



6.SLOVENSKI  
GEOLOŠKI  
KONGRES

# KNJIGA EKSKURZIJ

## FIELD TRIP BOOK

“Vedeti (ne)vidno – vloga geologije v naši družbi,”

3.-5. OKTOBER 2022  
Rogaška Slatina



# FIELD TRIP BOOK

“Making groundwater in the Danube region visible,,

5-7 OCTOBER 2022  
Rogaška Slatina, Slovenia



**6. Slovenski geološki kongres /**

**Vedeti (ne)vidno – vloga geologije v naši družbi**

Rogaška Slatina, 3.-5. oktober 2022

**5<sup>th</sup> IAH CEG conference /**

**Making groundwater in the Danube region visible**

Rogaška Slatina, Slovenia, 5-7 October 2022

**Knjiga ekskurzij/Field trip book**

Elektronska izdaja/Electronic edition

© 2022, Slovensko geološko društvo in/and Slovenian Committee of International Association of Hydrogeologists (SKIAH), Ljubljana

<https://www.geo-zs.si/6SGK2022/>

<https://www.geo-zs.si/IAHCEG2022/>

**Odgovorni urednik/Chief editor:** Luka Serianz

**Uredniki/Editors:** Luka Serianz, Branka Bračič Železnik, Petra Žvab Rožič

**Grafično in tehnično oblikovanje/Graphic and technical design:**

Polonadesign – Polona Šterk Košir, Alenka Šterk

**Zasnova grafične podobe/Graphic design concept:**

Eneja Kocjančič, Ivana Katarina Milinkovič, Nina Vene

(v okviru predmeta Načrtovanje pisav, študijska smer Grafične in interaktivne komunikacije, študijsko leto 2020/2021, mentorja Nace Pušnik, Gregor Franken)

**Izdajatelj in založnik/Issued and published by:**

Slovensko geološko društvo in Društvo slovenski komite mednarodnega združenja hidrogeologov (SKIAH)/Slovenian geological society and Slovenian Committee of International Association of Hydrogeologists (SKIAH)

**Za založnika/Represented by:** Branka Bračič Železnik in/and Mihael Brenčič

**Jezikovni pregled/Copy editing:** Rok Janežič in/and Jeff Bickert

*Za vsebino prispevkov so odgovorni avtorji./Authors are responsible for the content of the abstracts.*

**Organizatorja kongresa/Congress organisers:**

Slovensko geološko društvo in Društvo slovenski komite mednarodnega združenja hidrogeologov (SKIAH)



**Organizacijski odbor/Organizing committee:**

Branka Bračič Železnik, Mihael Brenčič, Barbara Čenčur Curk,  
Tea Hočevar, Klara Nagode, Urška Pavlič, Nina Rman,  
Luka Serianz, Martin Tilen Tancar, Anja Torkar, Petra Žvab Rožič

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

[COBISS.SI-ID 130883843](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:si:coibiss-130883843)

ISBN 978-961-95928-3-0 (Slovensko geološko društvo, PDF)

## Vsebina/Content

<b>Pohorski ekstenzijski kompleks – ekshumacija, tektonika, magmatizem in sedimentacija. . . . .</b>	<b>2</b>
--	----------

Marko Vrabc, Nina Zupančič

<b>Litostratigrafske formacije med Rogaško Slatino in Bočem ter geološka pot v Kozjanskem krajinskem parku . . .</b>	<b>8</b>
--	----------

Polona Kralj, Kristina Ivančič, Matevž Novak, Nina Valand, Aleša Uršič Arko, Mojca Kunst

<b>Gradnja vzhodne cevi karavanškega cestnega predora. . . . .</b>	<b>24</b>
--	-----------

Andrej Ločniškar, Erazem Dolžan, Julija Fux, Jože Ratej, Anže Markelj

<b>Upravljanje ranljivih teles podzemne vode na primeru Dravskega polja. . . . .</b>	<b>32</b>
--	-----------

Janko Urbanc, Nina Mali, Sonja Cerar

<b>Mineral and thermal waters in the Sotla region (Rogaška Slatina, Podčetrtek), heat-pump technology, and “beer” water in the Savinjska valley. . . . .</b>	<b>40</b>
--	-----------

Nina Rman, Andrej Lapanje, Simona Adrinek, Dušan Rajver

<b>Hydrogeological features of the Dolenjska karst . . . . .</b>	<b>51</b>
--	-----------

Luka Serianz, Mihael Brenčič, Mitja Prelovšek

<b>Managing vulnerable groundwater bodies: Case Dravsko polje. . . . .</b>	<b>61</b>
--	-----------

Janko Urbanc, Nina Mali, Sonja Cerar

**6. Slovenski geološki kongres**

3.-5. oktober 2022, Rogaška Slatina

**“Vedeti (ne)vidno – vloga geologije v naši družbi „**

**KNJIGA EKSKURZIJ**

FIELD TRIP BOOK



## Pohorski ekstenzijski kompleks – ekshumacija, tektonika, magmatizem in sedimentacija

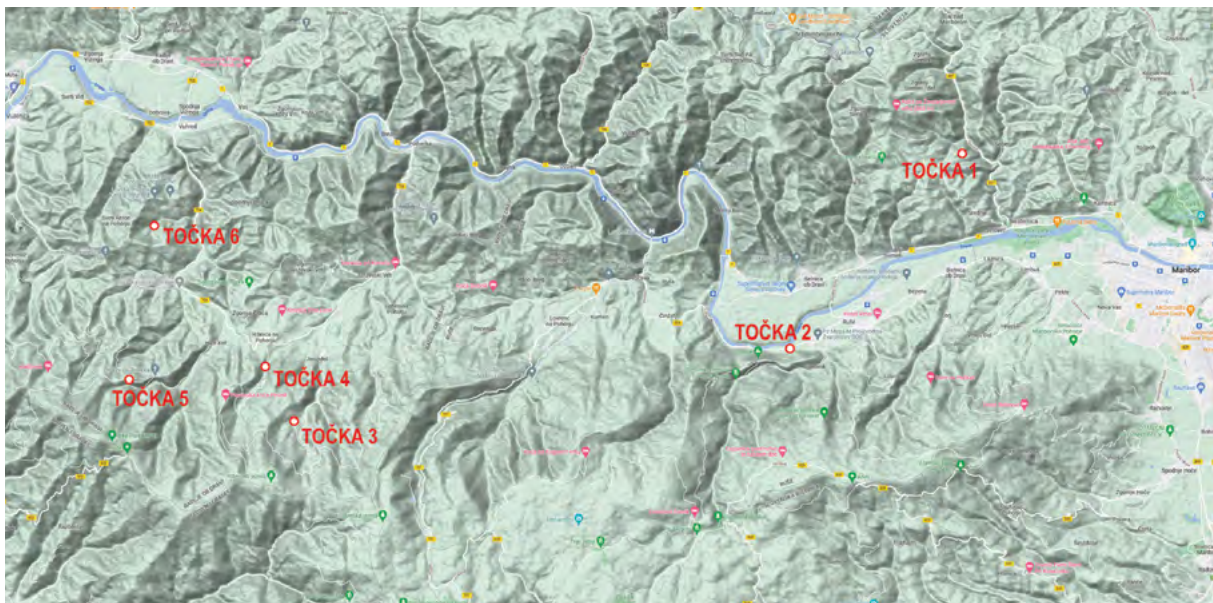
Vodji/Guided by: Marko Vrabec, Nina Zupančič

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana (marko.vrabec@ntf.uni-lj.si, nina.zupancic@ntf.uni-lj.si)

### Uvod

Pohorje je slovenskim geologom in širši javnosti poznano predvsem kot nahajališče metamornih kamnin in naše največje magmatske intruzije, pohorskega granodioritnega telesa. Ta ekskurzija (Slika 1) želi Pohorje predstaviti z novega vidika – kot ekstenzijski kompleks (klasični »metamorphic core complex«), ki tektonsko pripada najzahodnejšim delom Panonskega bazena, ekshumiranim v spodnjem do srednjem miocenu. Na območju Pohorja in Kozjaka izdaja glavna ločilna ploskev tega sistema, ki je položen normalni

prelom, ob katerem je bila krovina kompleksa premaknjena več kot 100 km proti vzhodu in jo danes najdemo v Transdanubijskem pogorju na Madžarskem. Raztezanje ozemlja je spremljala sedimentacija srednjemiocenskih sinriftnih klastičnih sedimentov v novonastalih tektonskih jarkih, katerih ostanke najdemo predvsem na severnem robu Pohorja in na Kozjaku. S tektonskim raztezanjem povezano hitro dvigovanje skorje v podlagi kompleksa je najverjetneje povzročilo tudi pohorski miocenski magmatizem.



Slika 1: Zemljevid trase ekskurzije. Topografska podlaga: Google Maps.

## Geološka zgradba

Pohorski masiv z okolico pripada tektonski enoti Vzhodnih Alp, ki jo v tem delu gradijo Avstroalpski narivni pokrovi. Ti pokrovi paleogeografsko izvirajo iz Jadranske mikroplošče in so bili najprej v kredni, potem pa še v terciarni fazi alpske orogeneze narinjeni preko enot Peninskega oceana in evropskega kontinenta. Po razdelitvi, ki je uveljavljena v mednarodni alpski literaturi, strukturno najnižji del Pohorja in Kozjaka gradi narivna enota Koralmpe-Wölz, ki jo sestavljajo gnajsi, blestniki, amfibolit in druge visokometamorfne kamnine. Ta enota je v kredni orogenezi dosegla stopnjo visoko- do ultravisokotlačnega metamorfizma, kar interpretiramo kot posledico intrakontinentalne subdukcije. Nanjo so narinjene nizko- do zelo šibko metamorfizirane kamnine Štalenskogorske serije, ki pripadajo avstroalpskemu narivnemu pokrovu Drauzug-Gurktal. Strukturno najvišje ležijo nemetamorfizirane permotriasne sedimentne kamnine, ki pripadajo tektonski enoti Transdanubijskih nizov in ki so po sodobni interpretaciji prav tako v narivnem stiku s svojo podlago. Kamnine te enote so na Pohorju in Kozjaku prisotne le v obliki manjših erozijskih krp. Objavljene datacije narivanja postavljajo v obdobje krede (100–70 Ma), se pravi v prvo (eoalpidsko) fazo alpske orogeneze. Narivanju sta sledila ekstenzijski kolaps orogena v zgornji kredi in reaktivacija narivnih ploskev v položne normalne prelome, pri čemer so nastali manjši sedimentni bazeni, v katerih so se odlagale Gosauske plasti, ki so tudi prisotne na Pohorju.

V metamorfne kamnine Pohorja je vtisnjen Pohorski magmatski kompleks granodioritne do tonalitne sestave, ki je dolg okoli 30 km ter širok med 4 in 8 km. Geometrija intruzije iz podatkov površinskega kartiranja ni povsem jasna, vendar pa detaljno kartiranje jugovzhodnega dela nakazuje bolj obliko lakolita kot batolita. Barometrični podatki, pridobljeni iz kristalne kemije rogovače, kažejo, da je vzhodni del intruzije kristalil v znatno večji globini (do 20 km) kot zahodni (pod 10 km), iz česar sledi, da je

bila intruzija po nastanku rotirana iz prvotno bolj strme v današnjo položno orientacijo. Temu pritrjuje tudi pojavljanje subvulkanskih dajkov dacita, ki so pogosti v zahodnem (strukturno najvišjem) delu intruzije, drugje pa jih ni. Pojavi vulkanoklastičnih horizontov v okolnih miocenskih sedimentnih kamninah kažejo tudi na nekdanji obstoj vulkanov, ki pa so danes popolnoma erodirani. Starost intruzije je bila najzanesljiveje določena z U-Pb metodo na kristalih cirkona, ki je dala pozno spodnjemiocensko starost (18,6 Ma). Najnovejše geokemične in petrološke študije kažejo, da se sestava intruzije sistematično spreminja od zahoda proti vzhodu, kar kaže, da je intruzija nastala v več pulzih magmatske aktivnosti, ki so se napajali predvsem iz meje med plaščem in skorjo, deloma pa tudi iz spodnje skorje.

Najmlajše kamnine na območju ekskurzije so miocenske klastične sedimentne kamnine v Ribniško-Selniškem tektonskem jarku med Pohorjem in Kozjakom, v Slovenjegraškem bazenu zahodno od Pohorja ter v manjših erozijskih krpah na vršni planoti Kozjaka. Enake sedimentne kamnine ležijo tudi na obsežnem območju Murskega in Ljutomerskega bazena vzhodno ter jugovzhodno od Pohorja in Kozjaka, kjer so deloma prekrte s pliokvartarnimi nanosi. Podatki iz globokih vrtin v teh dveh bazenih kažejo, da talnino miocena gradijo enake kamnine kot na Pohorju. Miocenski sedimenti so pozno spodnjemiocenske do zgodnje srednjemiocenske starosti (karpatij in badenij, 17–14 Ma) in odražajo začetek ugrezanja Panonskega bazenskega sistema, ki mu kot najzahodnejši del pripada Murski bazen.

## Struktura in tektonski razvoj ekstenzijskega kompleksa

Obstoj ekstenzijskih kompleksov z metamorfnim jedrom (*»metamorphic core complexes«*) so prepoznali v 60. letih prejšnjega stoletja v zahodnem delu Severne Amerike, v regiji Basin and Range. Danes poznamo številne primere takih ekstenzijskih kompleksov z vsega



sveta, saj so značilni za območja, podvržena močnemu raztezanju litosfere.

Vodilna struktura ekstenzijskega kompleksa je položen normalni prelom oziroma ločilna ploskev, ki sega globoko v litosfero in ob kateri je krovina premaknjena za več kot 100 km ali celo za nekaj 100 km. V krovini kompleksa nastanejo številni normalni prelomi, ki se v globini spajajo z vodilnim normalnim prelomom. Ti spremljajoči prelomi krovino kompleksa razkosajo v številne tektonske bloke, ki pri premikanju krovine pogosto rotirajo kot domine. Na ta način znotraj kompleksa nastanejo številni tektonski jarki in poljarki, v katerih se usedajo sintektonski klastični sedimenti. Stanjšanje litosfere, ki je posledica ekstenzijskega premikanja, povzroči izostatski dvig kompleksa in njegovo kupolasto izbočenje. Dviganje je navadno zelo hitro in zaradi hitre dekompresije ustvari ugodne pogoje za delno taljenje kamnin v globini in posledično magmatsko delovanje. Dvig kompleksa povzroči tudi kupolasto usločenje vodilnega položnega normalnega preloma v sistemu. Predvsem pa to dviganje ozemlja, ki je posledica ekstenzijskega razgaljanja, na površje dvigne visokometamorfne kamnine, ki so bile prvotno v velikih globinah. Pojav razgaljenih metamorfnih kamnin v jedru kompleksa je zelo značilen in je vodil k poimenovanju strukture kot »kompleksa z metamorfnim jedrom«. Ker se ozemlje tudi med dviganjem še naprej aktivno razteza, je naslednja tipična značilnost teh kompleksov, da vodilni položni normalni prelom spremeni značaj iz duktilne strižne cone (dokler je prelom v večjih globinah) v lomni prelom (ko se dvigne nad globino lomno-duktilnega prehoda). Zato v prelomni coni vodilnega preloma najdemo tako milonite kot kataklastično deformirane kamnine.

Pohorje leži na zahodnem obrobju Panonskega bazenskega sistema, ki je nastal zaradi močnega zaločnega raztezanja kontinentalne litosfere v spodnjem in srednjem miocenu. Raziskave v zadnjem desetletju so identificirale številne ekstenzijske komplekse vzdolž celotnega zahodnega obrobja Panonskega bazena od Avstrije do Srbije. Na

podlagi več kot dve desetletji trajajočih raziskav madžarskih in slovenskih geologov so bili zbrani številni podatki in dokazi, da tudi ozemlje Pohorja in Kozjaka tvori tak ekstenzijski kompleks. Glavni argumenti za to so:

- kupolasta geometrija (strukturiranost) masiva,
- ekshumirane visokometamorfne kamnine v jedru kompleksa,
- sočasnost tektonskega raztezanja, sedimentacije miocenskih sedimentnih kamnin in magmatizma,
- številni dokazi za miocensko ekstenzijsko tektoniko z generalno »panonsko« smerjo raztezanja od vzhoda proti zahodu, ki segajo od duktilnih deformacij v magmatskih in metamorfnih kamninah do sinsedimentnih lomnih deformacij v miocenskih kamninah,
- izdanjanje glavne ločilne ploskve na območju Kozjaka, na kateri ležijo erozijske krpe miocenskih sedimentnih kamnin. Strm vpad plasti v teh krpah kaže, da so bili bloki nad ločilno ploskvijo rotirani,
- termokronološki podatki, ki jasno kažejo na hiter dvig in ekshumacijo ozemlja v srednjem miocenu,
- refleksijski seizmični profili iz Murskega bazena in njegovega vzhodnega nadaljevanja na Madžarskem, ki kažejo klasično geometrijo ekstenzijskega bazena nad položnim normalnim prelomom.

Tektonski model nastanka ekstenzijskega kompleksa z metamorfnim jedrom tako zelo dobro razloži in poveže vse bistvene geološke značilnosti Pohorskega masiva in okolice.

