitvah paleontoloških zbirk, pri katerih največkrat sodeluje tudi Prirodoslovni muzej Slovenije (PMS) in sprožajo vprašanja o varovanju/ropanju najdišč.

O geoloških zbirkah v osnovnih in srednjih šolah je govorila doc. dr. Petra Žvab Rožič, ki je predstavila tudi konceptualne razlike med njimi in primer ureditve zbirke v OŠ Koseze s spremljajočim učnim gradivom za učitelje. Pri ureditvi omenjene zbirke so sodelovali tudi študenti geologije. Za vzorce, ki niso neposredno uporabni v urejeni zbirki, predlagajo, da se jih uredi v manjše tematske predstavitve, kot so npr. kamnine sveta ali vulkani in tako ne bi obtičali skriti v omari. Splošno vsebino učnega gradiva bomo nadgradili in revidirali, tako znotraj geološke stroke kot s strani učiteljev, in uredili prosti dostop do nje preko spletnih strani SGD. Poudarjeno je bilo, da lahko spodbujanje učencev k zbiranju predvsem mineralov in fosilov hote ali nehoti sčasoma pripelje do izropanja nahajališč, zato smo se strinjali, da je potrebno v vse stopnje izobraževanja vključiti vsebine varovanja in ohranjanja narave. Ob vsakem geo-dogodku

naj se poudari, da se je resnejšega zbiranja potrebno lotiti le skupaj s strokovnjaki, da ne smejo posegati v zaščitena območja, sploh ne s fizičnimi posegi v kamnino, ter naj primerke le fotografirajo. Objaviti je potrebno seznam inštitucij, na katere se lahko obrnejo po nasvet. Vključitev ZRSVN je smiselna tudi v zgodnjo fazo poglobljenih raziskav na posameznih nahajališčih, za kar je potrebno najprej motivirati mentorje in profesorje pri diplomskih nalogah ipd. Poleg tega je ZRSVN smiselno obveščati in mu predajati rezultate raziskav, da jih lahko uporabijo za opis in zaščito varovanih nahajališč. Če sumimo, da so bili v objavljeni literaturi vzorci pridobljeni brez dovoljenj, se avtorje pozove k predložitvi dovoljenja in v kolikor ga ni, se poda ovadba. Doc. dr. Uroš Herlec je predlagal, da se pristopi k pripravi knjige o pomembnih redkih geoloških primerkih v Sloveniji, pri čemer bi vključili tudi zasebne zbiralce. S tem bi dobili zelo pomembno nacionalno inventarno zbirko posebnih, redkih primerkov. Hkrati je predlagal spodbujanje zbiranja prodnikov na prodiščih, kar ne predstavlja škodljivega posega v naravo, raznolikost kamnin pa je izjemna.

Dr. Matevž Novak je delavnico zaključil s predstavitev »Geološki sprehod po Ljubljani kot primer izobraževanja na prostem«, ki nadaljuje tradicijo profesorjev z Oddelka za geologijo s tem, da je prilagojen širši javnosti, učencem in dijakom, turističnim vodnikom idr. Razložil je, da je možno Prešernov spomenik predstaviti tudi kot spomenik zemeljski skorji, ter da je mestna hiša pravzaprav mali geološki muzej in povzel prednosti učenja geologije v mestih. Udeleženci so idejo zelo pohvalili in že razmišljajo, kako bi jo prenesli v svoja okolja.

Med pogovorom smo izvedeli, da učbenik za geologijo, ki se je v času usmerjenega srednjošolskega izobraževanja 1984–1986 v obsegu 75 ur poučevala v 3. letniku gimnazije, ni bil nikoli pri-

pravljen. V prihodnje bo na dvopredmetnem (pedagoškem) študiju geografije geologija postala le izbirni predmet, kar dolgoročno vodi še v slabšo prepoznavnost stroke. Zato se je potrebno aktivirati takoj. Dokler priprava učnega gradiva ne bo podprta z večjim projektom, se je potrebno usmeriti na pripravo gradiva za učitelje in vzgojitelje (kar so nekateri profesorji v preteklosti že izvajali) v dveh smereh. Prva je izdelava "instant" nazornega gradiva različnih zahtevnosti in obsega snovi za krajša izobraževanja, ki so neposredno vezana na učni proces (posamezna tema v učnem načrtu/učbeniku, ki se lahko obdelava na delavnici, naravoslovnem dnevu, ekskurziji). Druga smer zajema nudenje strokovne podpore pri izvajanju večdnevne ali celoletne dejavnosti, katerih glavni nosilci so učitelji (krožki, tematske aktivnosti). O tem smo se pogovarjali tudi na sestanku Skupine za popularizacijo geologije, ki deluje pod okriljem SGD in se je sestala po delavnici. Skupino smo razširili na naslednje predstavnike: P. Žvab Rožič (NTF, vodja), N. Rman (GeoZS), M. Bedjanič (ZRSVN), M. Križnar (PMS), D. Komar (Geopark Karavanke), M. Gorup Kavčič (Geopark Idrija), M. Novak (GeoZS, predsednik SGD), R. Brajkovič (NTF), P. Škrinjar (Krajinski park Strunjan). Za pridružene člane predlagamo izr. prof. dr. Mihaela Brenčiča, doc. dr. Uroša Herleca in dr. Miho Jerška. Glavni rezultat sestanka je bila odločitev, da bo spletna stran namenjena popularizaciji geologije organizirana kot podstran novo postavljene strani SGD in bo pripravljena do pomladi 2017. Na njej bodo objavljene vsaj naslednje informacije in sezname: javno dostopne zbirke z geološko vsebino, učne in naravoslovne poti z geološko vsebino, gradiva za izvedbo delavnic in poizkusov, ponudniki aktivnosti za naravoslovne dneve, dogodki za popularizacijo geologije in še kaj drugega. V letu 2017 bomo organizirali tudi nekaj dogodkov in strokovnih ekskurzij. Prva bo Geološki sprehod po Ljubljani, predvidoma v začetku marca 2017, o ostalih pa boste pravočasno obveščeni.

V spomin akademiku prof. dr. Mariu Pleničarju



2. oktobra 2016 je geološka stroka izgubila pomembnega znanstvenika in profesorja, akademika dr. Maria Pleničarja. Njegova življenjska pot je bila dolga in plodna. Rodil se je 5. avgusta 1924 v Ljubljani, kjer je med 2. svetovno vojno zaključil klasično gimnazijo. Na takratni Prirodoslovno-matematični fakulteti Univerze v Ljubljani je vpisal študij geologije in kemije in se nato odločil, da bo njegova poklicna pot posvečena le geologiji. Še pred diplomo, leta 1951, je bil dve leti zaposlen na Geološkem zavodu v Ljubljani, kjer je nabiral prve praktične izkušnje. Eno leto je deloval kot naftni geolog v Lendavi in se potem vrnil na Geološki zavod, kjer je 1958 postal vodja oddelka za geološko kartiranje. Bil je tako kartirajoči geolog kot kasneje tudi koordinator dela vseh ekip. Pridobil je izjemen vpogled v geološke razmere skoraj četrtine Slovenije.

Poleg strokovnega ga je zanimalo tudi znanstveno-raziskovalno delo in je tako leta 1960 doktoriral na ljubljanski univerzi. Naslov disertacije »Stratigrafski razvoj krednih plasti na južnem Primorskem in Notranjskem« priča, da je svoje mesto v stroki našel na področju

paleontologije. Svoje znanje je dopolnil z izobraževanjem na paleontološkem inštitutu dunajske univerze pod mentorstvom prof. Kühna. Širina praktičnega geološkega znanja mu je omogočila, da je bil v letih 1963 in 1969 član skupine slovenskih geologov, ki so delovali v Alžiriji. Po povratku se je zaposlil na takratnem Oddelku za Montanistiko FNT, kjer je bil izvoljen najprej v izrednega in 1976 v rednega profesorja. Prevezel je predavanja pri predmetih Osnove geologije, Fizikalna geologije, Geološko kartiranje in Biostratigrafija kenozoika. Po upokojitvi, leta 1984, se je še vedno vračal na fakulteto in na Geološki zavod Slovenije, kjer je nadaljeval svoje raziskovalno in strokovno delo. Leta 1981 je bil izvoljen za dopisnega in leta 1991 za rednega člana Slovenske akademije znanosti in umetnosti.

Velik del svojih raziskav je prof. dr. Pleničar posvečal krednim plastem ter predvsem makrofavni – rudistom, kjer je določil več novih vrst. Druga smer njegovih raziskav je bila usmerjena v odkrivanje ležišč nafte in zemeljskega plina ter iskanju naravnih podzemnih skladišč za uvoženi zemeljski plin. Svoja dognanja je predstavil na številnih kongresih in domačih ter mednarodnih srečanjih. Od leta 1945 dalje, ko je sodeloval na 1. jugoslovanskem kongresu na Bledu, jih je sledilo več kot 70. Sam ali s sodelavci je napisal več kot 100 znanstvenih člankov. Je avtor visokošolskega učbenika in številnih prispevkov v Enciklopediji Jugoslavije in Enciklopediji Slovenije. S sodelavci je izdal 5 listov osnovne geološke karte SFRJ 1 : 100.000. Svoje raziskovalno delo na področju paleontologije je leta 2005 sklenil z monografijo »Zgornjekredni rudisti v Sloveniji«, poznavanje geoloških razmer v Sloveniji pa s souredništvom temeljnega dela »Geologija Slovenije«, v kateri je tudi avtor in soavtor. Pomemben je tudi njegov prispevek k popularizaciji geologije. Za slovenske poljudne revije je napisal preko 35 sestavkov.

Njegovo delo pa ni bilo le pedagoško in raziskovalno. Od 1978 do 1984 je bil predstojnik Inštituta za geologijo pri VTO Montanistika, bil je član medfakultetne in meduniverzitetne komisije za vključevanje programa SLO v strokovne predmete na področju geologije, rudarstva in naftnega rudarstva ter član in tudi predsednik komisije za znanstvenoraziskovalno delo na VTO Montanistiki. V okviru RSS je bil član programskega sveta za odkrivanje in raziskave surovin splošnega pomena. Bil je član več znanstvenih svetov pri inštitutih ZRC SAZU, terminološke komisije, uredniškega odbora slovenske sekcije revije Bulletin Scientifique, Geologije, Acta Carsologica in Geološkega zbornika, urednik Razprav 4-razreda SAZU in član programskega sveta za usmerjeni raziskovalni program Naravna in kulturna dediščina slovenskega naroda pri SAZU, predsednik SGD, član znanstvenega sveta za nafto pri JAZU in član redakcijskega odbora Zveznega geološkega zavoda za osnovno geološko karto SFRJ.