### **Točka 1: Čepe nad Bresternico – glavna ločilna ploskev ekstenzijskega kompleksa in miocenski sinriftni sedimenti**

Obcestni profil v nekaj 100 m dolžine prečka glavno ločilno ploskev ekstenzijskega kompleksa in pride v krovinske sinriftne miocenske sedimentne kamnine.

Profil se začne v metamorfnih kamninah, pretežno skrilavcih in filitih pokrova Koralpe-Wölz. Kamnine so močno

duktilno deformirane in imajo gosto S-C foliacijo s pogostimi ekstenzijskimi strižnimi pasovi (Slika 2). Pojavlja se tudi budinaž. Kinematski indikatorji kažejo na smer transporta krovline proti vzhodu do jugovzhodu. Intenzivnost deformacij se povečuje proti vrhu profila, kjer je kontaktni prelom. Celoten razgaljen pas vertikalne debeline nekaj 10 m lahko imamo za položno duktilno strižno cono.

Prehod v miocenske sedimente v krovlini preloma je pokrit. V cestnem useku se v preperini začno pojavljati kremenovi prodniki, ki pripadajo bazalnemu konglomeratu. Z nekaj sreče je mogoče najti tektonsko glino na glavni ločilni ploskvi, ki je nastala v kasnejši, lomni fazi delovanja ločilnega preloma. Višje v profilu se nato pojavijo kompaktni izdanki miocenskega peščenega konglomerata. Izdanki sekajo manjši prelomi in razpoke, ki s konjugirano geometrijo nakazujejo nastanek v nateznih razmerah. Plastnatost je nagnjena za okoli 20°, kar nakazuje rotacijo tektonskih blokov na ločilni ploskvi ekstenzijskega kompleksa.



Slika 2: Ekstenzijski strižni pasovi v filitu znotraj strižne cone glavne ločilne ploskve ekstenzijskega kompleksa

### **Točka 2: Fala – bazalni konglomerat miocenskega sedimentnega zaporedja**

V obcestnem profilu je lepo razgaljeno zaporedje bazalnih miocenskih plasti, ki jih sestavljajo predvsem slabo

sortiran konglomerat, peščen konglomerat in peščenjak (Slika 3). Profil sicer še ni bil sistematično sedimentološko obdelan, a sklepamo lahko, da gre za najnižji del sinriftnega miocenskega sedimentnega zaporedja, ki se je usedal v kontinentalnem ali morda mešanem morsko-kontinentalnem okolju.

V konglomeratu najdemo večje število prodnikov magmatskih kamnin, večinoma globočnin, ki izvirajo iz miocenskega Pohorskega magmatskega kompleksa. Prisotnost teh prodnikov kaže na izredno hitro ekshumacijo ozemlja v času srednjemiocenske aktivnosti ekstenzijskega kompleksa, saj je med kristaljenjem kamnin v globini okoli 10 km pod površjem ter njihovo erozijo in odložitvijo klastov v sedimentih minilo komaj nekaj milijonov let.



Slika 3: Nagnjene plasti sinriftnega miocenskega peščenega konglomerata

### **Točka 3: Josipdol – kamnolom granodiorita**

Kamnolom Josipdol je eno klasičnih nahajališč pohorskega granodiorita, ki pa je zaradi odročnosti manj poznano in obiskano. Kamnolom je dober kilometer oddaljen od subvertikalne severne meje intruzije.

Kamnina je srednje- do debeložrnata in vsebuje plagioklaz, K-glinenec, kremen in biotit, zelo malo ali nič pa je rogova-

če. Tako kot marsikje drugod ima kamnina rahlo nakazano foliacijo, ki je v Josipdolu subvertikalna. Mikrostrukture dokazujejo, da je foliacija nastala s kristaloplastičnimi mehanizmi v trdnem stanju in torej ni primarna (magmatska) foliacija, ampak je tektonskega nastanka. Kamnina vsebuje do nekaj dm velike temne drobnozrnate enklave mafične sestave, ki jih gradijo biotit, rogovača, glinenci in kremen. Mafične enklave so značilno razpotegnjene do sploščene v ravnini foliacije in torej odražajo enak tektonski mehanizem nastanka.

#### **Točka 4: Hudi Kot – tektonsko deformirana meja granodioritne intruzije**

Izdanek je značilen za severno mejo Pohorske intruzije. Intruzivni kontakt je tu subvertikalen in generalno vpada strmo proti jugu. Ob glavnem telesu granodioritne intruzije potekajo vzporedno subvertikalni dajki dacita in temnejše mafične kamnine, katerih debelina znaša od nekaj dm do več kot 10 m. Tako v glavni intruziji kot v dajkih je prisotna strma foliacija, ki je subparalelna intruzivnim kontaktom, šibkeje pa je razvidna subhorizontalna kristaloplastična lineacija. Foliacija je praviloma močnejše razvita v granodioritu, kar kaže, da je začela nastajati še pred intruzijo spremljajočih dajkov. Kristaloplastične mikrostrukture v magmatskih kamninah kažejo na levostrižne deformacije vzdolž intruzivnega kontakta. V metamorfnih kamninah, v katere so magmatske kamnine vtisnjene, je foliacija vzporedna. Kontakt je verjetno bočna meja intruzije, najbrž bližje njenemu spodnjemu delu.

#### **Točka 5: Baronov kamnolom – mikrogranodiorit in dacit**

Lokacija je ob skrajno zahodni meji telesa Pohorske intruzije in strukturno leži v njenem najvišjem delu. Barometrični podatki kažejo, da so v tem delu intruzije kamnine kristalile manj kot 4 km globoko pod površjem. Tu granodiorit preide v dacitna telesa in dacitne dajke, ki

imajo deloma lakolitno geometrijo. Najverjetneje gre za razgaljen globok del vulkanskega sistema, ki je bil nekoč nad intruzijo, a ga je erozija v večji meri odstranila.

V kamnolomu najdemo različke dacita in porfirskega mikrogranodiorita (Slika 4), ki so značilne kamnine za ta globinski nivo Pohorskega magmatskega kompleksa.



Slika 4: Dacit in mikrogranodiorit v Baronovem kamnolomu

#### **Točka 6: Brekova koča – bazalni prelom in miocenski sintektonski sedimenti**

Ob potoku je razgaljen profil bazalnih miocenskih sinriftnih klastitov, ki leži zelo blizu tektonskemu kontaktu (položni ločilni ploskvi) z metamorfnimi kamninami v podlagi (Slika 5).

Sedimentne kamnine so močno kataklastično deformirane. Pogosti so položni decimetrski normalni prelomi, ob katerih so bloki rotirani po mehanizmu domino rotacije. Analiza zdrsov ob prelomnih ploskvah kaže na več faz normalnega prelamljanja, od katerih se je prva začela, ko so bile plasti še v horizontalni orientaciji. Strukture kažejo splošno vzhodno–zahodno usmerjeno ekstenzijo, glavni tektonski transport pa je bil v smeri proti zahodu.



Izdanek dokazuje sinsedimentno tektonsko aktivnost ekstenzijskega kompleksa.

*Slika 5: Sinsedimentne prelomne deformacije v miocenskih sedimentih nad glavno ločilno ploskvijo*

---

**Viri** (Izbrana novejša literatura o Pohorskem ekstenzijskem kompleksu in magmatizmu):

Fodor, L., Jelen, B., Trajanova, M., Vrabec, M., Vrabec, M. in sod. 2021: Crustal exhumation and depocenter migration from the Alpine orogenic margin towards the Pannonian extensional back-arc basin controlled by inheritance. *Global and planetary change*, 201: 103475–1-103475-31. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103475>

Fodor, L., Márton, E., Vrabec, M., Koroknai, B., Trajanova, M., Vrabec, M. 2020: Relationship between magnetic fabrics and deformation of the Miocene Pohorje intrusions and surrounding sediments (Eastern Alps). *International journal of earth sciences*, 109/4: 1377–1401. <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01846-4>

Poli, G., Christofides, G., Koroneos, A., Trajanova, M., Zupančič, N. 2020: Multiple processes in the genesis of the Pohorje igneous complex: evidence from petrology and geochemistry. *Lithos*, 364-365: 105512. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105512>



## Litostratigrafske formacije med Rogaško Slatino in Bočem ter geološka pot v Kozjanskem krajinskem parku

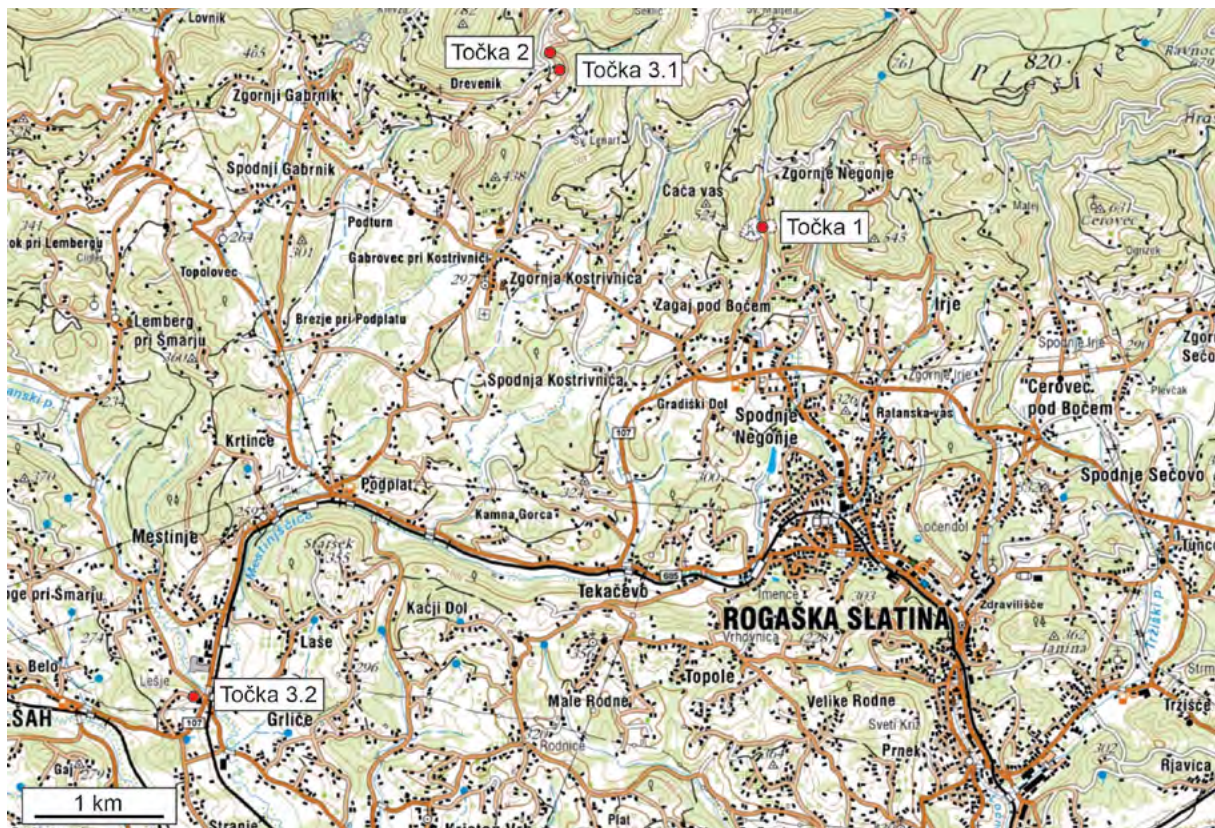
Vodje/Guided by: Polona Kralj<sup>1</sup>, Kristina Ivančič<sup>1</sup>, Matevž Novak<sup>1</sup>, Nina Valand<sup>1</sup>, Aleša Uršič Arko<sup>1</sup>, Mojca Kunst<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana (polona.kralj@geo-zs.si, kristina.ivancic@geo-zs.si, matevz.novak@geo-zs.si, nina.valand@geo-zs.si, ales.ursicarko@geo-zs.si)

<sup>2</sup> Kozjanski park, Podsreda 45, 3257 Podsreda (mojca.kunst@kp.gov.si)

### Uvod

Na območju med Rogaško Slatino in Bočem prevladujejo starosti, Boč grade mezozojske karbonatne kamnine, litostratigrafske formacije oligocenske in miocenske permijske karbonatne in siliciklastične kamnine pa se



Slika 1: Topografska karta z označenimi točkami ekskurzije.

pojavnajo kot velike leče, tektonsko vrinjene med plasti mlajših kamnin. Na ekskurziji si bomo v kamnolomu Zagaj ogledali litofaciese vulkanskih kamnin oligocenske starosti, porfiriske in steklaste lave andezitne sestave, peperite, hialoklastične breče in hialoklastite ter piroklastične kamnine. Vulkanske kamnine so značilno in zelo močno tektonsko deformirane. Na zgornjem delu kamnoloma izdanjajo tudi leče permijskega apnenca v meljevcu in tufu. Na območju Drevenika si bomo ob cesti na Boč ogledali spodnjepermijske apnenice in siliciklastične kamnine, ki so v stikih z oligomiocenskimi laporovci in meljevci, v Mestinju pa si bomo v badenijskih plasteh ogledali markantno antiklinalo. Točke ekskurzije so označene na sliki 1. Za konec si bomo ogledali Geološko učno pot v Kozjanskem parku. Pot poteka v okolici naselja Olimje. Pestrost geološke zgradbe ob poti predstavlja celoten geološki razvoj in geološko zgradbo Kozjanskega. Pot vodi po južnem pobočju Rudnice in severnem pobočju Virštanja.

### **Točka 1: Vulkanske kamnine med Rogaško Slatino in Bočem – Kamnolom Zagaj in profil Irje**

#### **Uvod**

Na današnjem ozemlju Slovenije so oligocenske vulkanske kamnine najbolj razprostranjene v sistemu Panonskih bazenov (Slika 2). Izdanjajo na območju Smrekovškega pogorja, Celjske kotline, Rogaške Slatine in Kozjanskega (Pleničar in Hinterlechner-Ravnik, 1967; Aničić in Juriša, 1985; Buser, 2009), njihovo pojavljanje pa je tesno povezano s Periadriatskim prelomnim sistemom (PFS) (Slika 2). PFS se na ozemlju Slovenije vzhodno od Karavank razdeli v več prelomov, od katerih izstopata dva – Smrekovski prelom (SP), ki povezuje PFS z Labotsko prelomno cono (LFZ), in Šoštanski prelom (ŠF), ki poteka dalje proti jugovzhodu (Fodor in sod., 1998, 2002). Nastanek oligocenskih vulkanskih kamnin je posledica zgornjekredne do paleogenske subdukcije Evropske plošče pod Afriško (Dercourt in sod., 1986; Kázmr in sod., 2003). Kljub temu, da se je v eocenu (~45 Ma) subdukcija spremenila v kolizijo, se je približeva-

nje obeh plošč nadaljevalo še med oligocenom in je imelo za posledico odlom podrinjene Evropske oceanske plošče pod Alpami. Zaradi tega se je vzdolž PFS pojavil magmatizem, magme pa so iz spodnjega dela litosfere prodirale tudi do površja vzdolž dobro razvite milonitske foliacije PFS (von Blanckenburg in Davies, 1995; Handy in sod., 2015). Magme so bile kalcialkalne ter po sestavi večinoma andezitne in dacitne (Altherr in sod., 1995; Kralj, 1996, 2012).