Njegovo delo ni ostalo neopaženo. Za svoje dosežke je tako leta 1961 prejel nagrado Sklada Borisa Kidriča, leta 1976 je bil odlikovan z redom dela s srebrnim vencem, 1989 je postal častni član z zlato plaketo Znanstvenog savjeta za naftu pri JAZU, 1990 je kot dolgoletni sodelavec in član redakcijskega odbora za Osnovno geološko karto Jugoslavije dobil spominsko listino Zveznega geološkega zavoda v Beogradu. Leta 2001 je kot prvi prejel Lipoldovo medaljo za življenjsko delo, ki jo podeljuje GeoZS. Leta 2005 je bil odlikovan z državnim odlikovanjem z zlatim redom za zasluge za izjemno delo na področju naravoslovnih znanosti, leta 2011 pa je skupaj z dr. Bojanom Ogorelcem in dr. Matevžem Novakom prejel Lipoldovo plaketo za uredništvo publikacije Geologija Slovenije.

Prof. dr. Mario Pleničar pa je bil tudi človek, ki je kljub svojemu mirnemu in tihemu značaju, pustil na študentih in sodelavcih neizbrisen pečat. Odlikovali so ga izredna delavnost, vztrajnost in poštenost. V popolnem nasprotju z njegovim skromnim in prijaznim značajem so bile izredno duhovite pripombe, ki jih je popolnoma nepričakovano izrekel. Imeli smo ga izredno radi, ga spoštovali kot učitelja in cenili kot človeka.

Nina Zupančič

Akad. prof. dr. Mario Pleničar: pomembnejša bibliografija 1953–2011

- PLENIČAR, M. 1953: Obvestilo o geološkem kartiranju lista Vrhnika 3 in 4 = Note on the Geological Mapping of the Sheet Vrhnika 3 and 4. *Geologija*, 1: 298-299.
- PLENIČAR, M. 1953: Prispevek h geologiji Cerkniškega polja = Contribution to the geology of Cerkniško polje. *Geologija*, 1: 111-119.
- PLENIČAR, M. 1953: Arteški studenec v Lendavi. *Proteus*, 16 (1953/1954): 158.
- PLENIČAR, M. 1953: Naftno polje pri Lendavi. *Proteus*, 16 (1953/1954): 37-39.
- PLENIČAR, M. 1953: Sledovi zemeljskih prelomov na Notranjskem in Primorskem. *Proteus*, 16 (1953/1954): 118-121.
- PLENIČAR, M. 1953: Zanimivi podzemeljski hudo-urniki. *Proteus*, 16 (1953/1954): 124-125.
- PLENIČAR, M. & RAMOVŠ, A. 1954: Geološko kartiranje severovzhodno od Brežic = Geological mapping Northeast of Brežice. *Geologija*, 2: 242-253, geološka karta in profil.
- PLENIČAR, M. 1954: Obmurska naftna nahajališča = Oil fields in the Obmurje. *Geologija*, 2: 36-93, karte.
- PLENIČAR, M. 1954: Rudisti. *Proteus*, 16 (1953/1954): 217-219.
- PLENIČAR, M. 1954: Vrniki. *Proteus*, 17 (1954/1955): 89-90.
- PLENIČAR, M. 1955: Nahajališče kredne favne jugozahodno od Jelšan pri Ilirski Bistrici = Cretaceous fauna at Jelšane near Ilirska Bistrica. *Geologija*, 3: 204-207.
- PLENIČAR, M. 1955: Oolitni boksiti v kredi na Primorskem = On the Oölitic bauxites in the cretaceous of the Slovene littoral. *Geologija*, 3: 198-203.
- PLENIČAR, M. 1956: Razvoj paleocena in eocena v Sloveniji. V: DUHOVNIK, J. & RAMOVŠ, A. (ur.): Prvi jugoslovanski geološki kongres : predavanja in poročila = 1st Geological Congress of FNR Yugoslavia : transactions and reports: Bled 23. - 27. V. 195. Ljubljana, 45-46.
- PLENIČAR, M. 1956: Razvoj pliocena v Sloveniji. V: DUHOVNIK, J. & RAMOVŠ, A. (ur.): Prvi jugoslovanski geološki kongres: predavanje in poročila = 1st Geological Congress of FNR Yugoslavia: transactions and reports: Bled 23. - 27. V. 1954. Ljubljana, 55-58.
- PLENIČAR, M. 1956: O potresu pri Ilirski Bistrici. *Proteus*, 18 (1955/1956): 217-219.
- PLENIČAR, M. 1956: Geološki izlet na Snežnik. *Proteus*, 19 (1956/1957): 16-18.
- PLENIČAR, M. 1956: Iz geologije slovenskih vinogradov. *Proteus*, 19 (1956/1957): 189.
- PLENIČAR, M. 1957: Zgodovina geologije v starem in novem veku. *Proteus*, 20 (1957/1958): 137-140.
- PLENIČAR, M. & NOSAN, A. 1958: Paleogeografija panonskega obrobja v Sloveniji = Paleogeography of the Pannonian borderland in Slovenia. *Geologija*, 4: 94-110.
- PLENIČAR, M. 1958: Poročilo o globokomorskem razvoju krednih plasti pri Kostanjevici = Report on the deep-sea development of the cretaceous beds at Kostanjevica. *Geologija*, 4: 152-156.
- PLENIČAR, M. 1958: Gradbeni kamen Ljubljane. *Proteus*, 21 (1958/1959): 137-140.
- PLENIČAR, M. 1958: Geologi - samouki. *Proteus*, 23 (1960/1961): 137-139.
- PLENIČAR, M. 1959: Tektonski okni pri Knežaku = Two tectonic windows at Knežak. *Geologija*, 5: 5-10, geološka karta.
- PLENIČAR, M. 1960: Prispevki h geologiji postojnskega jamskega sistema. *Naše jame*, 2: 54-58.
- PLENIČAR, M. 1960: Stratigrafski razvoj krednih plasti na južnem Primorskem in Notranjskem = The stratigraphic development of Cretaceous beds in southern Primorska (Slovene littoral) and Notranjska (inner Carniola). *Geologija*, 6: 22-145, geološki karti.
- PLENIČAR, M. 1960: Stratigrafski razvoj krednih plasti na južnem Primorskem in Notranjskem: doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, str. 229, 8 str. pril.
- PLENIČAR, M. 1961: Stratigrafski razvoj krednih plasti na južnem Primorskem in Notranjskem. *Geologija*, 6: 22-145.
- PLENIČAR, M. 1961: Hipurit iz krednega apnenca pri Postojni = Hippurites from cretaceous limestone near Postojna. *Geologija*, 7: 63-65.

- PLENIČAR, M. 1961: Položaj krede južne Slovenije v mediteranski geosinklinali = Situation of the cretaceous beds from southern Slovenia in the Mediterranean geosyncline. *Geologija*, 7: 35-42.
- PLENIČAR, M. 1963: Kaprinide in podrod Radiolitella (Rudistae) v krednih skladih jugozahodne Slovenije = Caprinidae and the genus Radiolitella from the cretaceous strata of southwestern Slovenia. *Razpr. 4. razr. SAZU*, 7: 557-587, 8 tab.
- PLENIČAR, M. 1965: O novih najdbah rudistov na območju Kočevskega roga = New discoveries of rudistes in the region of Kočevski rog, southeastern Slovenia. *Geologija*, 8: 92-101.
- PLENIČAR, M. & RAVNIK, D. 1965: Geologija in človek. Knjižna zbirka Piramida, Življenje in tehnika, Ljubljana: 141 str.
- PLENIČAR, M. & BUSER, S. 1967: Kredna makrofavna Trnovskega gozda = The Cretaceous macrofauna in the western part of the Trnovski gozd. *Geologija*, 10, 147-159, table I-VIII.
- BUSER, S. PLENIČAR, M. & GRAD, K. 1967: Osnovna geološka karta SFRJ list Postojna. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd, 1 zvd, barv.
- HINTERLECHNER-RAVNIK, A. & PLENIČAR, M. 1967: Smrekovski andezit in njegov tuf = The Smrekovec andesite and its tuff. *Geologija*, 10: 219-237.
- PLENIČAR, M. 1968: Osnovna geološka karta, list Goričko. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd. 1 zvd, barv.
- PLENIČAR, M. 1968: Z geološkim kladivom na Gorjance. *Proteus*, 31/1(1968/1969): 28-29.
- PLENIČAR, M. 1969: Osnovna geološka karta SFRJ list Ribnica. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd, 1 Izvd. barv.
- PLENIČAR, M., BOŠKOV-ŠTAJNER, Z., REŠČEC, T. & RIJAVEC, L. 1968: Stratigraphic units of the southern part of Pannonian Basin in the territory of Yugoslavia. *Bulletin scientifique. Section A, Sciences naturelles, techniques et medicales*, 13: 73-74.
- PLENIČAR, M. 1969: Osnovna geološka karta SFRJ list Trst. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd 1 izvd, barv.
- PLENIČAR, M., BOŠKOV-ŠTAJNER, Z., REŠČEC, T. & RIJAVEC, L. 1967: Stratigraphic units of the southern part of Pannonian Basin in the territory of the Soc. Fed. Rep. of Yugoslavia. *Giornale di Geologia*, 35: 287-296.
- PLENIČAR, M. 1969: Tektonska karta Slovenije. Ljubljana: RSS, 29 str.
- PLENIČAR, M. 1970: Tolmač za list Goričko in Leibnitz. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd, 39 str.
- PLENIČAR, M. 1970: Tolmač za list Postojna. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd, 62 str.
- PLENIČAR, M. 1970: Boksit. *Tim*, 9 (1970/1971): 22-24.
- PLENIČAR, M. 1970: Nafta in zemeljski plin. *Tim*, 9 (1970/1971): 72-73.
- PLENIČAR, M. 1970: Opekarska in lončena glina. *Tim*, 9 (1970/1971): 118-119.
- PLENIČAR, M. 1970: Železo. *Tim*, 9 (1970/1971): 162-163.
- PLENIČAR, M., BUSER, S., ŠRIBAR, L. & LAPAJNE, J. 1971: Geološki, paleontološki i geofizički rezultati istraživanja južne Primorske i Dolenjske. *Nafta*, 22: 253-259.
- PLENIČAR, M. 1971: Hipuritna favna iz Stranic pri Konjicah = The hippurites fauna of Stranice near Konjice. *Razpr. 4. razr. SAZU*, 14/8, 239-264, 10 f. pril.
- PLENIČAR, M. 1971: Bentoniti. *Tim*, 9 (1970/1971): 222-223.
- PLENIČAR, M. 1971: Brombole. *Proteus*, 33 (1970/1971): 227-228.
- PLENIČAR, M. 1971: Določanje rudnin. *Tim*, 9 (1970/1971): 364-366.
- PLENIČAR, M. 1971: Kako nabiramo in hranimo rudnine. *Tim*, 9 (1970/1971): 308-310.
- PLENIČAR, M. 1971: Okrasni kamen. *Tim*, 9 (1970/1971): 272-273.
- PLENIČAR, M. 1971: Svinec, cink in antimon. *Tim*, 9 (1970/1971): 440-441.
- ŠIKIĆ, D., PLENIČAR, M., ŠPARICA, M., GRAD, K., RIJAVEC, J., BUSER, S., BLAŠKOVIĆ, I., PRELOGOVIĆ, E., DOZET, S., DROBNE, F., MIOČ, P., OREHEK, A., PAVLOVEC, R., ŠRIBAR, L., TURNŠEK, D. & MAGAŠ, N. 1972: Osnovna geološka karta SFRJ list Ilirska Bistrica. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd, 1 Izvd. barv.
- PLENIČAR, M. 1972: Rudisti, nenavadne školjke davnih dni. *Proteus*, 34/9 (1971/1972): 411-414.
- PLENIČAR, M. 1973: Medsebojna primerjava zgornjekrednih eksogir iz Slovenije in Alžirije = A comparison between the Upper Cretaceous exogyras of Slovenia and those of Algeria. *Razpr. 4. razr. SAZU*, 16/5: 189-216.
- PLENIČAR, M. 1973: Možnost nastopanja naftnih nahajališč v Halozah in Slovenskih goricah. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 20: 191-197.
- PLENIČAR, M. 1973: Radioliti iz krednih skladov Slovenije I = Radiolites from the Cretaceous Beds of Slovenia, Part I. *Geologija*, 16: 187-226.

- PLENIČAR, M., POLŠAK, A. & ŠIKIĆ, D. 1973: Tolmač za list Trst. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd, 68 str.
- PLENIČAR, M. 1973: Geološki izlet na Nanos. *Proteus* 36/3 (1974): 109-113.
- PLENIČAR, M. 1974: Radioliti iz krednih skladov Slovenije II = Radiolites from the Cretaceous Beds of Slovenia, Part II. *Geologija*, 17: 131-179.
- PLENIČAR, M. 1974: Gosavski skladi Slovenije. *Geologija*, 17: 550-555.
- PLENIČAR, M. 1975: Hipuriti Nanosa in Tržaško-komenske planote = Hippuritidae of Nanos and the Trieste-Komen plain. *Razpr. 4. razr. SAZU*, 18/4: 81-115.
- PLENIČAR, M. & PREMUR, U.: Facialne karakteristike sjeverozapadnih Dinarida. II. Godišnji znan. Skup savjeta za naftu JAZU, 47-54.
- PLENIČAR, M. & RIJAVEC, L. 1975: Faziostratotypus: Orlek bei Zagorje ob Savi, Slowenien, Yugoslawien. In: BALDI, T. & SENEŠ, J. (eds.): *Cronostratigraphy und Neostratotypen*, 5, OM Egerien, 153-156.
- PLENIČAR, M., PREMUR, U. & HERAK, M. 1976: Osnovna geološka karta, list Novo mesto. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd 1 zvd, barv.
- ŠIKIĆ, D. & PLENIČAR, M. 1975: Tolmač za list Ilirska Bistrica. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000, Zvezni geološki zavod Beograd, 51 str.
- PLENIČAR, M. 1976: Nafta. Mladinska knjiga, (Zbirka Pelikan), 20 str.
- MIOČ, P., ŽNIDARČIČ, M., HINTERLECHNER-RAVNIK, A., RIJAVEC, J., FERJANČIČ, L. & PLENIČAR, M. 1977: Osnovna geološka karta SFRJ. L 33-55, Slovenj Gradec. Beograd: Zvezni geološki zavod, 1976/1977. 1 izvd, barv.
- AVGUŠTIN, C., ČERMELJ, L., ČERVEK, S., DUHOVNIK, J., GROSMAN, M., KOLAR, J., KVATERNIK, F., LOVKA, M., LOVRENČAK, F., MALAČIČ, J., MEDVED, J., MERHAR, V., OSOLE, F., PETERLIN, S., PETKOVŠEK, Z., PLENIČAR, M., PREGL, M., RAMOVŠ, A., SAFONOV, N., SPANRING, J., TARMAN, K. & KRUSIČ, M. (ur.): 1977: *Geografija*, (Leksikoni Cankarjeve založbe). Cankarjeva založba, 272 str.
- PLENIČAR, M. 1977: Rudisti v krednih skladih Slovenije = Rudists from the Cretaceous Beds of Slovenia. *Geologija*, 20: 5-31.
- PLENIČAR, M. & PREMUR, U. 1977: Tolmač za list Novo mesto. Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100.000. Zvezni geološki zavod Beograd, 61 str.
- PLENIČAR, M. 1978: Potresi. *Proteus*, 41/4: 135-139.
- PLENIČAR, M. 1979: Podloga terciarnih slojeva murske i sjeverozapadnog dijela dravske potoline. V: 4 godišnji znanstveni skup Sekcije za primjenu geologije, geofizike i geokemije Znanstvenog savjeta za naftu, Stubičke Toplice, 9.-12.5.1978: zbornik radova, Radovi znanstvenog savjeta za naftu, Serija A, knj. 7. Zagreb: Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti, 45-51.
- PLENIČAR, M. 1979: Cretaceous beds in Slovenia. In: DROBNE, K. (ed.): *Guidebook, 16th European micropaleontological colloquium*, Ljubljana, 37-48.
- RIJAVEC, L. & PLENIČAR, M. 1979: Neogene beds in Slovenia. In: DROBNE, K. (ed.): *Guidebook, 16th European micropaleontological colloquium*, Ljubljana, 71-78.
- PLENIČAR, M. 1979: Potresi v labilni coni Slovenije. *Proteus*, 42/2: 73-75.
- PLENIČAR, M. 1979: Potresi v luči tektonike plošč. *Proteus*, 41/8: 302-305.
- PLENIČAR, M. & PAVLOVEC, R. 1980: Geološka zgradba okolice Ilirske Bistrice. *Bistriški zapisi*, 1, 34-43.
- DROVENIK, M., PLENIČAR, M. & DROVENIK, F. 1980: Nastanek rudišč v SR Sloveniji = The origin of Slovenian ore deposits. *Geologija*, 23/1: 1-157.
- PLENIČAR, M. & PAVLOVEC, R. 1980: Geološka zgradba okolice Ilirske Bistrice. *Bistriški zapisi*, 1: 34-43.
- DROVENIK, M., PLENIČAR, M. & DROVENIK, F. 1980: Nastanek rudišč v SR Sloveniji = The origin of Slovenian ore deposits. *Geologija*, 23/1: 1-157.
- PLENIČAR, M. 1980: Radiometrično določanje starosti v geološki zgodovini. *Proteus*, 42/9-10, 346-349.
- PLENIČAR, M. & PAVLOVEC, R. 1981: The boundary between cretaceous and tertiary in the limestone of the West Dinarides. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 28: 28-31.
- PLENIČAR, M. & PAVŠIČ, J. 1981: Danijske plasti v Sloveniji. V: PAVLOVEC, R. (ur.): *Povzetki referatov. Ekskurzije, Odsek za geologijo: Inštitut za geologijo, VTO montanistika*, 4-5.
- PLENIČAR, M. 1981: Ekskurzija: Nova Gorica - Štanjel - Dutovlje - Sežana - Divača - Vremški britof. V: PAVLOVEC, R. (ur.): *Povzetki referatov. Ekskurzije, Odsek za geologijo: Inštitut za geologijo, VTO montanistika*, 46-47.
- PLENIČAR, M. 1981: Ekskurzija: Postojna - Nova Gorica - Kanal. V: PAVLOVEC, R. (ur.): *Povzetki referatov. Ekskurzije: Odsek za geologijo: Inštitut za geologijo, VTO montanistika*, Ljubljana: 30-35.