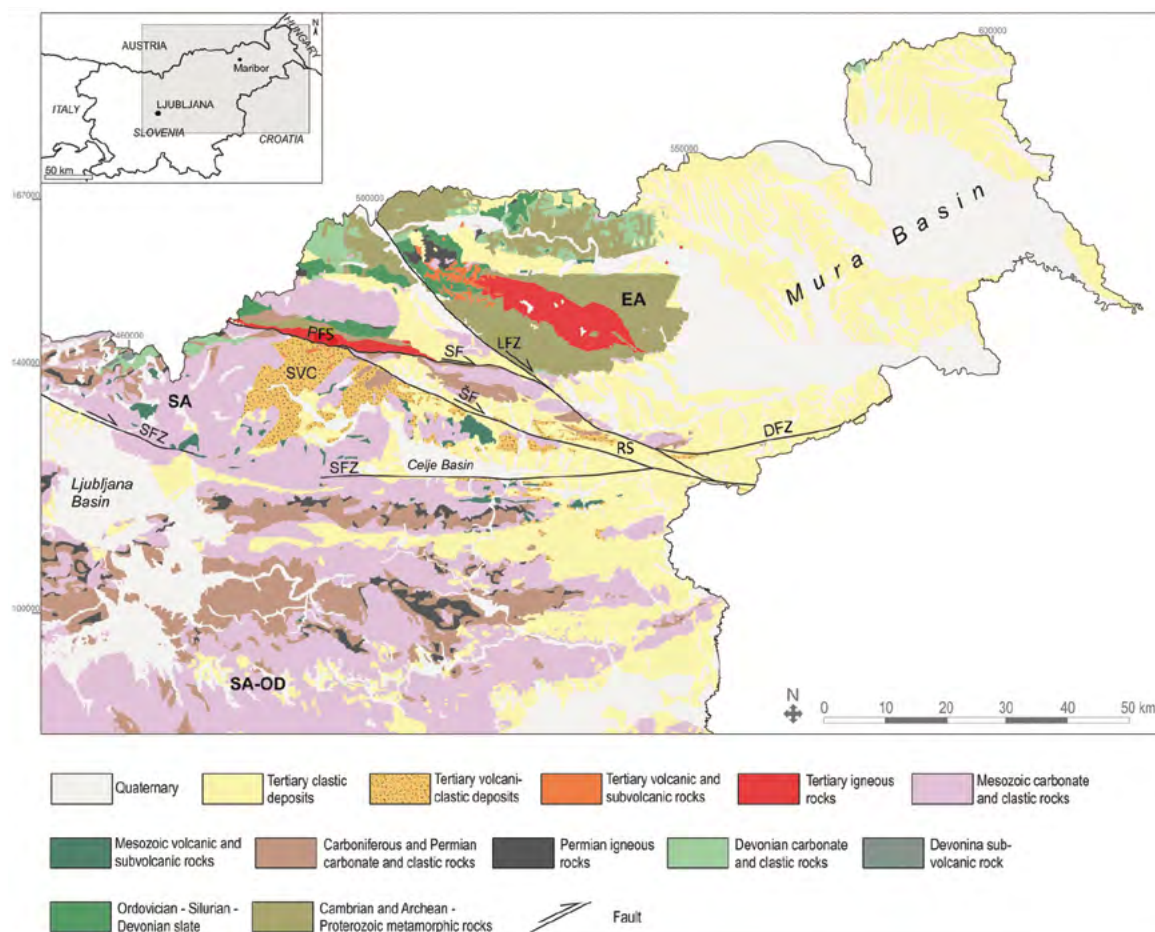
Na širšem območju Rogaške Slatine izdanjajo oligocenske vulkanske kamnine v dveh geotektonskih enotah: a) v Labotski prelomni coni (LFZ) ter b) v geotektonski enoti, ki se razprostira južno od LFZ in ki jo označujemo s SLF. Med geotektonsko enoto LFZ in Šoštanskim prelomom (ŠF) pa so vulkanske kamnine geotektonske enote SLF ugreznjene pod zaporedjem oligocenskih in oligomiocenskih meljastih, peščenih in karbonatnih sedimentov in sedimentnih kamnin ter so vodonosnik mineralne vode Donat Mg (Nosan, 1989). Južno od ŠF izdanjajo oligocenske vulkanske kamnine na območju Kozjanskega (npr. Trobni dol, Košnica, Lesično) ter v okolici Rogatca (npr. Trlično) in Sv. Roka (Aničić in sod., 2002; Kralj, 1996, 1999, 2002).

Litofaciese vulkanskih kamnin, ki izdanjajo v geotektonskih enotah SLF in LFZ, lahko združimo v štiri skupine: izlivne predornine (I), avtoklastične kamnine (A), piroklastične kamnine (Py) in sin-eruptivno presedimentirane vulkanoklastične kamnine (V), med katere štejemo tudi po sestavi mešane siliciklastične-vulkanoklastične kamnine (tufite)

#### **Geotektonska enota SLF – kamnolom Zagaj, profil Irje**

##### *Izlivne predornine (I)*

Izlivne predornine izdanjajo le v enoti SLF. Pripadajo jim lave – litofacies I(L), ki so večinoma porfiriske, le v manjšem obsegu najdemo lave, ki jih lahko opredelimo kot steklaste. Edini podatki o kemični sestavi porfirskih lav iz kamnoloma Zagaj (Slika 3) kažejo, da pripadajo andezitu (Aničić in sod., 2002). Glede na umeščenost v zaporedju vulkanskih kamnin predvidevamo, da so naj-



Slika 2: Poenostavljena geološka karta osrednje in severovzhodne Slovenije (po Busr, 2009). SA – Južne Alpe; SA-OD – Južne Alpe in Zunanji Dinaridi; EA – Vzhodne Alpe; SVC – Smrekovski vulkanski kompleks; RS – Vulkanske kamnine območja Rogaške Slatine; PFS – Periadriatski prelomni sistem; SFZ – Sistem Savskih prelomov; LFZ – Labotska prelomna cona; SF – Smrekovski prelom; ŠF – Šoštanjki prelom; DFZ – Donačka prelomna cona.

starejše lave porfirne s številnimi, sorazmerno velikimi in s prostim očesom lepo vidnimi fenokristali – litofacies I(L)<sub>F</sub>. Fenokristali večinoma pripadajo plagioklazom, ki so dvojčični in izrazito conarno grajeni, pogosto dosežejo velikost nekaj mm, nekateri tudi več kot 10 mm, večinoma so spremenjeni v drobnozrnate in pogosto optično motne agregate albita. Mafični fenokristali so navadno spremenjeni v klorit, kremen, karbonatne minerale in železove okside, le ponekod najdemo lepo ohranjen avgit, včasih

v večjih (nekaj mm) skupkih. Osnova je bila prvotno steklasta, sedaj pa je spremenjena v klorit, mikrokristalni kremen, mikrokristalni albit in železove okside. V osnovi so mikrofeno-kristali in mikroliti, strukturo kamnine pa lahko opredelimo kot serialno (angl. *seriate*). Mikroliti so mestoma usmerjeni.

Struktura lav, ki ležijo nad najstarejšimi v zaporedju vulkanskih kamnin, se postopno spreminja tako, da fenokristali postajajo manjši in količinsko manj zastopani,



v osnovi je manj mikrolitov, ki so tudi manjši. Litofaciese teh lav smo združili v  $I(L)_f$ . Spremembe fenokristalov in osnove so zelo podobne kot pri lavah litofaciesa  $I(L)_f$ .

Lave litofaciesa  $\alpha I(L)_f$  prehajajo navzgor v steklaste lave  $\alpha I(L)_g$ . Fenokristalov je sorazmerno malo, so sorazmerno majhni, pogosto veliki manj kot 1 mm, prevladuje steklasta osnovna masa, ker je spremenjena v mikrokristalen kremen in albit, v njej so drobno razpršeni železovi oksidi, kloritizacija osnove je manjša kot v starejših lavah, kar vidimo že makroskopsko v različni barvi, ki je namesto sivo zelena zelo temno sivorjava.

Kljub zapletenim tektonskim razmeram menimo, da se kot najmlajše lave ponovno pojavljajo porfirske lave litofaciesa  $I(L)_f$ , med katerimi pogosto najdemo tudi makroskopsko vijoličasto obarvane različke. Tudi te lave imajo velike fenokristale plagioklazov, mafični minerali (verjetno avgit) pa so spremenjeni v klorit, kremen in železove okside. V steklasti osnovi so sicer sorazmerno manj številni mikrofenokristali plagioklazov in femičnih mineralov, pa tudi manj številni mikroliti, pomembna razlika pa je v spremenjenosti osnove. Osnova je za razliko od starejših lav spremenjena v mikrokristalni kremen, albit in železove okside, klorita skoraj ni mogoče opaziti.



Slika 3: Kamnolom Zagaj. Na desni strani kamnoloma spodaj je stik meljevca (S) z lavami (I).



### *Avtoklastične kamnine (A)*

Na kartiranem območju so avtoklastične kamnine pestro razvite, kar je v morskem okolju pogost pojav (McPhie et al., 1993). Avtoklastične kamnine so po izvoru in starosti vezane na matične izlivne predornine; navadno se pojavljajo v neposredni okolici lav in so presedimentirane le v majhnem obsegu. Med avtoklastične kamnine štejemo avtobrečirane lave (AB), peperite (P), hialoklastične breče (HB) in hialoklastite (H). Avtobrečirane lave se pojavljajo sorazmerno redko, enako velja za peperite.

Avtobrečirana lava nastane pri ohlajanju in strjevanju lavinega toka, pri čemer se oblikujejo večji in manjši kosi, ki ostajajo na mestu nastanka. Peperiti so mešanice vlažnega sedimenta in še vroče lave ali magme. Sediment je lahko po sestavi klastičen, karbonatni, piroklastičen in vulkanoklastičen ter lahko ima različno zrnavost.

Peperiti so navadno blokasti, v osnovi pa najdemo tako siliciklastični meljevec kot tudi tuf. Meljevec se kot sedimentna sestavina peperita pojavlja predvsem v baznih lavah.

Mnogo pogosteje kot litofaciesa AB in P so zastopane hialoklastične breče HB. Hialoklastične breče sestojijo iz oglatih kosov in zrn lave – hialoklastov velikosti od 2 mm do približno 4–5 dm, osnova pa je hialoklastit (velikosti zrn < 2 mm). Hialoklastit matriksa sestoji iz hialoklastov velikosti od < 63  $\mu$ m do 2 mm in je po sestavi enak kot večji hialoklasti. Hialoklasti osnove so tako kot večji hialoklasti navadno oglati, večinoma ostrorobi, steklasti in brez votlinic plinskih mehurčkov. Steklasta osnova hialoklastov je močno spremenjena v klorit, mikrokristalni kremen, albit ter včasih tudi glinene minerale in kalcit. Hialoklastiti (H) se mestoma pojavljajo skupaj s HB, navadno pa na nekoliko večji oddaljenosti od matične lave kot HB. Struktura in granulometrična sestava sta podobni kot matriks HB. Masivni hialoklastiti, v katerih so hialoklasti velikostnega reda lapilov (2-63 mm), pripadajo litofaciesu mHL, če so velikostnega reda debelozrnatega vulkanskega pepela (0,063-2 mm), pripadajo litofaciesu mHT, če pa so manjši od 0,063 mm, pripadajo litofaciesu mHF; mestoma smo opazili hialoklastite, v katerih je plastnatost nekoliko nakazana, tako da pripadajo litofaciesu h(c)HF.

### *Piroklastične kamnine (Py)*

V tektonski enoti SLF so piroklastične kamnine razvite zelo pestro. Pojavljajo se vzporedno plastnati lapilni tufi (Slika 4) – litofacies hsLT(py), vzporedno plastnati debelozrnati tufi – litofacies hsT(py), vzporedno drobnoplastnati in laminirani drobnozrnati tufi – litofacies hlF(py) ter navzkrižno drobnoplastnati in laminirani drobnozrnati tufi – litofacies xlF(py).

Podrobnih mikroskopskih preiskav piroklastičnih kamnin tektonske enote SLZ nimamo, ker so pogosto spremenjene, preperle in sorazmerno slabo litificirane. Na osnovi makroskopskih opazovanj menimo, da med lapili prevladuje plovec, ki je pogosto spremenjen v glinene minerale ali klorit. Enako velja za debelozrnate in drobnozrnate tufe, čeprav so navadno nekoliko manj prepereli in vsebujejo več mikrokristalnega kremenca. Litofaciesi piroklastičnih kamnin se navadno pojavljajo skupaj in tvorijo sorazmerno tanka (0,4-3 m) zaporedja z zmanjševanjem zrnivosti in debeline plasti oziroma lamin navzgor od hsLT(py) v bazi zaporedja, nad katerim leži hsT(py), nato hlF(py) in včasih xlF(py). Domnevamo, da so zaporedja nastala zaradi sorazmerno majhnih eksplozivnih izbruhov, izvržen vulkanski material se je v vodnem mediju separiral in postopoma gravitacijsko usedal iz toka vulkanskega materiala, pomešanega z morskovo vodo. Eksplozivna dejavnost je bila močno podrejena izlivni.

### *Mešane vulkanoklastične-siliciklastične kamnine (V)*

V geotektonski enoti SLF smo našli tudi mešane vulkanoklastične-siliciklastične kamnine oziroma sedimente. Te kamnine oziroma sedimenti so običajno drobnozrnati, po barvi se nekoliko razlikujejo od meljevcev – prevladuje temna olivna barva (npr. 5Y 4/1, 5Y 2/1; Rock Color Chart, 1970) – so masivni ali drobnoplastnati oziroma laminirani, pri čemer sta drobna plastnatost in laminacija slabo vidni, saj ni mogoče zaznati niti značilne spremembe v barvi niti zrnivosti. Na osnovi terenskih opazovanj smo ločili tri litofaciese – masivne drobnozrnate tufite mF(v), vzporedno drobnoplastnate in laminirane drobnozrnate tufite hlF(v) ter navzkrižno drobnoplastnate in laminirane



Slika 4: Plastnate piroklastične kamnine (Py) v kamnolomu Zagač, ki ležijo nad in med lavami (I).

ne tufite xLF(V). Ti litofaciesi so običajno nad zaporedjem piroklastičnih kamnin oziroma nad drobnozrnatimi tufi in so najverjetneje nastali z lokalno presedimentacijo drobnozrnatega vulkanskega pepela ter mešanjem s siliciklastičnim materialom v času mirovanja vulkanske aktivnosti. S terenskimi raziskavami nismo mogli prepoznati bolj debelozrnatih litofaciesov, čeprav menimo, da se pojavljajo tudi lokalno presedimentirani hialoklastiti.

#### **Geotektonska enota LFZ – profil Irje**

##### *Piroklastične kamnine (Py)*

Piroklastične kamnine v geotektonski enoti LFZ so tektonsko močno porušene in zato tudi močno spremenjene. Razvite so zelo monotono. Pojavljajo se kot drobno- in debelozrnat tuf, ki so masivni, plasti so debele 2-5 m [litofacies mT(py)]. Plastnatosti ali laminacije, ki bi bila lahko razvita na vrhnjem delu plasti, morda ni mogoče

opaziti zaradi močne tektonike in mineraloških sprememb. Pod mikroskopom so vidne močne spremembe kamnine, predvsem steklaste tufske osnove, ki je spremenjena v mikrokristalni kremen, albit, železove okside in mestoma glinene minerale. Ponekod se poleg žil kremena, dolomita in kalcita pojavljajo žile epidota. Drobcji fenokristalov večinoma pripadajo albitu, ponekod pa se pojavljajo tudi drobcji fenokristalov kremena, iz česar sklepamo, da gre za predornine dacitne sestave. Glede na teksturo in strukturo kamnine predvidevamo, da gre za močne eksplozivne izbruhe, s čimer so nastali piroklastični tokovi.

##### *Presedimentirane vulkanoklastične kamnine (V)*

Nad litofaciesom mT(p) se ponekod pojavljajo tudi litofaciesi presedimentiranih vulkanoklastičnih kamnin, in sicer litofacies mF(v) in LF(v). Zaradi močne tektoniziranosti LFZ jih je v splošnem zelo težko prepoznati.



## Točka 2: Spodnjepermske karbonatne in siliciklastične kamnine na vzhodnem pobočju Dreveniške gore

Najstarejše kamnine na območju med Bočem in Rogaško Slatino so zgodnjepermske starosti. Nastopajo v močni transpresijski prelomni coni, marsikje pa jih prekrivajo z erozijsko diskordanco odložene mlajše oligocensko-miocenske kamnine. Zato so izdanki teh kamnin, v katerih bi lahko v daljših profilih videli odnose med različnimi litofaciesi, zelo redki. Poleg tega so tektonizirane siliciklastične kamnine močno podvržene preperevanju in eroziji, zaradi česar so večinoma pokrite z debelim preperinskim pokrovom. Kljub temu so rezultati detajlnega geološkega kartiranja v letih 2008 in 2009 (Trček in sod., 2011) z analizo kompozitnih profilov pokazali, da so tudi na tem

območju spodnjepermske plasti razvite v cikličnem vzorcu sedimentacije. V transgresijskem delu ciklov so nastali kremenovi konglomerati, kremenovi peščenjaki, meljevci in glinavci, ki jim sledijo karbonatni litofaciesi. V regresijskem delu so se plasti odlagale v zrcalnem zaporedju.