- PLENIČAR, M. & PAVLOVEC, R. 1981: Novi pogledi na razvoj maastrichtija pri nas. Rudarsko-metalurški Zbornik, 2: 383-386.
- PLENIČAR, M. 1981: Osnove geologije. Skripta, Univerza v Ljubljani: Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, 117 str.
- PLENIČAR, M. 1981: Idrijski potres leta 1511. Proteus, 43/9-10: 335-337.
- PLENIČAR, M. 1981: Vroče točke na našem planetu. Življenje in tehnika, 32/6: 58.
- MIOČ, P., ŽNIDARČIČ, M., JERŠE, Z., FERJANČIČ, L., PLENIČAR, M. & OREHEK, A. 1983: Osnovna geološka karta SFRJ. L 33-54, Ravne na Koroškem. Beograd: Zvezni geološki zavod, 1981/1983.
- PLENIČAR, M. 1982: The rudist fauna of Snežnik = Rudistna favna Snežnika. Razpr. 4. razr. SAZU, 24/1, 1-26.
- STRGAR, V., PLENIČAR, M. & MIKUŽ, 1982: Ekskurzije naravoslovnih krožkov. 5, Po Gorjancih in Krškem polju. Ljubljana: Prirodoslovno društvo Slovenije, 23 str.
- PAVLOVEC, R. & PLENIČAR, M. 1983: Der ältere Teil der Liburnischen Formation in den NW-Dinariden. Zitteliana, 10: 195-199.
- PLENIČAR, M. & PREMUR, U. 1983: Die Entwicklung der Kreideschichten Sloweniens (NW Jugoslawien). Zitteliana, 10: 191-194.
- PLENIČAR, M. & ŠRIBAR, Lj. 1983: Kredni skladi med Kočevjem in Krko. Geološki zbornik, 4: 47-67.
- PLENIČAR, M. 1983: Potresno območje Krškega polja. Proteus, 45/5: 169-171.
- PLENIČAR, M. & PAVLOVEC, R. 1984: Facialni razvoji mezozojskih in kenozojskih kamnin Slovenije. Nafta, 35: 5-10.
- PLENIČAR, M. 1984: O krednih školjkah rudistih na snežniški planoti. Bistriški zapisi, 2: 46-48.
- PLENIČAR, M., BRAČIČ-ŽELEZNIK, B., JANEŽ, J. & PAVLOVEC, R. 1985: K poznavanju miocenskih plasti v okolici Briš pri Kamniku. Rudarsko-metalurški zbornik, 32/1-2: 11-20.
- PLENIČAR, M. & CIMERMAN, F. 1985: Oligocenske bazalne usedline v Sloveniji. Geološki glasnik, 28: 179-183.
- PLENIČAR, M. 1985: Senonijske rudistne biostrome severno od Kočevja = Senonian rudistid biostromes north of Kočevje (NW Yugoslavia). In: GRAFENAUER, S., PLENIČAR, M. & DROBNE, K. (eds.): Zbornik Ivana Rakovca = Ivan Rakovec volume, Razpr. 4. razr. SAZU, 26: 247-258.
- PAVLOVEC, R., KULENOVIĆ, E., ČIČIĆ, S., JUNGWIRTH, E., PANTIĆ, N., MIHAJLOVIĆ, Đ., ŠIKIĆ, L., TEMKOVA, V., DROBNE, K., DROBNE, F., CIMERMAN, F., ŠIMUNIĆ, A., ŠIKIĆ, K., MITROVIĆ-PETROVIĆ, J., BABIĆ, L., ZUPANIĆ, J., MILAKOVIĆ, B., PAVLOVIĆ, M. B., PAVŠIĆ, J., PLENIČAR, M. & HERLEC, U. 1985: Simpozij o „Događajima na granici između eocena i oligocena u Jugoslaviji“ u okviru Međunarodne podkomisije za stratigrafiju paeleogena: project 174, Geološki glasnik: građa, 28. Sarajevo, 204 str.
- PUC, M. & PLENIČAR, M. 1985: Babe in dedci. Proteus, 47/5: 167-174.
- PAVLOVEC, R. & PLENIČAR, M. 1985: Prof. dr. Anton Ramovš šestdesetletnik. Proteus, 47/5: 163-166.
- PLENIČAR, M. 1986: Geološka ekskurzija na Liparske otoke. Obvestila Slovenskega geološkega društva, 13: 8-13.
- PLENIČAR, M. 1986: Geološka ekskurzija po Slavoniji. Obvestila Slovenskega geološkega društva, 14: 10-12.
- PLENIČAR, M. 1986: Akademiku prof.dr. Ivanu Rakovcu in memoriam. Geologija, 28/29 (1985/86): 5-6.
- PLENIČAR, M. 1986: Zapustil nas je akademik, profesor dr. Srečko Brodar. Geologija, 28/29 (1985/86): 7-8.
- PLENIČAR, M. 1986: Avlakogeni. Življenje in tehnika, 37/11: 41-43.
- PLENIČAR, M. 1986: Paleomagnetizem. Življenje in tehnika, 37/1: 53-55.
- DROBNE, K., OGORELEC, B., PLENIČAR, M., BARATTOLO, F., TURNŠEK, D. & ZUCCHI-STOLFA, M. L. 1987: La coupe de Dolenja vas, un passage du Cretace au Paleogene. In: COLIZZA, E. (ed.): Communications: abstracts. Poster session, Trieste: Università degli studi, Istituto di geologia e paleontologia, 34 str.
- DROBNE, K., OGORELEC, B., PLENIČAR, M., BARATTOLO, F., TURNŠEK, D. & ZUCCHI-STOLFA, M. L. 1987: La Coupé de Dolenjska vas, un passage du Cretacé au Paléocène: predavanje. Trieste.
- DROBNE, K., OGORELEC, B., PLENIČAR, M., BARATTOLO, F., TURNŠEK, D. & ZUCCHI-STOLFA, M. L. 1987: The Dolenja vas section, a transition from Cretaceous to Paleocene in the NW Dinarides, Yugoslavia. Memorie della Società Geologica Italiana, 40: 73-84.
- PAVLOVEC, R., PLENIČAR, M., DROBNE, K., OGORELEC, B. & ŠUŠTERŠIČ, F. 1987: History of geological investigations of the Karst (Kras) region and the neighbouring territory (Western Dinarides). Memorie della Società Geologica Italiana, 40: 9-20.
- OGORELEC, B., OREHEK, A., BUSER, S. & PLENIČAR, M. 1987: Komen beds - Skopo at Dutovlje (Upper Cretaceous). In: COLIZZA, E. (ed.): Excursions - 5th and 6th June 1987, E. Friuli,

- Karst of Gorizia and of W. Slovenia : guidebook. Trieste: Università degli studi, Istituto di geologia e paleontologia, 61-66.
- DROBNE, K., OGORELEC, B., PLENIČAR, M., ZUCCHI-STOLFA, M. L. & TURNŠEK, D. 1988: Maastrichtian, Danian and Thanetian Beds in Dolenja vas (NW Dinarides, Yugoslavia) Mikrofacies, foraminifers, rudists and corals. *Razpr. 4. razr. SAZU*, 29: 147-224.
- PLENIČAR, M. 1989: Profesor dr. Anton Ramovš, ob 65-letnici. *Loški razgledi*, 24-125.
- PAMUKČIEV, A., PAVLOVEC, R. & PLENIČAR, M. 1989: Geološke zanimivosti iz zahodne Bolgarije. *Proteus*, 52/2 (1989/90): 64-66.
- PLENIČAR, M. 1990: Odras tektonike na rečno mrežo Krške kotline. In: NATEK, K. (ed.): *Geomorfologija in geoekologija: zbornik referatov 5. znanstvenega posvetovanja geomorfologov Jugoslavije, Krško, 18. do 23. junij 1990*. Ljubljana: Znanstvenoraziskovalni center SAZU, 279-282.
- CAFFAU, M. & PLENIČAR, M. 1990: Biradiolites zucchi n. sp. nella Cava Romana di Aurisina = Biradiolites zucchi n. sp. from the Cava Romana di Aurisina. *Geologija*, 33: 207-213.
- PLENIČAR, M. & DOZET, S. 1991: Contribution to the knowledge of Upper Cretaceous beds in Kočevje and Gorski Kotar area (Slovenija). Abstracts. Zagreb: Institute of Geology, str. 73.
- BENIČ, J., DROBNE, K., KNEZ, M., OGORELEC, B., OREHEK, A., PAVLOVEC, R., PAVŠIČ, J., PLENIČAR, M. & DROBNE, K. (eds.) 1991: Introduction to the Paleogene SW Slovenia and Istria: field-trip guidebook. *Paleontološki inštitut I. Rakovca ZRC SAZU, IX*, 90 p.
- PLENIČAR, M. 1990: Profesorju Štefanu Kolenku v spomin = In Memory of Professor Štefan Kolenko. *Geologija*, 33: 5-8.
- PLENIČAR, M. 1991: Profesorju Štefanu Kolenku v spomin. *Stopinje*, 173-174.
- CAFFAU, M. & PLENIČAR, M. 1991: Rudistid fauna from Turonian deposits of the locality „Archi“ Mošćenice in the surroundings of Duino (Karst of Trieste). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 32: 259-315.
- PLENIČAR, M., HINTERLECHNER-RAVNIK, A. & FANINGER, E. 1991: Some Tectonic Elements and Tectonic Events on the SW Margin of the Pannonian Basin. in: KARAMATA, S. (ed.): *Geodynamic Evolution of the Pannonian Basin: proceedings of the International symposium held from October 18 to 20, 1990, Academic Conferences, Department of Natural and Mathematical Sciences*, 62/4. Beograd: Serbian Academy of Sciences and Arts, 161-170.
- ŠRIBAR, L. & PLENIČAR, M. 1990: Zgornjekredne cenocone v jugozahodni Sloveniji = Upper Cretaceous assemblage zones in southwestern Slovenia. *Geologija*, 33: 171-205.
- LUKACS, E., FAJFAR, P., KOGOVŠEK, B., PETROVSKI, D., PLACER, L., PLENIČAR, M., PRELOGOVIČ, E., RAVNIK, D., RIBARIČ, V. & VIDIC, F. 1992: Analiza naravnih danosti lokacije in uporabljenih seizmičnih parametrov NE Krško. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 39/3-4: 313-331.
- PLENIČAR, M. 1992: *Apricardia pachiniana* Sirna from the lower part of Liburnian beds at Divača (Triest-Komen Plateau). *Geologija*, 35: 65-68.
- PLENIČAR, M. & ŠRIBAR, Lj. 1992: Le recif de rudistes pres de Stranice (N.O. de la Yugoslavie). *Geologica Romana*, 28: 305-317.
- PERKO, D. & PLENIČAR, M. Krška kotlina. In: JAVORNIK, M., VOGLAR, D. & DERMASTIA, A. (eds.): *Enciklopedija Slovenije. 1. natis*. Ljubljana: Mladinska knjiga, 1987-2002, 6, 51-52.
- TURNŠEK, D., PLENIČAR, M. & ŠRIBAR, L. 1992: Lower Cretaceous fauna from Slovenski vrh near Kočevje (South Slovenia). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 33: 205-257, 2 sl., 14 T.
- CAFFAU, M. & PLENIČAR, M. 1992: A New Species of *Distefanella* from the Trieste karst (northeastern Italy). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 33, 189-203. *Ilustr. 3 sl., 3 T.*
- CAFFAU, M., PIRINI RADRIZZANI, C., PLENIČAR, M. & PUGLIESE, N. 1992: Rudist fauna and microfossils of the late Senonian (Monte Grisa Area, Karst of Trieste, Italy). *Geologica Romana*, 28: 163-171.
- PLENIČAR, M. 1990: Rudarstvo v Valvasorjevih delih. V: VOVKO, A. (ur.): *Valvasorjev zbornik ob 300 letnici izida Slave vojvodine Kranjske: referati s simpozija v Ljubljani 1989*. Ljubljana: Slovenska akademija znanosti in umetnosti, 157-160.
- PLENIČAR, M., DROBNE, K. & OGORELEC, B. 1992: Rudists and larger foraminifera below the Cretaceous - Tertiary boundary in the Dolenja vas section. In: KOLLMANN, H. A. & ZAPFE, H. (ed.): *New aspects on Tethyan Cretaceous fossil assemblages*, (Schriftenreihe der Erdwissenschaftlichen Kommissionen, Bd. 9. Wien, Springer, 231-240.
- PLENIČAR, M. 1992: Marini Kralj-Kapljevi ob njenem slovesu. *Geologija*, 35: 5.
- PLENIČAR, M. 1993: Radiolites from the Cretaceous beds of Stranice near Slovenske konjice (Slovenia) = Radioliti iz krednih plasti pri

- Stranica blizu Slovenskih konjic. Razpr. 4. razr. SAZU, 34: 45-103.
- PLENIČAR, M. & DOZET, S. 1993: Contribution to the knowledge of upper cretaceous beds in Kočevje and Gorski Kotar area (NW Dinarides). *Geologija*, 36: 183-194.
- PLENIČAR, M. 1993: Južni rob štajerskih krednih biolititnih razvojev. *Rudarsko metalurški zbornik*, 40/1-2: 233-240.
- CALLIGARIS, R., KRIVIC, K. & PLENIČAR, M. 1994: Fosili Tržaško-Komenskega Krasa: ostanki živih bitij izpred 95 milijonov let. *Prirodoslovni muzej Slovenije*, 40 str.
- PLENIČAR, M. 1995: Geografski in geološki pregled Radovljice. *Mohorjev koledar*, 62-64.
- PLENIČAR, M. 1994: Hippuritids from the upper cretaceous rudistid reefs near Stranice and Lipa (NE Slovenia) = Hipuritidi iz zgornjekrednih rudistnih grebenov pri Stranica in Lipi (SV Slovenija). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 35: 44-56.
- PLENIČAR, M. 1995: Sedemdeset let prof. dr. Antona Ramovša. *Proteus*, 57/ 4 (1994/1995): 161-164.
- CAFFAU, M. & PLENIČAR, M. 1995: Preliminary biometrical analysis on the three similar hippuritid species. *Geologija*, 37/38: 123-140.
- CAFFAU, M. & PLENIČAR, M. 1995: Santonian-Campanian Rudistid fauna from the Area of Basovizza/Bazovica. *Razpr. 4. razr. SAZU*, 36/10: 223-275.
- DROBNE, K., OGORELEC, B., BARATTOLO, F., DOLENEC, T., PLENIČAR, M., TURNŠEK, D., ZUCCHI-STOLFA, M.L. & MARTON, E. 1995: Stop 1: The Dolenja Vas section (Upper Maastrichtian, Lower and Upper Danian, Thanetian). In: *Atti Riunione del Gruppo Informale di Ricerca CNR „Paleobenthos - Paleoecologiae Paleobiogeografia delle Comunità Bentoniche“ = Proceedings of the Workshop IGCP 286 „Early Paleogene Benthos Project“*: Trieste, 6-8 giugno 1994, *Quaderno speciale*, 3, 1994; Monfalcone: Museo Geologico Paleontologico di Monfalcone, 1-13.
- PLENIČAR, M., CAFFAU, M. & JURKOVŠEK, B. 1995: Morphologic changes of rudist shell as reflection of the environment at the terminal Cretaceous layers. In: MONTANARI, A. & COCCIONI, R. (eds.): *The role of impacts on the evolution of the atmosphere and biosphere with regard to short- and long-term changes: abstracts and field trips*. Ancona, str. 133.
- SEVER, B., PLENIČAR, M., MLINŠEK, D., KALIGARIČ, M. & GREGORI, J. 1995: Pomurje. V: JAVORNIK, M., VOGLAR, D. & DERMASTIA, A. (ur.): *Enciklopedija Slovenije*. 1. natis. Ljubljana: Mladinska knjiga, 1987-2002, zv. 9: Plo-Ps, 134-135.
- DROBNE, K., OGORELEC, B., BARATTOLO, F., DOLENEC, T., PLENIČAR, M., TURNŠEK, D., ZUCCHI-STOLFA, M.L., MARTON, E. 1995: Stop 1: The Dolenja Vas section (Upper Maastrichtian, Lower and Upper Danian, Thanetian). In: *Atti (Atti del Museo geologico-paleontologico di Monfalcone, Quaderno speciale, 3)*. Monfalcone: Museo geologico paleontologico, 99-115.
- PLENIČAR, M. 1996: Razmišljanja ob izidu knjige „Minerali na Slovenskem“. *Proteus*, 58/7: 317.
- CAFFAU, M. & PLENIČAR, M. 1996: Biometrical analysis on *Biradiolites angulosus* d'Orbigny in the stratigraphic sequence of the Bay of Sistiana (Trieste Karst - Italy) = Biometrične analize *Biradiolites angulosus* d'Orbigny v stratigrafskem zaporedju Sosljanskega zaliva (Tržaški Kras - Italija). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 37: 99-117.
- CAFFAU, M., PUGLIESE, N. & PLENIČAR, M. 1996: The development of the mollusc fauna in the Cenomanian of the stratigraphic sequence of Visogliano/Vižovlje (Trieste Karst, Italy). *Geologija* 37/38, (1994/95): 87-121.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 1996: Patch reef near Senožeče = Grebenska zaplata pri Senožečah. *Razpr. 4. razr. SAZU*, 37, 37-83.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 1997: Eksogire s Tržaško-komenske planote. In: HORVAT, A., FISTER, M. & ZUPANČIČ, N. (eds.): *Povzetki referatov*, 13. Posvetovanje slovenskih geologov, Ljubljana, 4. in 5. april 1997, *Geološki zbornik*, 11. Ljubljana, str. 28.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 1997: Eksogire s Tržaško-komenske planote. In: HORVAT, A. & ZUPANČIČ, N. (eds.): *Razprave poročila*, 13. posvetovanje slovenskih geologov, Ljubljana, 1997, *Geološki zbornik*, 12, 87-99.
- CAFFAU, M., LENAZ, D. & PLENIČAR, M. 1997: Geochemical analyses and systematics of melanistic and non melanistic rudists from Santonian-Campanian of Trieste Karst (Italy) = Geokemične analize in sistematika črno obarvanih in neobarvanih rudistov iz santonijsko-campanijskih plasti Tržaškega krasa (Italija). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 38: 3-31.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 1997: Rudisti iz Lipiške formacije v kamnolomu Lipica I = Rudists from the Lipica Formation in the Lipica I quarry. *Annales*, 11: 115-140.
- CAFFAU, M., PLENIČAR, M., PUGLIESE, N. & DROBNE, K. 1998: Late Maastrichtian Rudists and Microfossils in the Karst Region (NE Italy and Slovenia). *Quatrième Congrès Intern. Sur les Rudistes, Geobios, Mém. Spécial*, 22: 27-46.