Na tej točki ekskurzije (Slika 5) bomo videli najpogostejše različke karbonatnega razvoja. To so sivi do beli masivni sparitni apneneci (grainstone), ki ponekod vsebujejo veliko krinoidnega drobirja, ponekod posamezne fuzulinidne foraminifere, redkeje brahiopode ali korale. Sparitni različki so na mnogih mestih selektivno ali popolnoma dolomitizirani, ponekod pa prehajajo v debelozrnato apnenčevo brečo z rdečim ali rumenorjavim siliciklastičnim vezivom. Redkejši je temnosiv debeloplastnat mik-

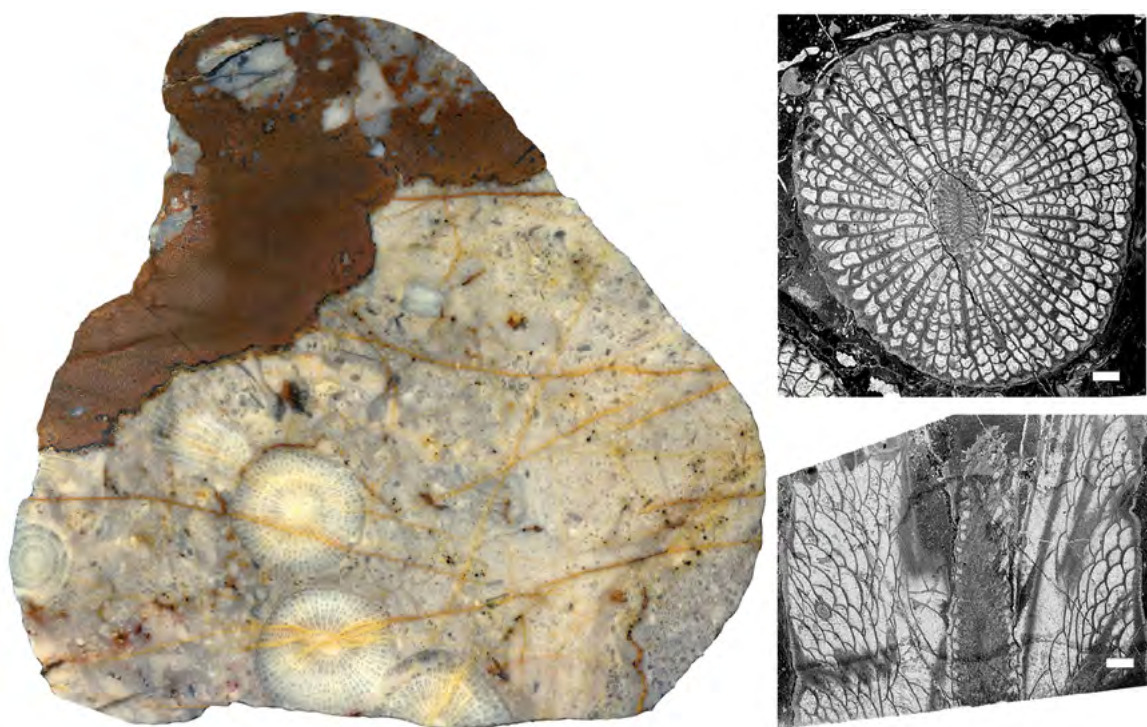


Slika 5: Tektoniziran spodnjepermski apnenec na točki 2.

ritni apnenec (packstone) z algami, gnezdi fuzulinidnih foraminifer in daljšimi odlomki krinoidnih pecljev, ki so lahko debeli več kot 1 cm. Večina stikov med siliciklastičnimi in karbonatnimi plastmi je normalnih sedimentnih, ponekod pa so tektonski (Celarc in Novak, 2011).

Analize vzorcev še niso dokončane, dosednji rezultati analize fuzulinidnih foraminifer pa s prisotnostjo vrst *Sphaeroschwagerina carniolica*, *Rugosofusulina* cf. *likana* in *Paraschwagerina mukhamedjarovica* v vseh vzorcih kažejo zgodnjepersko (asselijsko-sakmarijsko) starost (Kossovaya in sod., 2020). Ker se razvoji tudi v (mikro)fa-

ciesih ujemajo s tistimi v Bornovi formaciji v Dovžanovi soteski (Forke, 2002; Novak, 2007), lahko tudi te kamnine pripišemo isti formaciji. To se ujema tudi z najdbami koral rodu *Carinthiaphyllum*, najdenih v Bornovi formaciji tako v Dovžanovi soteski kot na vzhodnem vznožju Boča (Slika 6) (Heritsch, 1941; Kossovaya in sod., 2020). V karbonatnih razvojih, ki se pojavljajo na južnem pobočju Boča ter na področju Dreveniške gore, Drenovca, Hrastovca in Tolstega vrha pri Šegi, še nismo našli dokazov za zgornjekarbonsko starost kamnin, katerih pojave Ramovš (1959) navaja v Donački prelomni coni med Gabrovcem pri Kostrivnici in Žetalami.



Slika 6: Rugozna korala *Carinthiaphyllum ramovsi*, nova vrsta z vzhodnega vznožja Boča, imenovana po prof. Antonu Ramovšu. Levo: na polirani površini bioklastičnega apnenca s fuzulinidno foraminifero vrste *Sphaeroschwagerina carniolica* ob levem robu in paleokraško površino na vrhu. Desno: prečni in vzdolžni presek. Merilo = 1 mm (po Kossovaya in sod., 2020).



### Točka 3: Miocenske sedimentne kamnine na območju med Bočem in Rogaško Slatino.

Oligocenske in spodnjemiocenske kamnine so v Sloveniji prisotne na območju južno od Donačke prelomne cone in segajo vse do severnega roba Bohorja. Kamnine so egerijske in eggenburgijske starosti. Ker pa je egerijska stopnja v Centralni Paratetidi, ki pripada tako oligocenu kot miocenu, so plasti pogosto skrajšano poimenovane OL,M ter umeščene v Govško formacijo. Kamnine so odložene diskordantno na predkenozojsko podlago (Kuščer, 1967). Razvoj Govške formacije se lateralno spreminja. Zaporedje se začne z bazalnimi konglomerati ali bazalnim prodromom, ki ga prekrivajo lapornata glina, pesek in peščenjak. Sedimentno zaporedje se nadaljuje s peščenim apnencem, ki lahko vključuje lepidocikline in ga prekriva spodnjemiocenski litotamnijski apnenc (Kuščer, 1967). Ponekod je prisotna glina z vložki peska in peščenjaka, sledi menjavanje laporovcev in glinavcev, ki jih prekriva konglomerat, zaporedje pa zaključujeta pesek in peščenjak. Na območju Kozjanskega so prisotni konglomerat, pesek, peščenjak, melj, meljevec, tuf in premoške plasti (Aničič in sod., 2002). Sedimenti so se usedali v priobalnem morskem in brakičnem okolju.

Na kamninah Govške formacije so diskordantno odložene plasti badenijske starosti. Poznane so pod imenom Laška formacija ter so določene na območju Tunjic, Moravč,

Posavskih gub, Kozjanskega in Krškega (Hamrla, 1954; Kuščer, 1967; Buser, 1979; Strgar, 2003; Poljak, 2017). Formacija je sestavljena iz dveh členov: laškega laporja in litotamnijskega apnenca (Buser, 1979; Bavec in sod., 2005). Slednji je makroskopsko podoben litotamnijskemu apnencu Govške formacije (Kuščer, 1967). Zaporedje se začne z bazalnimi konglomerati, sledijo peščenjak, lapornati apnenc in lapor. Ponekod je prisoten kalkarenit (Buser, 1979). Sedimentacija je potekala v priobalnem ter plitvo- in globokomorskem okolju.

### Točka 3.1: profil Drevenik, zgornji oligocen in spodnji miocen

V profilu Drevenik si bomo ogledali začetno zaporedje Govške formacije. V spodnjem delu so prisotni srednjezrnati konglomerati s temnim karbonatnim vezivom. Konglomerati predstavljajo prvi zasip na predkenozojski podlagi, zato jih poimenujemo tudi bazalni konglomerati. Nanje so odloženi laporovci (Slika 7A), ki postopno prehajajo v debelo- in drobnozrnat peščenjak s karbonatnim vezivom, ta pa v drobnozrnat konglomerat. Stratigrafsko zaporedje se nadaljuje z menjavanjem peščenjakov in lapornatih meljevcev, ki so prisotni v tankih plasteh in lečah med debelejšimi plastmi peščenjaka in drobnozrnatega konglomerata (Slika 7C). V nadaljevanju je prav tako prisotno menjavanje drobno- do debelo- in drobnozrnatih peščenjakov in



Slika 7: A – menjavanje konglomeratnih in lapornatih plasti, B – laminirani lapornati meljevci z značilno lapornato krojitivijo.



Slika 7: C – menjavanje debelozrnatih peščenjakov in drobnozrnatih konglomeratov z tankimi vložki lapornatih meljevcev.

laminiranih lapornatih meljevcev, ki vključujejo drobne sljude. Ogled bomo zaključili s tankoplastnatimi in laminiranimi lapornatimi meljevci (slika 7B).

### Točka 3.2: Antiklinala v Mestinju, badenij

V Mestinju si bomo ogledali antiklinalo (Slika 8), ki jo gradi menjavanje badenijskih drobnozrnatih peščenjakov, apnenčastih peščenjakov in preperelih lapornatih meljevcev. V spodnjem delu profila prevladuje menjavanje apnenčevega peščenjaka z ostanki školjčnih lupinic in drobnodo debelozrnatega peščenjaka. V zgornjem delu pa prevladuje menjavanje drobnodo srednjezrnatega peščenega apnenca ter drobnodo debelozrnatega peščenjaka s preperelim lapornatim meljevcem, ki vsebuje predvsem fosilne ostanke školjk. V nekaterih delih je lapornati meljevec laminiran. Opazno je izklinjanje posameznih plasti. Profil v Mestinju je edina tovrstna vidna

guba v miocenskih plasteh na območju Slovenije, zato je uvrščen na seznam naravnih znamenitosti in razglašen za kulturni spomenik. Ker je razglašen za geološki naravni spomenik, je vsako odkopavanje, odnašanje, lomljenje in razbijanje kamnin prepovedano.

### Točka 4: Geološka učna pot na Rudnico in Virštanj

Rudnica, Virštanj in okolica so sestavljeni predvsem iz kamnin srednjega in novega zemeljskega veka. Obravnavano ozemlje je že zelo zgodaj pritegnilo geološke raziskovalce. Privlačili so jih rudno bogastvo, nahajališča premoga, termalni vreli in mineralni izviri. Zaradi pojava železove rude je bilo območje Rudnice natančno raziskano, pozneje pa zaradi termalnih vrelcev tudi območje Podčetrška. Na obravnavanem ozemlju lahko zasledimo tudi mnoge sledove tektonskega delovanja. Rudnica je del Dinaridov, deli, pokriti s terciarnimi plastmi, pa pripadajo Panonske-





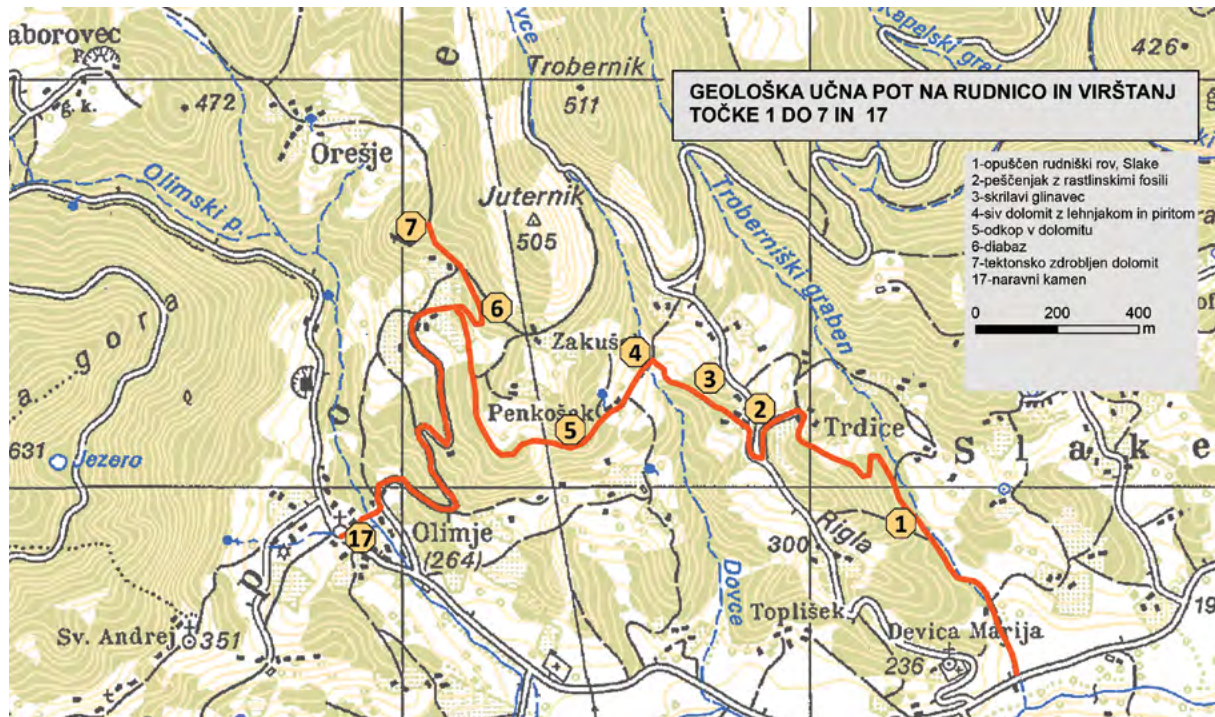
*Slika 8: Antiklinala v Mestinju – menjavanje badenijskega peščenjaka ter preperelega lapornatega meljevca.*

mu masivu. Plasti so se oblikovale v obsežne sinklinale in antiklinale, ki potekajo v smeri vzhod–zahod. Med značilnimi gubami so naslednje: Laška sinklinala, Rudniška antiklinala in Planinska sinklinala. Ozemlje sekajo tudi številni dolgi prelomi, ki so večji del v dinarski smeri severozahod–jugovzhod. Nastali so v pliocenu, ko so ob njih potekala močna premikanja blokov. Premikanja so se kasneje počasi umirila, vendar ne popolnoma, saj je bil zadnji rušilni potres na Kozjanskem leta 1974. Gospodarsko najpomembnejša surovina so na tem ozemlju termalni vreliči pri Podčetrtku. Nekoč so tu kopali tudi premog (Babna Gora, Tinsko in Roginska Gorca), vendar so rudarjenje že zdavnaj opustili. Večji del Rudnice sestavlja dolomit, ki je zelo zdrobljen in zato brez večje obdelave uporaben za gradbene namene. V precejšnjih debelinah nastopa tudi pesek, ki ga domačini kopljejo v številnih manjših peskoko-pih in uporabljajo za domače potrebe. Na južnem pobočju Rudnice med Žmarkom, Olimjem in Podčetrtkom se pojavlja železova ruda (siderit in limonit) v triasnih dolomitih.

Na območju Rudnice so tudi precejšnje zaloge pitne vode. Geološka učna pot ima 21 opazovalnih točk. V sklopu ekskurzije si bomo ogledali točke od 1 do 7 (Slika 9).

#### **Točka 4.1: Opušчени rudniški rov**

S kopanjem železove rude so na območju Rudnice začeli na začetku 19. stoletja. Kot rudne minerale so pridobivali limonit, siderit in pirit. Odprtih je bilo več manjših rovo. Kopali so z enostavnimi, večinoma ročnimi metodami, zato je bil izkoristek majhen. Ob prelomu stoletja so letno odkopali od 1500 do 2000 ton rude, ki so jo odvažali v okoliške fužine. Do leta 1934 je v Slakah deloval rudnik Perghaus. Rudo so od neuporabne kamnine ločevali že na mestu izkopa, zato lahko še danes marsikje najdemo večje kose rude. Kopali so anizijski dolomit in deloma apnenec, ki sta vsebovala naslednje železove minerale: siderit, pirit, ankerit in limonit. V kamnini najdemo minerale v tankih



Slika 9: Geološka učna pot med Rudnico in Virštanjem.

žilicah ali neenakomerno razpršene. Danes lahko v odkopu opazujemo kose dolomita, prepredenega z vijugastimi orudenimi žilicami siderita in limonita, včasih tudi pirita.

Rudarski rovi danes niso dostopni, saj niso vzdrževani. Pričujoči rov je dostopen v dolžini okoli 66 m in je na voljo za ogled le pod vodstvom osebja Kozjanskega regijskega parka. Ker so rovi že dlje časa izpostavljeni pronicanju vode iz površja, se na njihovih stenah izločajo minerali, raztopljeni v vodi. Opazujemo lahko kalcitne prevleke in manjše karnike, ponekod pa tudi lepe aragonitne kristale, ki jim zaradi žarkovitosti pravimo aragonitni ježki (Slika 10).

#### Točka 4.2: Peščenjak z rastlinskimi fosili, lahko tudi z ostanki rib

Tu imamo okrog 20 milijonov let star oligocenski laporni in glineni pesek ter peščenjak. Ko odstranimo preperino,



Slika 10: V opuščenem rudarskem rovu so zrastle lepi aragonitni kristali ( $\text{CaCO}_3$ ). Razporejeni so žarkovito iz ene točke, zaradi videza jih imenujemo aragonitni ježki.

opazimo sivkasto rjav plastnat lapor s precejšnjo primesjo peska. V njem prevladujejo kremenova zrna nad lističi sljude in karbonatnimi zrni. Če kos kamnine razkoljemo vzporedno s plastmi, lahko opazimo pooglenele ostanke rastlin. Ti so zelo zdrobljeni, kar nakazuje, da so





Slika 11: Fosilna riba: ohranjeni sta obe polovici skoraj popolnega okostja ribe celo z ostanki kože. Riba kostnica še ni zanesljivo določena, vodi se pod imenom *Zeus robustus*, Ramovš je mnenja, da fosilna riba pripada rodu *Lates*.

bili v vodi preneseni na daljšo razdaljo. Poleg rastlinskih ostankov so v kamnini tudi ostanki planktonskih alg, kolkolitov in luknjičark, ki pa so vidni le z mikroskopom. Vsi ti organizmi dokazujejo, da so plasti nastajale v morju. Na nekaterih mestih izven poti lahko v podobnih plasteh najdemo tudi ostanke lusk, posamezne koščice ali celo okostja okamenelih rib. V Slivju, jugozahodno od Olimja, je bila najdena popolnoma ohranjena riba kostnica (Slika 11), ki še ni zanesljivo določena (*Zeus robustus* oziroma *Lates*). Pri kartiranju tega ozemlja jo je odkril mag. Bogoljub Aničić. Shranjena je v geološki zbirki Oddelka za geologijo NTF. Kot najlepši najden fosil je tudi zaščitni znak te poti.