- CAFFAU, M., PLENIČAR, M. & OGORELEC, B. 1998: Remarks on the morphological variability of *Biradiolites angulosus* d'Orbigny in a sector of the Trieste Karst (Italy). *Geobios*, 22: 29-36.
- PLENIČAR, M. 1998: Seidlova geološka zbirka - Gimnazija Novo mesto. *Proteus*, 61/4, str. 162.
- BELEC, B., PLENIČAR, M., MARINČEK, L. & ŽEVART, M. 1998: Slovenske gorice. In: JAVORNIK, M., VOGLAR, D. & DERMASTIA, A. (eds.): *Enciklopedija Slovenije*. Ljubljana: Mladinska knjiga, 1987-2002, 12, 16-18.
- HIRNÖK, J., PLENIČAR, M. & KOZAR-MUKIČ, M. 1998: Slovensko Porabje. V: JAVORNIK, M., VOGLAR, D. & DERMASTIA, A. (ur.): *Enciklopedija Slovenije*. Ljubljana: Mladinska knjiga, 1987-2002, 1273-74.
- PLENIČAR, M. 1998: Zgodovina raziskav nafte v Murski kotlini. *Zbornik za zgodovino naravoslovja in tehnike*, 3/14: 77-107.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 1998: Zgornjesantonijski rudisti osrednjega dela Tržaško-komenske planote = The Upper Santonian rudists of the central part of the Trieste-Komen Plateau. *Razpr. 4. razr. SAZU*, 39: 3-53, Tab. 1-11.
- PLENIČAR, M. (intervjuvanec). 1999: Akademik prof. dr. Mario Pleničar: Pol življenja med rudisti: intervju. *Gea*, november, 9/11: 4-5.
- PLENIČAR, M. 1999: *Hippurites conicus adriaticus* Sladić-Trifunović in the Upper Cretaceous calcareous breccia near Rašica (Slovenia) = *Hippurites conicus adriaticus* Sladić-Trifunović v zgornjekredni apnenčevi breči pri Rašici (Slovenija). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 40: 67-75.
- PLENIČAR, M. 1999: *Hippurites conicus adriaticus* Sladić-Trifunović v zgornjekredni apnenčevi breči pri Rašici. V: HORVAT, A. (ur.). *Povzetki referatov*, 14. Posvetovanje slovenskih geologov 25 marec, 1999, *Geološki zbornik*, 14. Ljubljana, 35-36.
- JURKOVŠEK, B., PLENIČAR, M., OGORELEC, B., & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 1999: Palaeogeographic development of the Dinaric carbonate platform in western Slovenia. In: HÖFLING, R. & STEUBER, T. (eds.): *Fifth International Congress on Rudists : abstracts and field trip guides*, Erlanger geologische Abhandlungen, Sonderband, 3: 114-118.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 2000: Rudisti iz cenomanijskih bioherm Hrušice in Nanosa = Rudists from the Cenomanian bioherms of Hrušica and Nanos, Slovenia. *Geologija*, (1999), 42: 69-116.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. & KRIVIC, K. 1999: Rudisti Slovenije = Rudists of Slovenia. Ljubljana: Prirodoslovni muzej Slovenije, zgibanka.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. & KRIVIC, K. 1999: Rudisti Slovenije: samostojna razstava. Prirodoslovni muzej Slovenije, 14.09. - 04.09.2000.
- PLENIČAR, M., JURKOVŠEK, B. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 1999: Stop 1: Cenomanian - Turonian bioherm on Hrušica. In: HÖFLING, R. & STEUBER, T. (eds.): *Fifth International Congress on Rudists: abstracts and field trip guides*, Erlanger geologische Abhandlungen, Sonderband, 3: 118-121.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 1999: Stop 2: The Lipica formation in the Lipica quarry. In: HÖFLING, RICHARD & STEUBER, T. (eds.): *Fifth International Congress on Rudists: abstracts and field trip guides*, Erlanger geologische Abhandlungen, Sonderband, 3: 122-126.
- PAVLOVEC, R. & PLENIČAR, M. 2000: Kako je nastajal Snežnik? V: ČELIGOJ, V. (ur.): *Knjiga o Snežniku*. Ilirska Bistrica: Planinsko društvo Snežnik, 10-13.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 2000: Rudists from the Santonian - Campanian bioherm near the spring of the Lijak brook (SW Slovenia) = Rudisti iz santonijsko - campanijske bioherme pri izviru potoka Lijak (JZ Slovenija). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 41/1: 51-79.
- PLENIČAR, M., JURKOVŠEK, B. & BUSER, S. 2001: Preložena rudistna favna v paleocenskem flišu Anhovega. V: HORVAT, A. (ur.): *Povzetki referatov*, *Geološki zbornik*, 16: 72-73.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 2001: Rudisti Javornikov = Rudists of the Javorniki Mountains (SW Slovenia). *Razpr. 4. razr. SAZU*, 42/1: 103-161.
- PAVŠIČ, J., PLENIČAR, M., STRMOLE, D., POHAR, V., KRALJ, P. & LEDER, Z. 2002: *Geološki terminološki slovar*. V: HORVAT, A. et al. (ur.): *Knjiga povzetkov*, 1. slovenski geološki kongres, Črna na Koroškem, 9.-11. oktober 2002. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 68-69.
- PLENIČAR, M. 2004: *Geologija*. In: ZYCH, B. et al. (eds.): *Narava Slovenije*. Ljubljana: Mladinska knjiga in Slovenska matica, 15-43.
- CAFFAU, M. & PLENIČAR, M. 2004: Rudist and foraminifer assemblages in the Santonian-Campanian sequence of Nanos Mountain (Western Slovenia) = Rudistne in foraminiferne združbe v santonijsko-campanijskih plasteh Nanosa (Zahodna Slovenija). *Geologija*, 47/1: 41-54.

- PAVŠIČ, J., PLENIČAR, M., STRMOLE, D., POHAR, V., KRALJ, P. & LEDER, Z. 2005: Geološki terminološki slovar. In: HORVAT, A. (ed.): 17. posvetovanje slovenskih geologov = 17th Meeting of Slovenian Geologists, Ljubljana, april 2005, Geološki zbornik, 18, 90.
- PLENIČAR, M. 2005: Kopna območja v geološki zgodovini planeta Zemlje. Društvene novice, 33: 9-13.
- PLENIČAR, M. 2005: Upper Cretaceous rudists in Slovenia = Zgornjekredni rudisti v Sloveniji. Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Dela, 39, 1- 255, Pl. 1-106.
- PLENIČAR, M., STRMOLE, D., KRALJ, P., POHAR, V. & PAVŠIČ, J. (ur.) 2006: Geološki terminološki slovar, Zbirka Slovarji. Ljubljana: Založba ZRC, ZRC SAZU, 331 str.
- PLENIČAR, M. (intervjuvanec) 2003: Še vedno živo zanimanje za minerale in fosile: akademik prof. dr. Mario Pleničar, geolog/paleontolog. V: KOBAL, E. (ur.): Strast po znanju in spoznavanju : pogovori z velikimi slovenskimi znanstvenicami in znanstveniki. Ljubljana: Ustanova Slovenska znanstvena fundacija, 2, 160-165.
- PLENIČAR, M. 2008: Paleogeografske rudistne podprovince Tetide v zgornji kredi v Sloveniji = The Upper Cretaceous paleogeographical rudist subprovinces of the Tethys in Slovenia. Geologija, 51/2: 153-159.
- PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.) 2009: Geologija Slovenije = The geology of Slovenia. Geološki zavod Slovenije, (2011) XI + 612.
- VRABEC, M., ŠMUC, A., PLENIČAR, M. & BUSER, S. 2009: Geološki razvoj Slovenije - Povzetek = Geological evolution of Slovenia - An Overview. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): Geologija Slovenije = The geology of Slovenia. Geološki zavod Slovenije, 23-40.
- PLENIČAR, M. 2009: Kreda = Cretaceous. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): Geologija Slovenije = The geology of Slovenia. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 255-302.
- PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. 2009: Napoved izida monografije Geologija Slovenije. V: HORVAT, A. (ur.): 19. posvetovanje slovenskih geologov = 19th Meeting of Slovenian Geologists, Ljubljana, marec 2009, Geološki zbornik, 20, 125-126.
- PLENIČAR, M. & JURKOVŠEK, B. 2009: Pseudopolyconites slovenicus n.sp. resedimented to Paleocene flysch breccia of the Soča river valley (Slovenia) = Pseudopolyconites slovenicus n.sp. presedimentiran v paleocensko flišno brečo Posočja. Geologija, 52/1: 29-32.
- DOZET, S. & PLENIČAR, M. 2009: Splošni uvod v mezozoik = Introduction to the Mesozoic. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): Geologija Slovenije = The geology of Slovenia, Geološki zavod Slovenije, 157-160.
- PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. 2009: Uvod = Introduction. In: PLENIČAR, M., OGORELEC, B. & NOVAK, M. (eds.): Geologija Slovenije = The geology of Slovenia. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 3-20.
- PLENIČAR, M., STRMOLE, D., KRALJ, P., POHAR, V., PAVŠIČ, J. & LEDER, Z. (ur.) 2013: Geološki terminološki slovar, Zbirka Terminologišče. Založba ZRC, ZRC SAZU.

Zbral in uredil: Jernej Pavšič

V spomin prof. dr. Danilu Ravniku



Dne 14. oktobra 2016 je v 94. letu starosti umrl eden od utemeljiteljev geofizike v Sloveniji prof. dr. Danilo Ravnik. Rodil se je leta 1923 v Kranju. Po gimnaziji je študiral rudarstvo na Tehnični visoki šoli Univerze v Ljubljani, kjer je diplomiral leta 1954, za doktorja znanosti pa je bil promoviran leta 1988 na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo z disertacijo *Osnovne količine toplotnega toka v geotermiji*. Večino svoje bogate strokovne poti do upokojitve leta 1991 je bil zaposlen na Oddelku za geofiziko Geološkega zavoda Ljubljana, nekaj časa tudi kot njegov vodja, po vrnitvi iz tujine leta 1976 pa kot znanstveni svetnik. Med leti 1968 in 1976 je delal kot strokovnjak Združenih narodov pri geofizikalnih raziskavah v Aziji, Afriki in Južni Ameriki. Strokovno se je izpopolnjeval v Franciji, na Švedskem in na Nizozemskem.

Svoje bogato znanje je med leti 1976 in 1999 skoraj 24 let prenašal na študente geologije, rudarstva in geotehnologije na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, pozneje Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani, kjer je predaval predmet Uporabna geofizika. Za

izrednega profesorja je bil izvoljen leta 1989. V tem obdobju je bil mentor pri diplomskih, magistrskih in doktorskih delih praktično vsem danes dejavnim slovenskim geofizikom srednje generacije. Leta 2007 je v soavtorstvu izdal univerzitetni učbenik Uporabna geofizika, ki je prvo takšno delo v slovenščini, in zato pomembno tudi za razvoj slovenske geofizikalne terminologije.

Občudovanja vredna je širina delovanja profesorja Ravnika v splošni in uporabni geofiziki. Na začetku svoje strokovne poti je v prakso uvedel raziskave z geoelektričnimi metodami. Prve meritve je izvedel v okolici Kranja že leta 1953, nato pa znanje hitro nadgrajeval, saj imamo ohranjena poročila o geoelektričnih raziskavah iz obdobja 1955-57 na območju Maribora – Pobrežja ter s Planinskega in Cerkniskega polja. Preiskave z geoelektričnim upornostnim sondiranjem je s časom dvignil na zavidljivo raven v mednarodnem merilu. Kasneje je vodil tudi raziskave z metodo električnega lastnega potenciala in sodeloval pri elektromagnetnih meritvah. Z geoelektričnimi raziskavami je sodeloval pri številnih študijah za podzemno skladiščenje plina, pri raziskavah za zajem pitne in termalne vode, pri raziskavah na kraških območjih in drugod. Posebnost so bila nekatera zelo globoka geoelektrična sondiranja, ki so zahtevala razmik tokovnih merskih elektrod tudi prek 10 km. Bil je tudi pobudnik izdelave domačega merilnega sistema za globoko geoelektrično sondiranje.