#### Točka 4.3: Črni skrilavi glinavec

V cestnem useku opazujemo temnosivo do črno kamnino (Slika 12). Nastala je z usedanjem zelo drobnih zrn, kakršna ima glina; ker je trdno vezana, jo imenujemo glinavec. Vsebuje veliko organske snovi. Nastajala je v nekoliko globljem morju, verjetno pod pogoji brez kisika, pred približno 230 milijoni let (ladinij).



Slika 12: Črni skrilavi glinavec: temnosiva do črna kamnina, ki je nastala z usedanjem zelo drobnih zrn v velikosti gline.

#### Točka 4.4: Lehnjak

V potočku za nekdanjo žganjekuho lahko opazujemo nastajanje lehnjaka, ki nastaja tam, kjer preko rastlinja teče voda. Rastline odvezemajo vodi ogljikov dioksid in s tem zmanjšujejo njeno topnost (Slika 13). Iz vode se izloča kalcit ali aragonit, ki se useda na rastline, po katerih teče voda. Tako rastlina sama sebi gradi smrtonosni oklep, saj prevleka kalcita onemogoča, da bi svetloba prišla do ra-



Slika 13: Nastajanje lehnjaka se opazuje v potočku za žganjekuho, kjer voda teče preko rastlinja.

stline, zaradi česar ta propade, ostane pa odtis njene oblike. Kalcitna zrna se povežejo in otrdijo in tako nastane porozna kamnina lehnjak ali apneni maček.

#### **Točka 4.5: Odkop v dolomitu**

Manjši odkop v dolomitu so naredili domačini. Ker so številni prelomi kamnino zdrobili, je bila uporabna za malte in nasipavanje cest, pa tudi za čiščenje loncev. Dolomit se drobi v značilne paralelopedne odlomke. Če smo dobri opazovalci, lahko v dolomitu opazimo tudi kockice pirita, ki so ga domačini v preteklosti celo menjavali za zlato.

#### **Točka 4.6: Vulkanska kamnina – diabaz**

Prvič se ob naši poti srečamo z magmatsko kamnino, ki je nastala v obdobju srednjega triasa. Diabaz je predornina; te so se hitro ohlajale, ko so prišle na Zemljino površje, zato večina mineralov ostane v steklasti osnovi, v kateri lahko opazujemo posamezne kristalčke, imenovane vtrošnike. Tu so to avgit in plagioklazi. Avgit je črn ter vsebuje železo, magnezij in aluminij, plagioklazi pa so skupina natrijevih in kalcijevih svetlih glinencev.

Pri vulkanskem izbruhu nastane tudi večja količina prahu, iz katere skupaj s sedimentnimi delci nastane tuf ali sprijet vulkanski prah. Od diabaza se loči po bolj enotni sestavi, vendar pa na tem mestu prevladuje diabaz.

#### **Točka 4.7: Tektonsko zdrobljeni dolomit**

Gre za zelo zanimivo geološko točko. Zdrobljenost kamnine je posledica tektonskega delovanja. Tu je prelomnica med zgornjetriasnim dolomitom ter srednjetriasnim apnencem in glinavcem. Geološke sile, ki se sproščajo ob prelomih in narivih, različno vplivajo na



*Slika 14: Večji kamninski kosi zdrobljene kamnine so zlepljeni z milonitom, ki nastane ob prelomnici, kjer se kamnina močno zdrobi. Kamnini rečemo milonitna breča.*

različne kamnine. Tu lahko opazujemo vpliv na dolomit. V njem nastajajo prelomne ploskve, ki so običajno močno zglajene in jim pravimo tektonska zrcala. Tik ob prelomnici se kamnina močno zdrobi, tako da nastane nekakšna moka ali milonit. Drobci zdrobljene kamnine se lahko sprimejo z milonitom – tako dobimo milonitno brečo (Slika 14).

Opazujemo lahko tudi gnezda rdeče gline, ki je nastala kot posledica preperevanja ob prelomnicah, kjer pronicajoča voda spreminja hitrost. Če je tok počasnejši, ima voda več časa, da raztaplja dolomit. Netopen ostanek obleži na mestu (gline) in je zaradi železa obarvan rdeče.

**Viri:**

- Aničić, B. & Juriša, M. 1985: Osnovna geološka karta SFRJ, List Rogatec 1:100.000. Zvezni geološki zavod Beograd.
- Aničić, B., Ogorelec, B., Kralj, P. & Mišič, M. 2002: Litološke značilnosti terciarnih plasti na Kozjanskem. *Geologija*, 45/1: 213–246.
- Altherr, R., Lugović, B., Meyer, H.-P. & Majer, V. 1995: Early Miocene post-collisional calc-alkaline magmatism along the easternmost segment of the Periadriatic fault system (Slovenia and Croatia). *Mineralogy and Petrology*, 54: 225–247.
- Bavec, M., Budkovič, T., Brenčič, M., Jelen, B., Kumelj, Š., Lapanje, A., Marinko, M. et al. 2005: Overview of Geological Data for Deep Repository for Radioactive Waste in Argillaceous Formations in Slovenia. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 124 p.
- von Blanckenburg, F. J. & Davies, J. H. 1995: Slab breakoff: a model for syncollisional magmatism and tectonics in the Alps. *Tectonics*, 14: 120–131.
- Buser, Stanko. 1979: Osnovna Geološka Karta SFRJ. 1:100.000. Tolmač Za List Celje: L 33-67. Zvezni geološki zavod, Beograd: 72 p.
- Buser, S. 2009: Geološka karta Slovenije 1:250.000. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Celarc, B. & Novak, M., 2011: Geološka karta Boča 1 : 25.000. In: Trček, B., Novak, M., Celarc, B., Šajn, R., Janža, M., Rupnik, M., Vončina, E., Določitev optimalnega ravnotežja med varovanjem in izkoriščanjem podzemnih virov mineralne in izvirske vode – primer razpoklinskega vodonosnega sistema Rogaške Slatine: zaključno poročilo. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 67 p.
- Dercourt, J., Zonenshain, L. P., Ricou, L. E., Kazmin, V. G., LePichon, X., Knipper, A. L., Grandjacquet, C., Sbertshikov, I. M., Geysant, J., Lepvrier, C., Pechersky, D. H., Boulin, G., Sibuet, J. C., Savostin, L. A., Sorokhtin, O., Wesphal, M., Bazhenov, M. L., Lauer, J. P. & Bijou-Duval, B. 1986: Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to Pamir since Lias. *Tectonophysics*, 123: 241–315.
- Fodor, L., Jelen, B., Márton, E., Skaberne, D., Čar, J. & Vrabec, M. 1998: Miocene-Pliocene tectonic evolution of the Slovenian Periadriatic fault: Implications for Alpine-Carpathian extrusion models. *Tectonics*, 17/5: 690–709.
- Fodor, L., Jelen, B., Márton, E., Rifelj, H., Kraljić, M., Kevrić, R., Márton, P., Koroknai, B. & Báldi-Beke, M. 2002: Miocene to Quaternary deformation, stratigraphy and paleogeography in Northeastern Slovenia and Southwestern Hungary. *Geologija*, 45/1: 103–114. <https://doi.org/10.5474/geologija.2002.009>
- Forke, H. C. 2002: Biostratigraphic Subdivision and Correlation of Uppermost Carboniferous/Lower Permian Sediments in the Southern Alps: Fusulinoidean and Conodont Faunas from the Carnic Alps (Austria/Italy), Karavanke Mountains (Slovenia), and Southern Urals (Russia). *Facies*, 47: 201–276.
- Hamrla, M. 1954: Geološke Razmere Ob Severnem Robu Laške Sinklinale Vzhodno Od Savinje. *Geologija*, 2: 118–44.
- Handy, M. R., Ustaszewski, K. & Kissling, E. 2015: Reconstructing the Alps-Carpathians-Dinarides as a key to understanding switches in subducting polarity, slab gaps and surface motion. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, 104: 1–26.
- Heritsch, F. 1941: Nachweis des Oberen Schwagerinenkalkes (Unteres Perm) im Gebiete des Wotsch-Berges bei Pöltschach, südlich von Marburg a.d. Drau. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie, und Paläontologie*, B, 9: 274–279.
- Hinterlechner-Ravnik, A. & Pleničar, M. 1967: Smrekovski andezit in njegov tuf. *Geologija*, 10: 219–237.
- Kázmér, M., Dunkl, I., Frisch, W., Kuhleemann, J. & Oszvárt, P. 2003: The Paleogene forearc basin of the Eastern Alps and Western Carpathians: subduction erosion and basin evolution". *Journal of the Geological Society*, 160: 431–428.
- Kossovaya, O. L., Novak, M., Weyer, D. 2020: New data on lower Permian rugose corals from the Southern Karavanke Mountains (Slovenia). *Bollettino della Società paleontologica Italiana*, 59/3: 261–280.
- Kralj, P. 1996: Lithofacies characteristics of the Smrekovec volcanoclastics, Northern Slovenia. *Geologija*, 39: 159–191. <https://doi.org/10.5474/geologija.1996.007>
- Kralj, P. 1999: Volcaniclastic rocks in borehole Tdp-1/84, Trobni Dol, Eastern Slovenia. *Geologija*, 41: 135–155.
- Kralj, P. 2002: Dacite glassy lava flow from Trlično at Rogatec, Eastern Slovenia. *Geologija*, 45/1: 139–144.
- Kralj, P. 2012: Facies architecture of the Upper Oligocene submarine Smrekovec stratovolcano, Northern Slovenia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 247–248: 122–138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.07.016>

Kuščer, D. 1967. Zagorski terciar. *Geologija*, 10: 5–85.

McPhie, J., Doyle, M. & Allen, R. 1993: *Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Centre for Ore Deposits and Exploration Studies. University of Tasmania, Hobart: 198 p.

Nosan, A., 1989: Hidrogeološke raziskave vodonosnika mineralne vode na širšem območju Rogaške Slatine. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.

Novak, M. 2007. Depositional environment of Upper Carboniferous – Lower Permian in Karavanke Mountains (Southern Alps, Slovenia). *Geologija*, 50/2: 247–268.

Poljak, M. 2017: Geološka karta vzhodnega dela Krške kotline 1 : 25 000 Tolmač = Geological Map of the Eastern Part of the Krško Basin 1:25,000 Explanatory Booklet. Geološki zavod Slovenije.

Ramovš, A. 1959: Paleozojske in mezozojske kamenine v donački dislokacijski coni (Palaeozoic and Mesozoic Rocks in the Donačka Gora Dislocation Zone). *Geografski vestnik*, 31: 97–120.

Strgar, I. 2003: Final geological and mining exploration and reasons for the brown coal mine Laško closure. *Geologija*, 46: 141–158.

Trček, B., Novak, M., Celarc, B., Šajn, R., Janža, M., Rupnik, M. & Vončina, E. 2011: Določitev optimalnega ravnotežja med varovanjem in izkoriščanjem podzemnih virov mineralne in izvirne vode – primer razpoklinskega vodonosnega sistema Rogaške Slatine: poročilo o izvedbi zadnje faze raziskav. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 60 p.



## Gradnja vzhodne cevi karavanškega cestnega predora

Vodje/Guided by: Andrej Ločniškar<sup>1</sup>, Erazem Dolžan<sup>2</sup>, Julija Fux<sup>2</sup>, Jože Ratej<sup>2</sup>, Anže Markelj<sup>3</sup>

<sup>1</sup>DRI upravljanje investicij, d. o. o., Kotnikova ulica 40, 1000 Ljubljana (andrej.locniskar@dri.si)

<sup>2</sup>IRGO Consulting, d. o. o., Slovenčeva cesta 93, 1000 Ljubljana (erazem.dolzan@irgo.si, julija.fux@irgo.si, joze.ratej@irgo.si)

<sup>3</sup>Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana (anze.markelj@geo-zs.si)

### Uvod

Predor Karavanke je enocevni dvosmerni meddržavni cestni predor. Poteka pod 2000 m visokim istoimenskim gorovjem med Republiko Slovenijo in Republiko Avstrijo. Karavanke so v geološki zgodovini nastale kot posledica narivanja dveh tektonskih plošč, zato je njihova geološka zgradba izjemno pestra. Glede na dolžino 7.864 m (na slovenski strani 3.450 m) gre za najdaljši predor v Sloveniji. Že iz časa gradnje Karavanške železniške predora (l. 1906) je bilo znano, da se bodo ob izgradnji avtocestnega predora srečevali s težavnimi geološkimi in geotehničnimi razmerami, ki so vključevale pojave in izbruhe vode, pojave metana in prisotnost močnih deformacij hribine zaradi velikega nadkritja in hribinskih pritiskov. Gradnja prve cevi je potekala v letih 1986–1991 in je uspešno premagala vse zgoraj našteje izzive. Zaradi povečevanja prometa in glede na to, da je predor pomembna prometna povezava med Avstrijo in Slovenijo, se je pojavila pobuda po izgradnji druge predorske cevi. Dela, vezana na pripravo projektne dokumentacije, so intenzivno potekala v letih 2014–2018, ko so bile izvedene tudi dodatne geološke preiskave za potrebe določevanja geomehanskih značilnosti hribine in ugotavljanja strukturne zgradbe na območju nove predorske cevi, projekt pa je moral kljub izgradnji nove cevi predvidevati nemoten potek prometa v obstoječi cevi. Izkop druge predorske cevi se je pričel spomladi 2020 in trenutno še poteka (okvirna stacionaža izkopa je 2.100 m).

Izgradnja druge predorske cevi po skoraj 30 letih je plod dobrega sodelovanja tako med sosednjimi državami kot med inženirji različnih generacij, ki znane izzive rešujejo in obvladujejo na nove načine. Namen predstavitve in ekskurzije je prikazati izhodišča in izzive, s katerimi so se srečevali pri gradnji prve cevi, ter uporabo obstoječega poznavanja razmer, v kombinaciji z razvojem stroke in tehnologije, ki omogoča uspešno spopadanje s trenutnimi izzivi gradnje.

### Predstavitve projekta z ogledom stalne zbirke v AC bazi na Hrušici (Točka 1)

#### *Strukturno geološke razmere na območju predorskih cevi*

Trasi predorskih cevi prečita območje med Savsko prelomno cono na jugu in Periadritskim linamentom na severu. Geometrija strukturnih elementov in položaj stratigrafskih enot kažeta na več tektonskih faz. Najpogostejše strukture, ki so hkrati najmlajše, so ocenjene kot post srednjemiocenske starosti z nekaterimi indici na širšem območju, da gre za strukture, ki so aktivne še v kvartarju. Ob prelomih je najbolj izražena zmična komponenta premika (desni zmik ob Savskem prelomu) ter ob nekaterih segmentih prelomov tudi reverzen in normalen premik. Prevladujejo prelomne ploskve s strmim naklonom in smerjo severozahod–jugovzhod ter prečno usmerjenostjo (severovzhod–jugozahod).

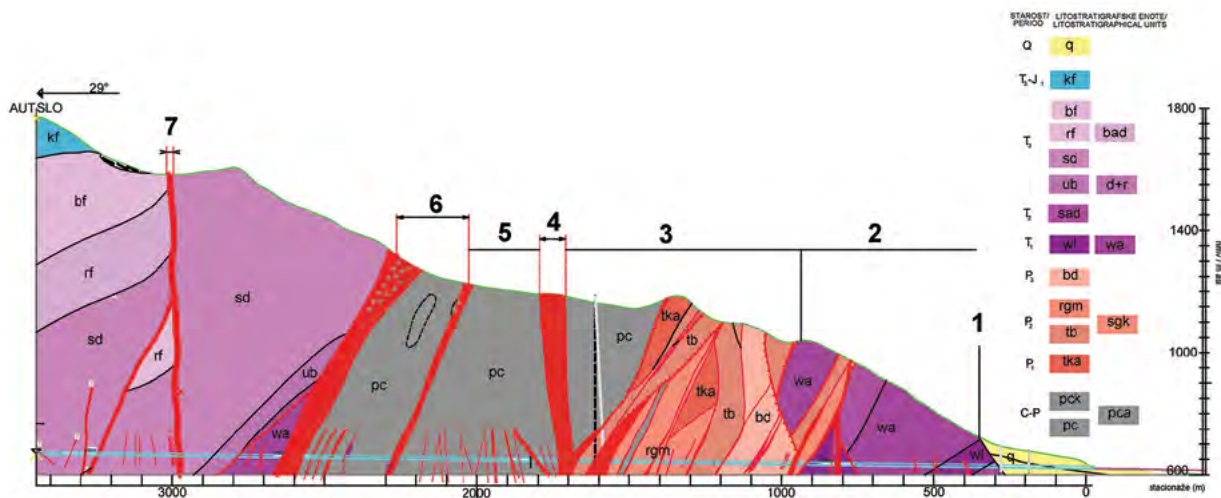
Kompleksno strukturno zgradbo opazujemo med izgradnjo vzhodne cevi, ki je le dobrih 60 m oddaljena od zahodne predorske cevi. Kljub popolni geološki dokumentaciji iz faze gradnje prve cevi ter rezultatom novih raziskav in študij v koridorju načrtovane vzhodne cevi na nekaterih odsekih prihaja do manjših odstopanj od pričakovanj. Glavne strukturne značilnosti sledijo prognozi, do manjših odstopanj prihaja predvsem zaradi strižno deformiranih tektonskih lusk znotraj blokov permokarbonskih kamnin. Geometrija stikov ter komponenta premika med sosednjimi bloki se spreminjata na kratkih razdaljah, kar lahko opazujemo tudi v izredno majhnem merilu, ki predstavlja npr. izkop čela kalote. Značilne so tudi lateralne spremembe v stratigrafskih zaporedjih kot posledica sinsedimentne tektonike in sprememb pogojev iz časa sedimentacije. Natančneje predstavljamo strukturno geološke značilnosti na slovenski strani predora.

Kamnine, ki se pojavljajo na širšem območju, so karbonske do zgornje triasne starosti, pri čemer gre za klastične in karbonatne plastnate in masivne kamnine. Na površju jih pokrivajo ledeniški sedimenti in sedimenti

pobočnih procesov. Pri analizi strukturnih razmer med gradnjo v vzhodni cevi za korelacijo stratigrafskih enot, položaja in stikov uporabljamo enako poimenovanje in razdelitev kamnin v litostratigrafske enote kot pri gradnji zahodne cevi.

Pomembnejši strukturni elementi ter položaj litostratigrafskih enot so prikazani na Sliki 1.

Litostratigrafske enote na obravnavanem območju (Slika 1): **Pc; pck, pca** /ZG. KARBON-SP. PERM/: temno siv in črn glinast skrilavec in meljevec, siv kremenov peščenjak; siv kremenov konglomerat; temno siv apnenec. **Tka** /SP. PERM/: Trogkofelski apnenec; masiven bel, svetlo siv in rožnat apnenec. **Tb** /SR. PERM/: Trbiška breča; menjavanje apnenčeve breče z vezivom rdečega glinavca, meljevca in glinavcev ter kremenovega konglomerata. **Sgk** /SR. PERM/: kremenov konglomerat, siva kremenova breča in peščenjak. **Rgm** /SR. PERM/: Grödenska formacija – rdeč skrilav glinavec. **Bd** /ZG. PERM/: Belerofonski dolomit – siv skladovit dolomit. **Wa**; **wl** /SP. TRIAS/: Werfenska formacija: temno siv ooliten apnenec in dolomit, temno siv laporen apnenec, žilice sadre; siv



Slika 1: Poenostavljen prerez vzdolž trase vzhodne predorske cevi s prikazom strukturno geoloških elementov in položajem litostratigrafskih enot.

sljudni peščenjak, rdeč in zelen meljevec in dolomit z lečami sadre. **Sad** /SR. TRIAS/: Sarlski dolomit – svetlo siv plastnat dolomit. **Ub** /SR. TRIAS/: Ukovška breča – siva apnenčeva breča in konglomerat. **d+r** /SR. TRIAS/: Buchensteinska formacija, dolomit z rožencem. **Sd** /SR.-ZG.TRIAS/: Schlernska formacija – močno razpokan svetlo siv dolomit. **Rf** /ZG. TRIAS/: Južnoalpska Rabeljska formacija – menjavanje ploščatih apnencev, laporastih apnencev in laporovcev. **Bad** /ZG. TRIAS/: Baški dolomit – tankoplastnati dolomiti z roženci. **Bf** /ZG. TRIAS/: Frauenkogel fm. / Baba formacija – ploščati apnenci z roženci. **Kf** /ZG. TRIAS-SP. JURA/: Hahnkogel fm. / Klek formacija – ploščati apnenec (mudstone). /KVARTAR/: ledeniški in pobočni sedimenti.

Pomembnejše tektonske strukture so prikazane na Sliki 1:

- **1** Stik werfenske formacije in kvartarnih sedimentov – aktivnost in tektonski značaj nista neposredno dokazana
- **2** Sinklinalna/antiklinalna zgradba z gubami več redov v zaporedju plasti werfenske formacije in anizijskega dolomita
- **3** Tektonske luske relativno spuščeni in dvignjeni strižno deformiranih tektonskih lusk kamnin paleozojske starosti (jugozahodno krilo Mlinške prelomne cone)
- **4** Mlinška prelomna cona (s smerjo severozahod–jugovzhod)
- **5** Serija tektonskih lusk v severovzhodnem krilu Mlinške prelomne cone
- **6** Hrušiška prelomna cona
- **7** Tektonski stik schlernskega dolomita in kamnin karnijske starosti (Goliški prelom)



### Gradnja prve predorske cevi

Ker v Sloveniji in takratni Jugoslaviji na področju predorogradnje nismo imeli bogatih izkušenj, smo se tako v projektni kot izvedbeni fazi povezali s strokovnjaki iz sosednje Avstrije. Ne nazadnje je bil predor grajen po novi avstrijski predorski metodi s postopkom gibkega primerne podporja iz armiranega brizganega betona, jeklenimi lokovi in radialnimi sidri, ki so dosegala dolžino do 18 m. Faze gradnje so potekale v treh nivojih, in sicer kaloti, stopenici in talnem oboku. Izkop 3500 m predora je na slovenski strani potekal skoraj 4 leta. Pri gradnji predora smo se srečevali s številnimi težavami, ki so jih povzročali:

- močno deformabilni permokarbonski skrilavci (deformacije tudi do 1500 mm),
- območja predora s prisotnostjo nabreklih mineralov (anhidrit),
- prisotnost številnih prelomnih con popolnoma porušenega materiala,
- prečenje zaprtega vodonosnika s tlakom več kot 15 barov in izbruhom vode več deset m<sup>3</sup>/s,
- stalna prisotnost eksplozivnega plina metana.

Tudi po izgradnji predora smo bili na slovenski strani, ki ima na podlagi skupne ocene bistveno zahtevnejše geotehnične pogoje, v 30 letih soočeni s petimi sanacijskimi posegi (Slika 2). Ti so pomenili velik tehnični in organizacijski izziv, saj zaradi sanacij predora ni bilo mogoče zapreti (potekali so pri polovični zaporji prometa). Vsaka sanacija, ki je trajala 6 mesecev in je obsegala do 159 m



Slika 2: Kalota na stacionaži TM3020 m po vdoru vode in razbrebenilna vrtina za zmanjšanje vodnega pritiska (Mikoš in sod., 1991).

dolg odsek, je bila usmerjena v izdelavo novega oziroma poglobitev obstoječega talnega oboka.

Po tridesetih letih smo se zaradi evropske direktive o varnosti v cestnih predorih lotili gradnje vzhodnega dvojčka predora Karavanke.

#### **Priprava na gradnjo druge predorske cevi**

Čprav je med gradnjo zahodne predorske cevi potekala skrbna geološka in geotehnična spremljava, na podlagi katere je bil izdelan natančen vzdolžni geološki prerez in floris predora, je bilo v fazi priprave projektne dokumentacije za izgradnjo vzhodne predorske cevi ugotovljeno, da manjkajo predvsem geotehnični parametri, ki podajajo lastnosti hribin. Ker je morala biti obstoječa cev med gradnjo v obratovanju, ne glede na geotehnične izzive, ki bi se lahko pojavili ob izkopu vzhodne cevi, je bila previdnost pri projektiranju toliko bolj pomembna. Pripraviti je bilo potrebno več modelnih izračunov, s katerimi smo

preverili možne scenarije izkopa ob znanih tveganjih, kar pa brez skrbno določenih geotehničnih parametrov hribin ni bilo mogoče. Leta 2016 so bile tako izvedene dodatne geološke preiskave, katerih naloga je bila:

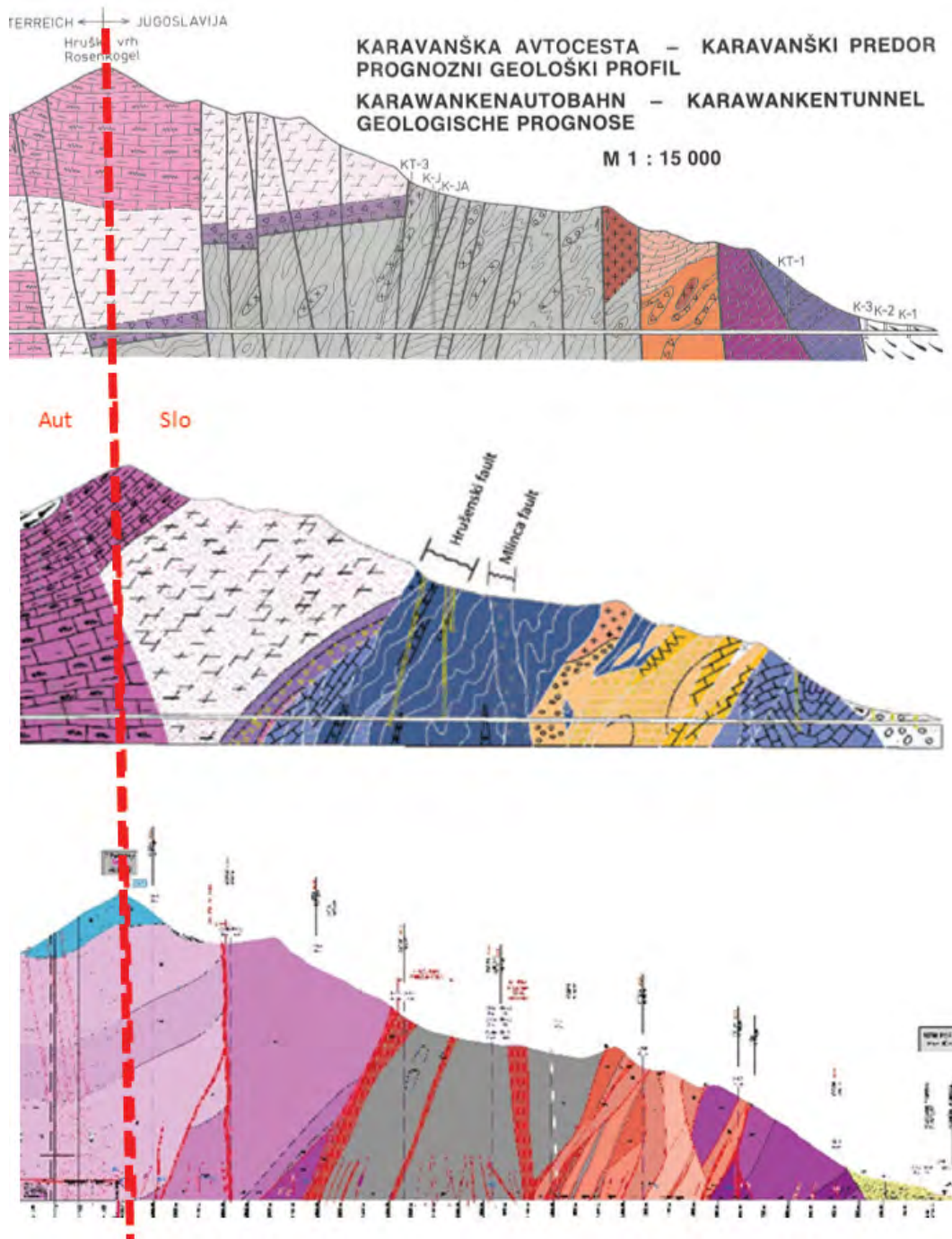
1. ugotoviti potek že znanih geoloških struktur na območju vzhodne cevi,
2. določiti geotehnične parametre hribine in
3. opredeliti obseg znanih tveganj (vdori vode, hribinski pritiski, prisotnost metana) za načrtovanje ukrepov, ki bodo omogočali njihovo obvladovanje.

Izvedenih je bilo 21 vrtin s spremljajočimi terenskimi in laboratorijskimi preiskavami: 4 vrtine s površja na območju kvartarnih sedimentov, 1 globoka vrtina s površja na območju zahtevnih permokarbonskih kamnin in 16 horizontalnih vrtin, vrtanih iz obstoječih prečnikov v smeri vzhodne predorske cevi (Slika 3). Dela so pomenila poseben izziv, saj so na površini potekala v visokogorskih raz-



Slika 3: Izvedba vrtanja v prečnikih prve cevi.





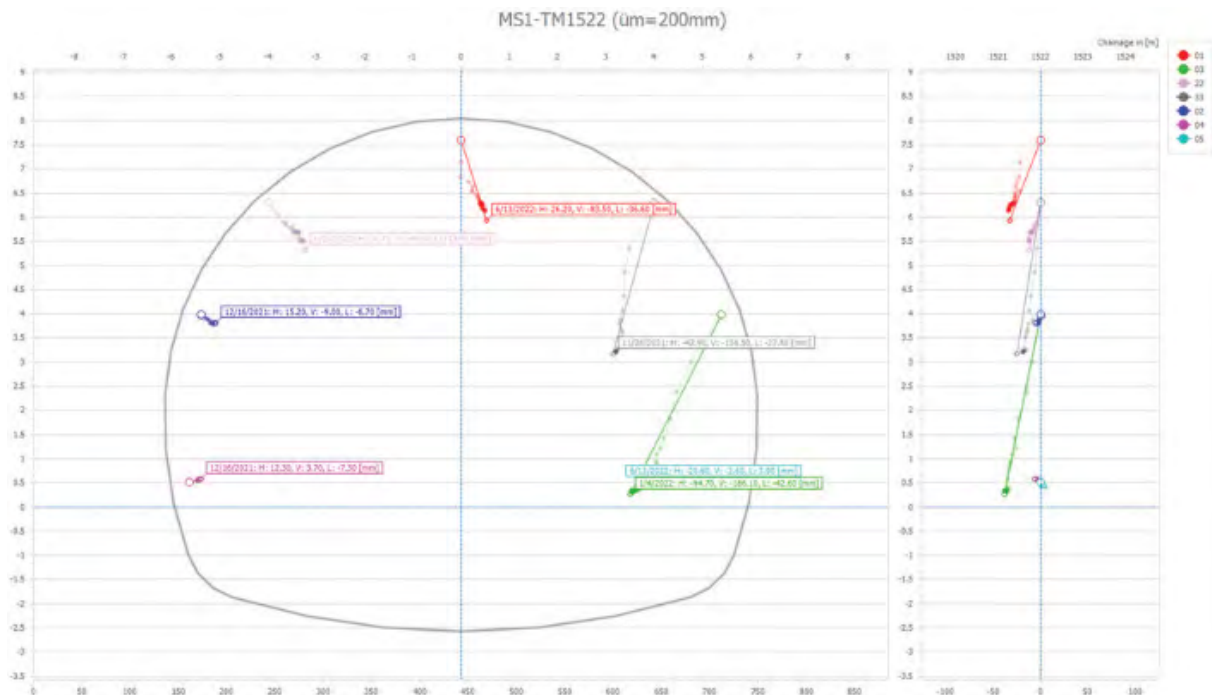
Slika 4: Primerjava razvoja geoloških struktur v vzdolžnem prerezu predora: fazi IDP in PZI vzhodna cev ter DPG/PZI zahodna cev.

merah, dela v predoru (v obstoječih prečnikih) pa hkrati s prometom. Obstoječi prečniki so bili majhni, zato so bile potrebne specializirane vrtalne garniture in ekipe, da je delo potekalo nemoteno, ter posebni protokoli, ki so ekipam omogočali varen dostop do delovišča in iz njega, ne da bi s tem bistveno vplivali na prometni tok (Slika 4).

### Gradnja druge predorske cevi

Tudi gradnja druge predorske cevi poteka po metodi NATM, kjer gre za sekvenčno izvedbo del; tako je vplive izkopa in s tem spremembo napetostnega stanja v hribini mogoče videti šele, ko izkop preide izven vplivnega območja, ki običajno znaša 1 do 2 premera predora za izkopnim čelom. Časovni razvoj pomikov je odvisen od več dejavnikov (geotehnični pogoji, dolžina izkopnega koraka, tip podpiranja, zapiranja talnega oboka, tehnološke discipline izvajalca ...) (Slika 5). Pri projektu je bil uveden profil geotehničnega nadzornika in geotehničnega vode-

nja gradnje, kar je novost. S pomočjo geološke in hidrogeološke spremljave lahko geotehnični nadzornik oceni, ali je primarno podgradnjo mogoče optimizirati oziroma povečati, da bi dosegli pričakovan vpliv na vplivnem območju izkopnega čela. Izkušnje, pridobljene pri tehnični spremljavi v sklopu gradnje vzhodne cevi Karavanke, kažejo, da je s pomočjo sprotnega analiziranja pridobljenih podatkov mogoče ažurno izvajati primerjavo dejanskega stanja s projektom in s tem optimizirati primarno podgradnjo, kar omogoča hitro ukrepanje pri izvedbi podzemnih del v zahtevnih geotehničnih pogojih gradnje. Prav tako je pri tem projektu novost digitalizacija podatkov in njihova stalna dostopnost. Izvajamo digitalne geološke popise, ki skupaj s fotogrametričnim snemanjem izkopnih čel omogočajo izdelavo 3D fotogrametričnega modela izkopa (Slika 6). Podatki, zbrani v okviru geološke spremljave izkopa vzhodne cevi, so tako urejeni in zbrani na način, ki omogoča tako sprotno interpretacijo kot tudi kasnejše



Slika 5: Primer merskega profila (TM 1522) s petimi merskimi točkami v kaloti in stopnici.