Pozneje se je posvetil predvsem geotermičnim raziskavam in imel pomembno vlogo v številnih aplikativnih študijah, katerih rezultat je bil uspešen zajem tople vode v Krški kotlini, Mariboru, Zrečah, Murski depresiji, Ljubljanski kotlini in v Kočanih v Makedoniji. Posebnost geotermičnih raziskav na Kočanskem polju, ki jih je vodil v letih 1977-1982, je bila izvedba temperaturnih meritev v kar 720 plitvih vrtnah, kar je omogočilo omejitve geotermalno perspektivnega območja in aktivne prelomne cone. Težišče njegovega kasnejšega dela pa je bila izdelava geotermičnih kart Slovenije, ki kažejo porazdelitev temperature v različnih globinah in gostoto toplotnega toka. To delo je zahtevalo tudi razvoj ustreznih raziskovalnih metod, med drugim je bil pobudnik izdelave merilnika toplotne prevodnosti kamnin z izboljšano metodo grelnih žic. Posebno se je poglobil v pravilno tolmačenje temperaturnih podatkov iz meritev v toplotno nestabiliziranih vrtnah in zasnoval obsežno bazo geotermičnih podatkov Slovenije. S podatki za Slovenijo je sodeloval pri Geotermalnem atlasu Evrope (1992) in pri Atlasu geotermalnih virov Evrope (2002), pri prvem tudi kot koordinator za celotno nekdanjo Jugoslavijo.

Poleg geoelektričnih in geotermičnih raziskav je koordiniral tudi gravimetrične in magnetometrične raziskave v Sloveniji, predvsem v okviru raziskav za nafto in plin ter za izbor primernih lokacij za podzemno skladiščenje plina v vodonosnikih. Bogat je tudi njegov prispevek na področju inženirske geofizike, geofizikalnih raziskav v okviru hidrogeoloških študij in pri raziskavah nahajališč mineralnih surovin. Sodeloval je pri konstrukciji električnega inklinometra za meritve odklonov vrtn, različnih termometrov za uporabo v vrtnah in pri drugih geofizikalnih karotažnih meritvah. Z njemu lastno natančnostjo je osnoval bazo podatkov vseh geofizikalnih raziskav v Sloveniji, ki jo v nadgrajeni obliki uporabljamo še danes. Svojo širino je izkazoval tudi v sodelovanju s strokovnjaki zelo različnih profilov.

Njegove raziskave so opazili tudi v svetu, zato so ga leta 1968 Združeni narodi (UNDP) povabili k sodelovanju pri raziskavah za pitno vodo v aridnih območjih Afganistana, Mavretanije in Bolivije, kjer je osem let vodil geoelektrične raziskave. Tudi z Geološkim zavodom je deloval v tujini in sicer v Etiopiji in Tuniziji ter v večini republik nekdanje Jugoslavije.

Profesor Ravnik je zapustil bogato bibliografijo znanstvenih in strokovnih del v domači in tuji literaturi, poleg tega pa je skrbel tudi za popularizacijo geofizike s poljudnimi članki, predvsem v reviji *Proteus*. Leta 1965 je z Mariom Pleničarjem izdal knjigo *Geologija in človek*. Od leta 1994 je bil član uredniškega odbora *Geologije* in od leta 2013 njegov častni član. Za svoje dolgoletno strokovno, raziskovalno in pedagoško delo je prejel več priznanj, med drugimi plaketo Geološkega zavoda Ljubljana, Lipoldovo medaljo za življenjsko delo na področju geologije in častno članstvo Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Bil je tudi član najpomembnejših mednarodnih strokovnih geofizikalnih združenj EAGE (European Association of Geoscientists & Engineers) in SEG (Society of Exploration Geophysicists) ter mednarodnega geotermalnega združenja IGA (International Geothermal Association).

Profesor Ravnik se je v svojem strokovnem in pedagoškem delu odlikoval s predanostjo poklicu in iskanju poglobljenih rešitev problemov. Površnosti in nestrokovnosti ni nikoli maral. Niti fizični napori pri terenskih meritvah niti dodatne ure dela v kabinetu mu niso bili nikoli odveč. Občudovanja vredna je bila njegova široka razgledanost, ki jo je črpal predvsem iz svoje izjemno bogate knjižnice, ki je bila vedno dostopna tudi njegovim sodelavcem in študentom. Tudi po upokojitvi je bil še dolgo poln energije in dejaven na strokovnem področju kot pisec, mentor in recenzent. Pogosto je še prišel na Geološki zavod ali fakulteto spremljat naše delo in svetovat pri razvoju geofizikalne stroke ter nam nakazal rešitev ali dal kakšno iskrivo idejo. Ob nespornih strokovnih pa je v sebi združeval tudi človeške kvalitete kot so poštenost, požrtvovalnost, nesebičnost in toplina, kar smo njegovi sodelavci še posebej cenili. Spominjali se ga bomo z vsem spoštovanjem.

Marjeta Car, Andrej Gosar, Dušan Rajver & Robert Stopar

Prof. dr. Danilo Ravnik - pomembnejša objavljena dela

- RAVNIK, D. 1961: Geoelektrična ispitivanja u Velenjskom ugljenom basenu. Savetovanje o primenjenoj geofizici. Savez Inženjera i Tehničara Rudarske, Geološke i Metalurške Struke Jugoslavije i Savet za Geološka Istraživanja Savezne Industrijske Komore. Beograd: 13 p.
- RAVNIK, D. 1965: Geoelektrične raziskave na Ljubljanskem barju = Geoelectric exploration of the Ljubljana moor. *Geologija*, 8: 80-91.
- PLENIČAR, M. & RAVNIK, D. 1965: *Geologija in človek. Življenje in tehnika*, Ljubljana: 141 p.
- RAVNIK, D. 1970: Afganistan - dežela karakula in lapisa. *Proteus*, 33/1: 13-20.
- RAVNIK, D. 1970: Afganistan - dežela karakula in lapisa. *Proteus*, 33/2: 73-79.
- RAVNIK, D. 1970: Afganistan - dežela karakula in lapisa. *Proteus*, 33/3: 108-115.
- RAVNIK, D. 1974: Na južnoameriški »Strehi sveta« = On the South-America »Roof of the World«. *Geologija*, 17: 554-555.
- RAVNIK, D. 1975: Električno sondiranje vzdolž trase avtomobilske ceste prek Ljubljanskega barja = Resistivity sounding survey along the route of the motorway across the Ljubljansko Barje. *Geologija*, 18: 325-338.
- RAVNIK, D. 1976: Kameninska podlaga Planinskega polja = Bedrock of the Planina Polje. *Geologija*, 19: 291-315.
- RAVNIK, D. 1979: Uporabna geofizika za rudarje in geologe. Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Ljubljana: 290 str.
- RAVNIK, D., VERBOVŠEK, R., PREMUR, U., 1982: Gostota Zemljinega toplotnega toka v konjiški udorini = Heat flow density in the fault basin of Konjice. *Geologija*, 25/2: 327-334.
- HINTERLECHNER-RAVNIK, A. & RAVNIK, D. 1986: Zgradba Zemlje, njena dinamika in kamenine plašča na Slovenskem. 1. Zgradba Zemlje. *Proteus*, 49/1 (1986-1987): 34-40.
- HINTERLECHNER-RAVNIK, A. & RAVNIK, D. 1986: Zgradba Zemlje, njena dinamika in kamenine plašča na Slovenskem. 2. Tektonika plošč. *Proteus*, 49/3 (1986-1987): 106-111.
- RAVNIK, D. 1986: Zemljina toplota v geologiji in energetiki. *Proteus*, 48/ 9-10: 323-331.
- HINTERLECHNER-RAVNIK, A. & RAVNIK, D. 1987: Zgradba Zemlje, njena dinamika in kamenine plašča na Slovenskem. 3. Metamorfoza in nastajanje magme. *Proteus*, 49/5 (1986-1987): 193-197.

- HINTERLECHNER-RAVNIK, A. & RAVNIK, D. 1987: Zgradba Zemlje, njena dinamika in kamenine plašča na Slovenskem. 4. Kamenine plašča na Slovenskem. *Proteus*, 49/7 (1986-1987): 266-270.
- RAVNIK, D. 1987: Formacijska temperatura in gostota Zemljinega toplotnega toka ter njuna odvisnost od gibanja podzemne vode. V: JANČIČ, T. (ed.): Problematika istraživanja resursa geotermalne energije sa posebnim osvrtom na mesto i ulogu geofizičkih metoda ispitivanja. Komitet za geofiziku SITRGMJ. Savetovanje, 63-82, Niška Banja.
- RAVNIK, D. 1988: Osnovne količine toplotnega toka v geotermiji. Doktorska disertacija. FNT, Univerza v Ljubljani, Ljubljana: 253 p.
- RAVNIK, D. & RAJVER, D. 1988: Geotermalne značilnosti ozemlja med Zrečami in Slov. Konjicami na obrobju Panonskega bazena. V: Inženirska geofizika v gradbeništву, rudarstvu in sorodnih dejavnostih: posvetovanje. Bled: 355-365.
- RAVNIK, D. 1989: Geotermalna energija prihodnosti. *Življenje in tehnika*, 49/2: 25-28.
- RAVNIK, D. 1991: Globoko znanstveno vrtanje v zemljino skorjo. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 38/3: 369-384.
- RAVNIK, D. 1991: Geotermične raziskave v Sloveniji = Geothermal investigations in Slovenia. *Geologija*, 34: 265-303.
- RAVNIK, D., KOLBAH, S., JELIČ, K., MILIVOJEVIĆ, M., MIOŠIĆ, N., TONIĆ, S., RAJVER, D. 1992: Yugoslavia. In: HURTIG, E., ČERMÁK, V., HAENEL, R. & ZUI, V. (eds.): *Geothermal atlas of Europe*. Hermann Haack VmbH, Gotha, str. 102-105, 152-153.
- RAVNIK, D., RAJVER, D., ŽLEBNIK, L. & KRALJ, P. 1992: Geološke strukture: viri termalnih in mineralnih vod v Sloveniji = Geological structures: resources of thermal and mineral waters in Slovenia. V: KRALJ, P. (ur.): *Mineralne in termalne vode v gospodarstvu in znanosti Slovenije = Mineral and thermal waters in economy and science of Slovenia : III. posvet, meeting*. Ljubljana: Geološki zavod Ljubljana, Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, 9-32.
- PAVŠIČ, J., DOLENEC, T., RAVNIK, D. & OGORELEC, B. 1992: Pregled stanja temeljnih geoloških raziskav v Sloveniji ter primerjava s stanjem v drugih razvitih državah. V: BAJŽELJ, U. (ur.): *Raziskovalno polje Geologija in rudarstvo, strateška konferenca*, 13. 05. 1992, Brdo pri Kranju: 14-18.
- LUKACS, E., FAJFAR, P., KOGOVŠEK, B., PETROVSKI, D., PLACER, L., PLENIČAR, M., PRELOGOVIĆ, E., RAVNIK, D., RIBARIČ, V. & VIDIC, F. 1992: Analiza naravnih danosti lokacije in uporabljenih seizmičnih parametrov NE Krško. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 39/3-4: 313-331.
- DOZET, S., RAVNIK, D. & STOJANOVIĆ, B. 1994: Rudnica anticline and its underground gas storage capabilities. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 41/1-2: 3-12.
- RAVNIK, D., RAJVER, D., POLJAK, M. & ŽIVČIČ, 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.
- RAJVER, D., RAVNIK, D., ŽLEBNIK, L. & ČEBULJ, A. 1995: Utilization of geothermal energy in Slovenia. In: BARBIER, E. et al., (eds.): *Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, 18-31 May 1995*. Auckland: International Geothermal Association, 1: 321-326.
- RAVNIK, D., STOPAR, R., CAR, M., ŽIVANOVIĆ, M., GOSAR, A., RAJVER, D. & ANDJELOV, M. 1995: Rezultati raziskav uporabne geofizike v Sloveniji. V: LAPAJNE, J. (ur.): *Zgodovina slovenske geodezije in geofizike: zbornik predavanj*. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava Republike Slovenije za geofiziko, 1. del, 49-67.
- RAVNIK, D. & RAJVER, D. 1998: The use of inverse geotherms for determining underground water flow at the Ombla karst spring near Dubrovnik, Croatia. *Journal of applied geophysics*, 39/3: 177-190.
- RAJVER, D. & RAVNIK, D. 2001: Geotermalne značilnosti Krške kotline na osnovi geofizikalnih raziskav. V: VODOPIVEC, F. (ur.): *Raziskave s področja geodezije in geofizike, zbornik predavanj*. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za geodezijo, Ljubljana: 95-105.
- 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](https://doi.org/10.5474/geologija.2002.058).
- RAJVER, D., RAVNIK, D., PREMUR, U., MIOČ, P. & KRALJ, P. 2002: Slovenia. In: HURTER, S. & HAENEL, R. (eds.): *Atlas of Geothermal Resources in Europe*. European Commission. Office for Official Publications of the European Communities. Research Directorate-General, Publ. No.17811, Luxembourg, 92 p., 89 plates, 54-56.