Slika 6: Fotogrametrični model izkopa kalote vzhodne cevi pri predorskem metru 637 z vrisanimi geološkimi strukturami in brez njih.

poglobljene analize. Geotehnične meritve kontinuirano izvajamo v vzhodni in zahodni cevi, interval meritev se spreminja glede na geologijo, rezultate meritev in oddaljenost izkopa od merskega profila. Spremljava služi tudi napovedovanju napetostnih pogojev hribine pred izkopnim čelom in za njim, prilagajanju podpornih ukrepov in varovanju obstoječe predorske cevi, ki je med gradnjo vzhodne cevi v obratovanju. Z uporabo centralnega programa za obdelavo, vizualizacijo in interpretacijo je zagotovljen pregled nad vsemi meritvami.

Hidrogeološka spremljava se je za potrebe geotehnike zaradi časovne odvisnosti hidrogeoloških parametrov pričela

že pred pričetkom gradnje: tako so bila v fazi preiskav za vzhodno cev predora vzpostavljena merska mesta v obliki horizontalnih piezometričnih vrtin, v katerih so bili merjeni hidrostatski tlaki ob zaprtih in pretoki ob odprtih vrtinah. Poleg tega so bili več hidroloških let pred pričetkom gradnje merjeni iztoki iz drenažnih vrtin ter spremljani iztoki na vodnih virih v predoru. V času gradnje poleg zahodne cevi predora spremljamo še vse iztoke v vzhodni cevi (Slika 7), torej tako na čelu kot tudi na posameznih dolgotrajnejših iztokih vzdolž že izkopanega dela predora.

Poleg tega smo za potrebe vpliva gradnje na elemente okolja že pred (in med) gradnjo spremljali kemijske in



Slika 7: Iztok iz zahodne cevi (levo) in vzhodne cevi (desno) med gradnjo vzhodne cevi predora.

izotopske parametre na vodnih virih v predoru ter kot del čezmejnega projekta zaščite dokazov še na izvirih in vodotokih nad predorom.

Pri gradnji prve cevi je bilo treba računati s precej višjimi hidrostatskimi tlaki kot pri gradnji vzhodne cevi. Tako so bili tlaki na območju schlernskega dolomita ocenjeni na približno 650 m nad predorom, kar je ob izkopu preko Goliškega preloma povzročilo izjemen vdor vode, zaradi katerega je bilo treba izvesti obvodni rov, v katerem je danes zajetje pitne vode. Tako kot zahodna cev že 30 let deluje kot horizontalna drenaža, ki je trajno znižala hidrostatske tlake na območju gradnje vzhodne cevi, tudi slednja vpliva na iztoke iz obstoječe cevi. Tak primer je vodni vid na stacionaži 315 m v zahodni cevi, iz katerega se je po preboju relevantnega hidrogeološkega stika pretežen del voda preselil v novoodkopano vzhodno cev predora. Tudi pri naslednjem območju večjih dotokov v zahodni cevi, stacionaži približno 740 m, so se dotoki v preteklosti dodatno izvedene drenažne vrtine praktično ustavili. Na območju zajetja pitne vode na stacionaži okoli 3000 m je predvideno dodatno območje zajema tudi v vzhodni cevi, pri čemer se bo pitna voda odvajala po vodovodu skozi novo predorsko cev.

Poleg drugačnih hidrogeoloških pogojev pri gradnji prve cevi je bilo v preteklosti na voljo bistveno manj merskih mest podzemne vode kot danes, zato je odvodnja vzhodne cevi potekala ob nižji stopnji napovedljivosti in posledično ob obsežnejših ukrepih, ko so se dotoki že pojavili. Pri gradnji zahodne cevi dajemo večji poudarek preventivnemu delovanju, pri čemer skušamo tlake podzemne vode skozi razpoložljive odvodnike dodatno zniževati že pred čelom, tako da dela pri odkopu potekajo v bolj nadzorovanih pogojih.

### Ogled območja portala, lokacij viškov materiala in predora (Točka 2)

---

Ogled bo razdeljen na dve točki:

1. Ogled portalnega območja in površine, spremljajočih AC objektov, ki se gradijo v okviru navezave na novo predorsko cev, ter lokacije viškov materiala, kamor odlagamo višek izkopa.
2. Ogled gradnje nove predorske cevi.

---

#### Viri:

Mikoš, B. in sod., 1991: Predor Karavanke : geologija in geotehnika. Mladinska knjiga, Ljubljana: 134 p



## Upravljanje ranljivih teles podzemne vode na primeru Dravskega polja

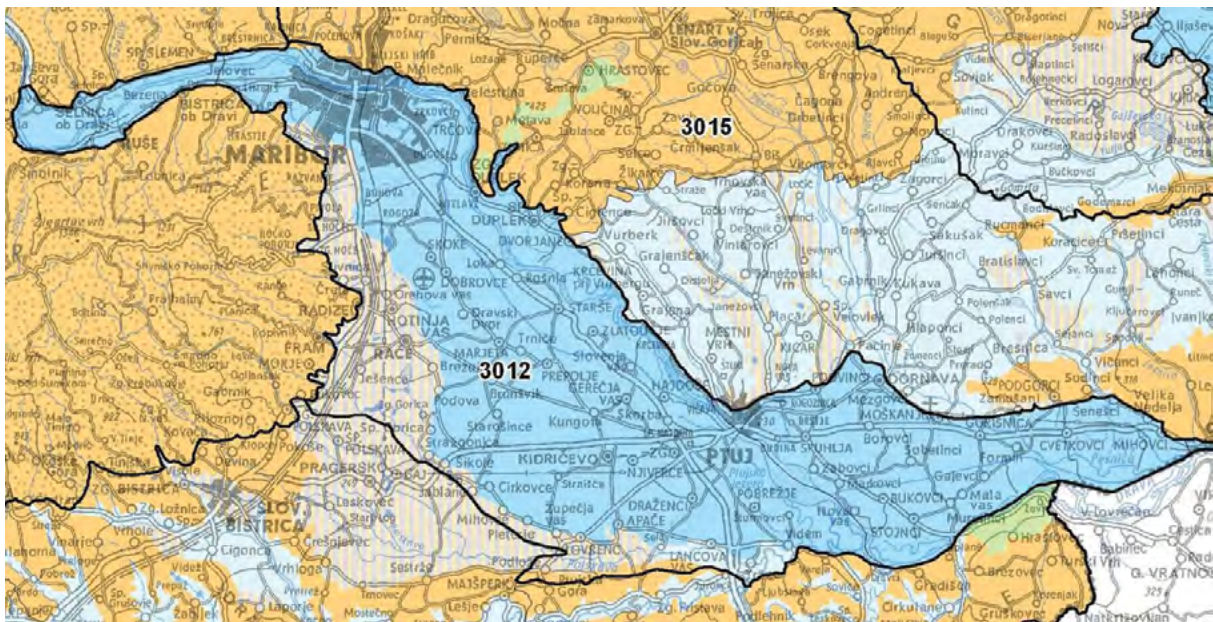
Vodje/Guided by: Janko Urbanc, Nina Mali, Sonja Cerar

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana (janko.urbanc@geo-zs.si, nina.mali@geo-zs.si, sonja.cerar@geo-zs.si)

### Uvod

Aluvialni vodonosnik Dravskega polja zaradi svojih ugodnih hidrogeoloških lastnosti, kot sta dobra prepustnost in velika debelina zasičene cone, velja za enega perspektivnejših medzrnskih vodonosnikov z vidika oskrbe s pitno vodo v Sloveniji (Slika 1). Po drugi strani pa prav zaradi teh lastnosti Dravsko polje spada med bolj ranljive vodonosnike za onesnaženje podzemne vode. Slabo kemijsko stanje vodonosnika Dravskega polja povzroča previsoke koncentracije nitratov in pesticidov. Posebej problematičen je južni del vodonosnika, kjer je tudi črpališče Skorba, ki s pitno vodo napaja mesto Ptuj z okolico.

Problematico onesnaževanja spodnjega pliokvartarnega vodonosnika predstavlja naraščanje koncentracij nitratov v podzemni vodi. Tudi pri podzemni vodi, ki jo črpajo iz Vrbskega platoja, največjega črpališča v regiji, se občasno pojavljajo težave s kakovostjo vode. V zadnjih letih je bilo tu kot primer dobre prakse izvedenih nekaj projektov in aktivnosti za zaščito kakovosti pitne vode, hkrati pa so ti pokrivali tudi celotno Dravsko in Ptujsko polje. Poleg onesnaženja podzemne vode z nitrati in pesticidi je prisotno onesnaženje z nekaterimi anorganskimi snovmi, ki izhajajo pretežno iz lokalnih virov obremenitev in jih zato



Slika 1: Vodonosnik Dravskega polja

pogosto ne zaznamo kot značilne parametre obremenitev v toku podzemne vode Dravskega polja. Primer lokalnih obremenitev predstavlja zaprto odlagališče nenevarnih odpadkov Rdeče blato, kjer se od leta 2015 izvaja obratovni monitoring stanja podzemne vode.

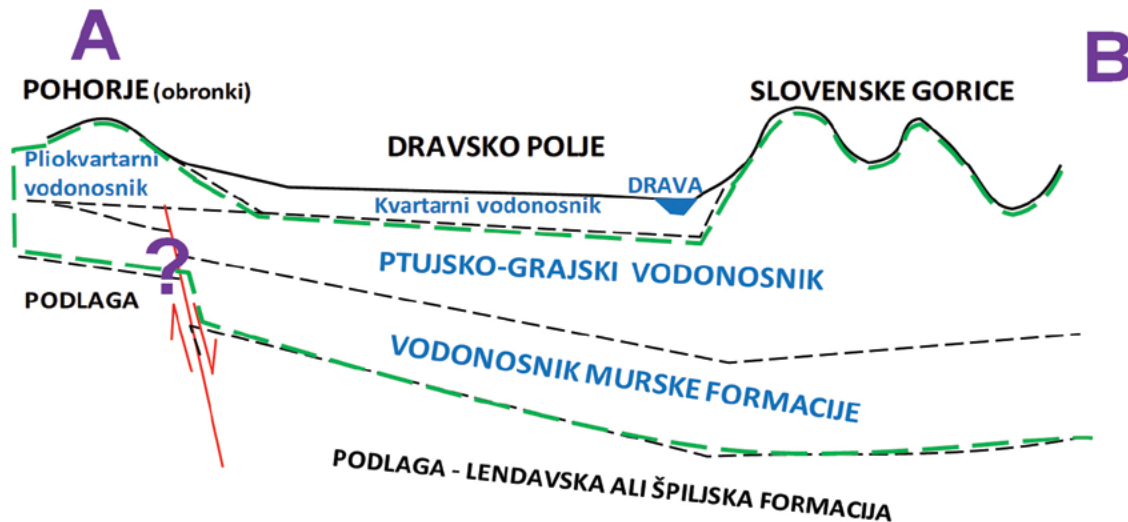
### Hidrogeološki opis vodonosnika Dravskega polja

Dravsko polje je poplavna ravnica reke Drave, ki je zapolnjena s holocenskimi in pleistocenskimi prodnimi, peščenimi in glinasto meljastimi naplavinami (Žlebnik, 1982). Dravsko polje se prične na severni strani z urbanim območjem mesta Maribor. Proti jugu se razprostira pretežno kmetijsko območje z manjšimi zaselki. Dravsko polje se konča na jugovzhodni strani pri Ptujju ob reki Dravi, kjer se proti vzhodu prične Ptujsko polje. Na območju Dravskega polja so trije vodonosniki (Slika 2; Klasinc, 2013). Prvi vodonosnik je prodno peščen zasip Drave – aluvialni vodonosnik, ki ga sestavljajo debelozrnati terestrični sedimenti (prod in

pesek) kvartarne starosti. Drugi vodonosnik je vodonosnik v terciarnih sedimentih, ki ga sestavljajo pesek, prod, melj, glina in lapor terciarne starosti. Tretji vodonosnik je termalni vodonosnik v globljih terciarnih sedimentih in na predterciarni podlagi. Sestavljajo ga pesek, prod, melj, glina ter metamorfne in mestoma karbonatne kamnine.

Vsi trije vodonosniki so v navpični smeri razviti praktično na celotnem območju. Prvi, aluvialni vodonosnik je na površini in do globine približno 32 m, drugi, terciarni vodonosnik je v splošnem od globine 40 m naprej ter najpogosteje do globine približno 200 m, tretji, termalni, pa je najgloblje, to je tudi do 1000 in več metrov globoko. Razporeditev onesnaženj po globini prvega vodonosnika je dokaj zvezna. Del vodnega telesa s slabim kemijskim stanjem podzemne vode je v aluvialnem vodonosniku.

Oskrba s pitno vodo se danes že v veliki meri dopolnjuje s podzemno vodo iz drugega vodonosnika. Razlog je slaba kakovost vode v zgornjem vodonosniku. Razpoložljive za-



Slika 2: Konceptualni model vodonosnikov Dravskega polja (Klasinc, 2013).

loge v Ptujskograjskem terciarnem vodonosniku so veliko bolj omejene in ne morejo nadomestiti vodnih količin iz zgornjega vodonosnika. Poleg tega že obstaja resna nevarnost prodora onesnažene vode iz aluvialnega vodonosnika v terciarni vodonosnik zaradi padca hidravličnega tlaka ob izkoriščanju vode iz terciarnega vodonosnika.

Ena najpomembnejših opazovalnih postaj za spremljanje sprememb koncentracij nitratov v podzemni vodi zgornjega vodonosnika Dravskega polja je črpališče Skorba (Slika 3). Poleg zveznih meritev koncentracij nitratov v podzemni vodi z UV\_VIS spektrometrom so na postaji (tudi na vseh ostalih) nameščeni še merilniki nivoja, temperature in električne prevodnosti podzemne vode ter mala meteorološka postaja z zveznimi meritvami temperature zraka in količine padavin. Na vsaki postaji delujejo tudi TDR merilniki za merjenje vsebnosti vode v tleh in temperature tal. Podatki meritev se prek GSM povezave prenašajo v bazo podatkov na Geološkem zavodu Slovenije, kjer jih ustrezno obdelamo in pripravimo za nadaljnjo uporabo.



Slika 3: Postaja za spremljanje vsebnosti nitratov v podzemni vodi Skorba V-2.

## Oskrba s pitno vodo v Mariboru

Maribor je drugo največje mesto v Sloveniji in leži v severovzhodnem delu Slovenije, vzdolž najvzhodnejšega dela Alp, na aluvialnih sedimentih reke Drave. Z leti je zaradi urbanizacije in razvoja industrije onesnaženje podzemne vode postalo nezanimljiv problem. Mariborski vodovod je regionalni sistem vodooskrbe za Maribor, Lenart, Pehnico, Ruše, Kungoto, Duplek, Šentilj in delno Radgono. Vsak dan se iz 26 vodnjakov na sedmih črpališčih (Vrbanski plato, Bohova, Betnava, Dobrovce, Ruše, Selniška dolina in Šentilj-Ceršak) v 1.600 km dolg vodovodni sistem načrpa med 35.000 m<sup>3</sup> in 40.000 m<sup>3</sup> pitne vode.

Približno 60 % pitne vode, ki jo potrebuje mesto Maribor, se črpa iz napajalnega območja Vrbanskega platoja na severnem obrobju mesta. V preteklosti je bila podzemna voda Vrbanskega platoja onesnažena s kromom. Zato so že leta 1986 uvedli stalno umetno napajanje s podzemno vodo z Mariborskega otoka. To napajanje povzroča lokalni dvig nivoja podzemne vode izven mesta in s tem preprečuje vdor onesnažene vode. V času upravljanja s tem vodnim virom je postalo jasno, da je nadaljnje težave in stagnacijo vodooskrbe mogoče preprečiti le z intenzivnim, pospešenim vlaganjem v nov RAZVOJNI PROGRAM, ki temelji na analizah in preiskavah, upoštevajoč obstoječe spremembe, zagotavljanje kakovosti vode in racionalizacijo rabe energije. S tem razvojnim programom smo poskušali rešiti problematiko kakovosti in količine pitne vode ter problem naraščajočih izgub vode v sistemu. Umetno napajanje 75 l/s z Mariborskega otoka sčasoma ni več zagotavljalo dovolj kakovostne zaščite vode z Vrbanskega platoja. Posledično se je količina napajanja (umetno bogatenje) podvojilo (150 l/s). Količina napajanja trenutno znaša 130 l/s.

Kljub temu ostaja problem kakovosti pitne vode, predvsem vode z Vrbanskega platoja, še vedno nerešen. Razlogi so v vodnih virih, ki ležijo pod mestom in v naraščajočem tranzitnem prometu v tej regiji. Obstaja še en problem, in

sicer je talni monitoring pokazal nanos neugodnega mulja na levem bregu Drave ob Mariborskem otoku. Statični potencialni nivo vode v akumulaciji Vrbanski plato ob Dravi je upadel. Širjenje onesnažene podzemne vode iz vseh delov mesta postaja vse bolj neugodno. Načrt Mariborskega vodovoda vsebuje maksimalno zaščito vodnega vira na Vrbanskem platoju, ki daje ustrezno izhodišče za srednjeročni načrt zmanjševanja odvisnosti od enega samega vodnega vira z aktiviranjem dodatnega ustreznega vodnega vira, npr. v Selniški dobri.