- RAJVER, D. & RAVNIK, D. 2003: Geothermal characteristics of the Krško basin, Slovenia, based on geophysical research. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 9/11: 443-455, [doi: 10.1016/S1474-7065\(03\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00064-0)
- RAJVER, D. & RAVNIK, D. 2003: Novi atlas geotermalnih virov v Evropi = New atlas of geothermal resources in Europe. *Geologija*, 46/2: 445-450.
- GOSAR, A. & RAVNIK, D. 2007: Uporabna geofizika. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 218 p.

Navodila avtorjem

GEOLOGIJA objavlja znanstvene in strokovne članke s področja geologije in sorodnih ved. Revija od leta 2000 izhaja dvakrat letno. Članke recenzirajo domači in tuji strokovnjaki z obravnavanega področja. Ob oddaji člankov avtorji predlagajo **tri recenzente**, vendar pa si uredništvo pridržuje pravico do izbire recenzentov po lastni presoji. Avtorji morajo članek popraviti v skladu z recenzentskimi pripombami ali utemeljiti zakaj se z njimi ne strinjajo.

Avtorstvo: Za izvirnost podatkov, predvsem pa mnenj, idej, sklepov in citirano literaturo so odgovorni avtorji. Z objavo v GEOLOGIJI se tudi obvežejo, da ne bodo drugje objavili prispevka z isto vsebino.

Jezik: Članki naj bodo napisani v angleškem, izjemoma 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 preveri. 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 povzemanja, analiziranja, evalviranja ali sintetiziranja informacij, 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 tablam 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 paleogenske kamnine 1: 50.000 = Geological map of the southern part of the Trieste-Komen plateau – Cretaceous and Paleogene carbonate rocks. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 143 p., incl. Pls. 23, 1 geol. map.

Primer citiranja poglavja iz knjige:

TURNŠEK, D. & DROBNE, K. 1998: Paleocene corals from the northern Adriatic platform. In: HOTTINGER, L. & DROBNE, K. (eds.): *Paleogene Shallow Benthos of the Tethys*. Dela SAZU, IV. Razreda, 34/2: 129–154, incl. 10 Pls.

Primer citiranja virov z medmrežja:

Če sta znana avtor in naslov citirane enote zapišemo:

ČARMAN, M. 2009: Priporočila lastnikom objektov, zgrajenih na nestabilnih območjih. Internet: http://www.geo-zs.si/UserFiles/1/File/Nasveti_lastnikom_objektov_na_nestabilnih_tleh.pdf (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 izjemoma 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. Table pripravite v formatu zrcala naše revije.

Če je članek napisan v slovenskem jeziku mora imeti celotno besedilo, ki je na slikah in tabelah tudi v angleškem jeziku. Podnaslovi naj bodo čim krajši.

Korekture: Te opravijo avtorji člankov, ki pa lahko popravijo samo tiskarske napake. Krajši dodatki ali spremembe pri korekturah so možne samo na avtorjeve stroške.

Prispevki so prosto dostopni na spletnem mestu: <http://www.geologija-revija.si/>

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

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 peer-reviewed 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 a review 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 organized according to the following scheme:

- Title (maximum 12 words)
- Authors (full name and family name, postal address and e-mail address)
- Key words (maximum 7 words)
- Abstract (maximum 300 words)
- Text
- References
- Figure and Table Captions
- Tables, Figures, Plates

References: References should be cited in the text as follows: (FLÜGEL, 2004) for a single author, (PLENIČAR & BUSER, 1967) for two authors and (MLAKAR et al., 1992) for multiple authors. Pages and figures should be cited as follows: (PLENIČAR, 1993, p. 67) and (PLENIČAR, 1993, fig. 1). Anonymous internet resources should be cited as (INTERNET 1). Only published references should be cited. Manuscripts should be cited only in some special cases in which it also has to be stated where they are kept. Cited reference list should include

only publications that are mentioned in the paper. Authors should be listed alphabetically. Journal titles should be given in standard abbreviated form. A doi identifier, if there is any, should be placed at the end as shown in the first case.

Taxonomic names should be in italics, while names of the authors of taxonomic names should be in normal, such as *Clypeaster pyramidalis* Michelin, *Galeanella tollmanni* (Kristan), Echinoidea.

Articles should be listed as follows:

MALI, N., URBANC, J. & LEIS, A. 2007: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. Environ. geol., 51/8: 1401–1412, doi:10.1007/s00254-006-0437-4.

PLENIČAR, M. 1993: *Apricardia pachiniana* Sirna from lower part of Liburnian beds at Divača (Triest-Komen Plateau). Geologija, 35: 65–68.

Books should be listed as follows:

FLÜGEL, E. 2004: Mikrofacies of Carbonate Rocks. Springer Verlag, Berlin: 976 p.

JURKOVŠEK, B., TOMAN, M., OGORELEC, B., ŠRIBAR, L., DROBNE, K., POLJAK, M. & ŠRIBAR, Lj. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote – Kredne in paleogenske kamnine 1: 50.000 = Geological map of the southern part of the Trieste-Komen plateau – Cretaceous and Paleogene carbonate rocks. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 143 p., incl. Pls. 23, 1 geol. map.

Book chapters should be listed as follows:

TURNŠEK, D. & DROBNE, K. 1998: Paleocene corals from the northern Adriatic platform. In: HOTTINGER, L. & DROBNE, K. (eds.): Paleogene Shallow Benthos of the Tethys. Dela SAZU, IV. Razreda, 34/2: 129–154, incl. 10 Pls.

Internet resources should be listed as follows:

Known author and title:

ČARMAN, M. 2009: Priporočila lastnikom objektov, zgrajenih na nestabilnih območjih. Internet: http://www.geo-zs.si/UserFiles/1/File/Nasveti_lastnikom_objektov_na_nestabilnih_tleh.pdf (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.

Geologija is an open access journal, all pdfs can be downloaded from the website: <http://www.geologija-revija.si/en/>

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

- 129 Poljak, M., Mikuž, V., Trajanova, M., Hajek-Tadesse, V., Miknić, M., Jurkovšek, B. & Šoster, A.
Badenijske in sarmatijske plasti v gradbeni jami za hidroelektrarno Brežice
- 155 Gabor, L. & Rman, N.
Mofete v Slovenskih goricah
- 179 Kanduč, T., Samardžija, Z., Mori, N., Jerebic, A., Levačič, I., Kračun, M., Robinson, J.A., Žigon, S.,
Blažeka, Ž. & Kocman, D.
Hydrogeochemical and isotopic characterization of Pesnica River, Slovenia
- 193 Serianz, L.
Tri-dimensional Model of the Radovna Glacier from the Last Glacial Period
- 205 Andjelov, M., Frantar, P., Mikulič, Z., Pavlič, U., Savič, V., Souvent, P. & Uhan, J.
Ocena količinskega stanja podzemnih voda za Načrt upravljanja voda 2015-2021 v Sloveniji
- 221 Janža, M., Šram, D., Mezga, K., Andjelov, M. & Uhan, J.
Ocena potrebnih količin podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov in doseganje dobrega ekološkega
stanja površinskih voda
- 233 Horvat, A.
Distephanopsis concavus Horvat: a revised silicoflagellate species from the Middle Miocene
of the Central Paratethys
- 243 Žibret, L.
A contribution to better understanding of structural characteristics and tectonic phases of the Boč region,
Periadriatic Fault Zone
- 259 Jemec Auflič, M., Šinigoj, J., Krivic, M., Podboj, M., Peternel, T. & Komac, M.
Landslide prediction system for rainfall induced landslides in Slovenia (Masprem)
- 273 Mohorič, N., Grigillo, D., Jemec Auflič, M., Mikoš, M. & Celarc, B.
Longitudinal profiles of torrential channels in the Western Karavanke mountains