V okviru zgoraj navedene problematike Mariborskega vodovoda so v preteklosti potekale tri t.i. raziskovalne akcije:

#### ***Vodovarstvena območja podzemne vode***

Leta 1991 je bilo onesnaženje s kloriranimi topili na območju Maribora kritično. Onesnaženje se je pomikalo iz mesta proti črpališču. Ugotovljeno je bilo, da so potencialni onesnaževalci aktivni predvsem na desnem bregu Drave, kar vodi do možnosti pretakanja podzemne vode pod Dravo z desnega na levi breg. Vodovarstvena območja Vrbanskega platoja so segala do Drave. Z leti se je gladina podzemne vode zmanjšala. Izkoriščanje vodnih virov ima za posledico širši vpliv črpanja vode iz vodnjakov, ki seže izven takratnih varstvenih območij. Varstvena območja podzemne vode so bila novelirana za Vrbanski plato ter za območja napajanja Limbuške dobave, Pohorje in desni breg Drave na vzhodu. V ta namen je bil implementiran matematični model. Modelirani rezultati kažejo, da se celotno območje od Limbuške dobave do Dravskega polja v glavnem napaja iz Drave: največji delež vode se na Limbuški dobri napaja iz akumulacije na Mariborskem otoku, manjši del na Meljskem jezu, najmanjši del pa na območju Mariborskega otoka. Precejšnja količina podzemne vode odteka tudi iz napajalnih območij na Pohorju in Dravskem polju. Na vzhodu voda priteka do črpališča tudi pod Dravo. Interpretacija toka podzemne vode na podlagi kemijskih in izotopskih analiz je potrdila rezultate matematičnega modela. Potrdila se je domneva, da se vplivni radij depresije širi proti vzhodu pod Dravo, zato

so varstvena območja v tej smeri določena do razvodnice napajanja na območju Pohorja. Glede na to, da voda iz vodnjakov na Mariborskem otoku večinoma izvira iz Limbuške dobave, je bila v varstveno območje podzemne vode vključena tudi celotna Limbuška dobava s svojim napajalnim območjem.

#### ***Raziskave za umetno napajanje in zaščito podtalnice na Vrbanskem platoju***

Na podlagi izkušenj črpanja pitne vode za Maribor z Vrbanskega platoja, dolgoletnega umetnega bogatenja podzemne vode s črpanjem vode z Mariborskega otoka, obsežnih hidrogeoloških raziskav vodonosnika in kemijskih analiz podzemne vode je dovolj podatkov in izkušenj, da lahko sklepamo:

- Varovanje in povečanje zmogljivosti črpališča Vrbanski plato je neizogibno povezano z umetnim napajanjem podzemne vode.
- Umetno obnavljanje podzemne vode, če je tehnološko in količinsko pravilno izvedeno, lahko v celoti prepreči onesnaženje podzemne vode, ki prihaja z območja mesta ter z desnega in levega brega Drave.
- Na voljo je dovolj hidrogeoloških podatkov o pretoku podzemne vode in neprepustni podlagi vodonosnika, ki sega od Limbuške dobave, preko Mariborskega otoka in Vrbanske planote do območja pod Mariborom na obeh bregovih.

Raziskovalci, predlagatelji projekta, menijo, da raziskava ponuja zanesljivo in kratko pot do želenih rezultatov: povečanja zmogljivosti in večje zaščite podzemne vode pred onesnaženjem.

#### ***Določitev vodnih zalog in varstvenih pasov podzemne vode v kvartarnih skladih Selniške dobave***

Problem črpanja zadostnih količin kakovostne vode iz vodonosnika Vrbanskega platoja odpira še eno vprašanje, in sicer črpanje dodatnih količin vode v primeru okoljskih nesreč. Od leta 1993 se raziskuje vodonosnik Selniške dobave, 20 km od Maribora, gorvodno ob Dravi. Dose-



danji rezultati raziskav so potrdili, da je ta vodonosnik primeren nadomestni vodni vir za oskrbo Maribora z okolico. Glavni vodonosnik leži v prodnih nanosih stare struge Drave, ki poteka vzporedno s sedanjo strugo. Vodonosnik se napaja iz Drave, s padavinami in s pronicanjem iz vodonosnika zgornje terase. V okviru preiskave so bile opravljene geoelektrične meritve za določitev podlage, postavljenih osem piezometrov, izdelana testna vrtina, izmerjene gladine podzemne vode in odvzeti vzorci za kemijske analize. Ocenjujemo, da je nasičena cona glavnega vodonosnika debela približno 12 m, prekrivna plast znaša 30 m, prepustnost vodonosnika pa je  $8 \times 10^{-3}$  m/s. Za gradnjo vodnjakov je najprimernejše območje gozdna to, kar je ugodno za zaščito podzemne vode, predvsem v bližini črpališča. Kemijske analize vode kažejo, da je voda primerna za javno oskrbo. Rezultati raziskav kažejo, da je vodonosnik Selniške dobrave primeren dodatni vodni vir za oskrbo Maribora.

Iz navedenih dejstev je razvidno, da obstajajo različni pristopi k reševanju problemov vodooskrbe Maribora. Na podlagi preiskav bo treba čim prej izbrati najbolj zadovoljivo rešitev za Mariborčane. Območja okoli črpališč Mariborskega vodovoda se intenzivno urbanizirajo, kar povečuje problem učinkovite zaščite kvartarnih nahajališč v neposredni povezavi z Dravo. Povečano onesnaženje lahko torej pričakujemo tudi v prihodnje. Čeprav bo stanje na teh črpališčih izboljšano s čiščenjem vode (različna onesnaževala zahtevajo različne postopke čiščenja, zato je delovanje čistilnih naprav tehnološko zahtevno), bo treba poiskati nov vodni vir, upoštevajoč razvoj mesta in njegove potrebe po pitni vodi. Najprimernejše območje je Selniška dobrava.

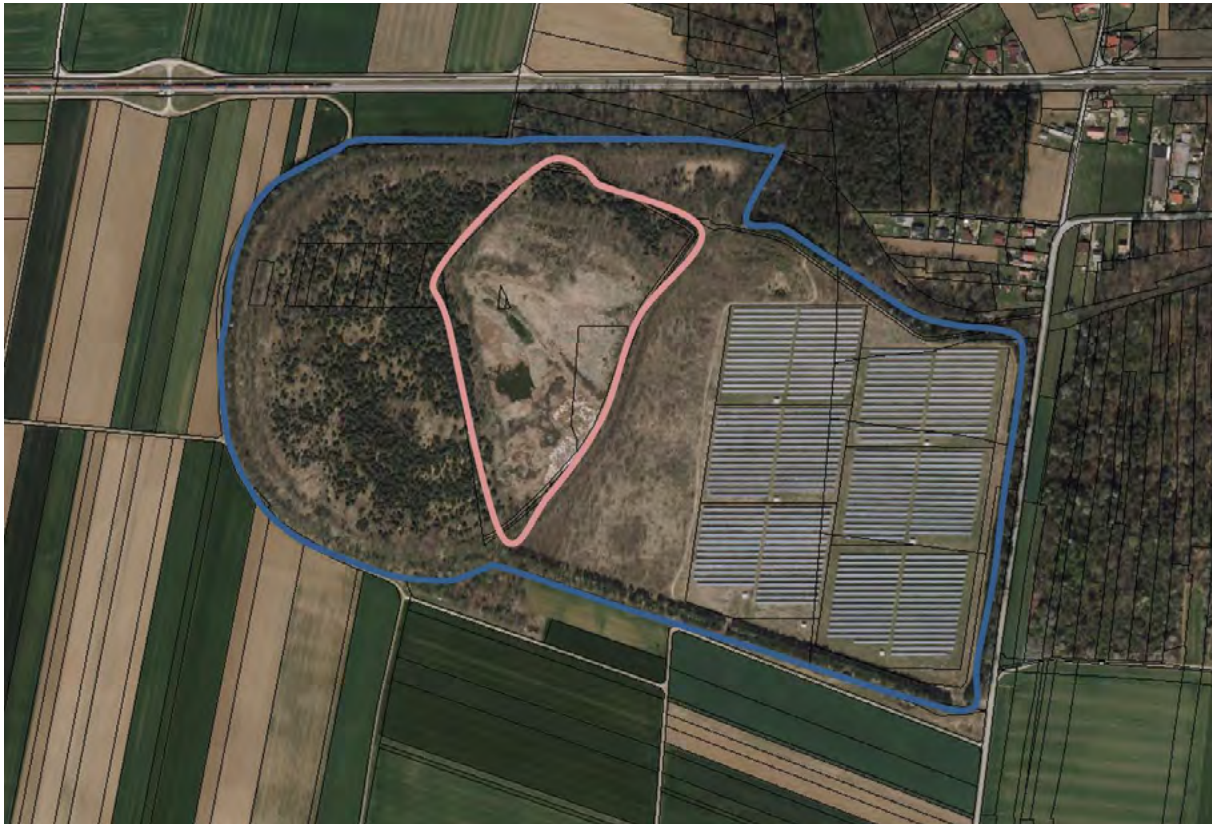
### **Odlagališče Rdeče blato**

Odlagališča odpadkov so nujen del našega načina življenja. V splošnem veljajo za manjšo lokalno nevarnost, vendar pa so lahko velik okoljski problem, predvsem s sta-

lišča onesnaževanja podzemne vode. Ob prodoru onesnaženja v tok podzemne ali v površinske vode lahko pride tudi do onesnaženja širšega okolja. Onesnaženje se lahko v podzemni vodi razgrajuje desetletja ali celo stoletja. V obdobju, ko poteka razgradnja odpadkov, mora biti zagotovljeno pravilno delovanje vseh sistemov odlagališča, ob tem pa moramo spremljati in izvajati obratovalni monitoring stanja podzemne vode. Ta se izvaja v ciljni hidrogeološki coni, litostratigrafski enoti, v kateri lahko zaradi izcejanja onesnaževal z območja vira onesnaženja nastane onesnaženje podzemne vode (Cerar in sod., 2022).

Eden od primerov točkovnega vira onesnaženja je zaprto odlagališče nenevarnih odpadkov Rdeče blato (Slika 4), ki leži na ravninskem delu Dravskega polja, v občini Kidričevo. Odlagališče je od industrijske cone Kidričevo oddaljeno približno 2 km v smeri proti zahodu in leži severozahodno od odlagališča inertnih odpadkov Pepelišče (oddaljenost približno 200 m). Odlagališče danes obsega skupno okoli 47 ha in je sestavljeno iz dveh odlagalnih polj, ki sta v preteklosti služili odlaganju rdečega blata. Rdeče blato, ki je nastajalo kot odpadek pri razklopu boksita pri proizvodnji glinice iz Tovarne glinice in aluminija (TGA) in kasneje podjetja Talum, d. d., so v letih 1954–1991 na odlagališče odlagali v tekočem stanju. Leta 1991 je bila izvedena revitalizacija odlagališča s hlevskim gnojem, muljem iz čistilne naprave Ptuj, pepelom in zemljo, na revitalizirano površino pa so zasadili drevesa in travnato rastje. Aktivna je ostala le še površina velikosti približno 7 ha (Slika 4), ki jo je uporabljalo podjetje Silkem, d. o. o., za odlaganje odpadkov iz proizvodnje silikatov (vodna stekla, zeoliti) in specialnih glinic. Z delno revitalizacijo odlagališča so končali avgusta 2006. Višina odpadkov naj bi do leta 2005 znašala med 16 m in 17 m. 31. 10. 2007 so na odlagališču Rdeče blato prenehali z odlaganjem odpadkov. Skupno naj bi bilo na odlagališču odloženih med 4 in 5 milijonov ton odpadkov.

Rdeče blato je bilo odloženo na naravna raščena tla, brez ustrezne neprepustne zaščite. Na odlagališču odvodnja od-



Slika 4: Lega odlagališča Rdeče blato na ortofoto posnetku. Z oranžno označena površina odlaganja odpadkov podjetja Silkem.

lagališčnih vod (lastne oziroma izcedne vode, zaledne vode in padavinske vode) ni urejena. Za odvodnjo padavinskih vod so na površini odlagališča in po njegovem obrobju izkopani zemeljski jarki, v katerih se voda prosto razteče in ponikne v dobro prepustna tla. Po sedaj znanih podatkih pred začetkom odlaganja tesnilni tampon, ki bi ščitil podzemno vodo, ni bil izveden. Tako se lahko izcedne vode iz odpadkov najprej izcejajo do podzemne vode v vertikalni smeri, ko pa pride do podzemne vode, prenos onesnaženja poteka v horizontalni smeri, tj. v smeri toka podzemne vode (zahod–vzhod) (Ivanuša Šket in sod., 2013).

Odlagališče leži na kvartarnih prodno peščenih plasteh, ki se nahajajo v zgornjem delu geološkega profila in so dobro prepusten odprt vodonosnik, v katerem gladina

podzemne vode niha prosto v odvisnosti od napajanja. Na območju odlagališča se podzemna voda napaja z zahodne strani Pohorja in neposredno z infiltracijo padavin. V splošnem so vodonosne plasti Dravskega polja dobro prepustne ( $K = 10^{-3}$  m/s), na podlagi meritev prepustnosti v izvedenih opazovalnih vrtinah pa je bilo ugotovljeno, da je koeficient prepustnosti med  $2,17 \times 10^{-4}$  in  $5,01 \times 10^{-3}$  m/s. Podlaga vodonosnika so spodaj ležeče pliocenske in miocenske plasti s spremenljivo prepustnostjo.

Smer toka podzemne vode na območju odlagališča je od zahoda proti vzhodu s hitrostjo okoli 1,73 m/dan. Gladina podzemne vode je v srednje nizkem vodnem stanju približno 6 m pod površjem, na koti okoli 235 m n. m. Vplivno območje je sloj slabo sortiranega peščenega proda

z meljem, ki je na obravnavanem območju v povprečju zasičen v debelini okoli 35 m. Obsega območje, na katerem leži odlagališče, in območje dolvodno od njega, kamor se širi onesnaženje z območja odlagalnega telesa. Potencialni prejemniki onesnaženja podzemne vode z območja odlagališča so Drava, ki je od odlagališča oddaljena približno 9 km, črpališče tehnološke vode Kidričevo, črpališči za oskrbo s pitno vodo Skorba na severu in Lancova vas na jugu ter ekološko pomembno območje 42.500 Dravsko polje – vpliv nanj do sedaj še ni bil opredeljen.

Za opredelitev potrebnih sanacijskih ukrepov, predvsem z vidika oskrbe s pitno vodo, je pomembno poznati obseg onesnaženja podzemne vode. Rezultati kemijskih analiz podzemne vode kažejo, da je največje onesnaženje podzemne vode zaradi odlagališča odpadkov dolvodno od odlagališča odpadkov, kar se kaže v povišani električni prevodnosti in bistveno bolj bazičnem pH, ki ga v Sloveniji

običajno ne zaznavamo. Povišane vrednosti mineralizacije oziroma električne prevodnosti dolvodno od odlagališča so posledica obremenitev podzemne vode z natrijem in sulfatom.

Mikroelementi, ki so opredeljeni kot indikativni parametri za spremljanje vpliva odlagališča na stanje podzemne vode, se večinoma pojavljajo v sledovih oziroma so pod mejo določanja analitske metode (LOQ). Največje obremenitve podzemne vode se kažejo predvsem v zelo povišanih vsebnostih aluminija, arzena, molibdena in vanadija v podzemni vodi. Med njimi aluminij in arzen presegata mejne vrednosti za pitno vodo. Na osnovi rezultatov kemijskih analiz podzemne vode lahko ugotovimo, da se oblak onesnaženja razteza v ozkem pasu od odlagališča v smeri toka podzemne vode vsaj do IED naprave Talum, d. d., medtem ko vplivi na črpališči pitne vode Skorba in Lancova vas do sedaj še niso bili opredeljeni.

---

#### Viri:

Cerar, S., Serianz, L., Koren, K., Prestor, J., Mali, N. 2022: Synoptic risk assessment of groundwater contamination from landfills. *Energies*, 15/14: 5150. <https://doi.org/10.3390/en15145150>

Ivanuša Šket, H., Brenčič, M., Keršmanc, T. 2013: Program obratovalnega monitoringa podzemnih voda za zaprto odlagališče nenevarnih odpadkov Rdeče blato – Talum d.d. Zavod za zdravstveno varstvo Maribor – Inštitut za varstvo okolja, Maribor: 76 p.

Klasinc, M. 2013: Pliocenski vodonosnik Dravskega polja : diplomsko delo. Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana: 85 p.

Žlebnik, L. 1982: Hidrogeološke razmere na Dravskem polju. *Geologija*, 25: 151–164.

**5<sup>th</sup> IAH CEG conference**

5-7 October 2022, Rogaška Slatina, Slovenia

**“Making groundwater in the Danube region visible „**

# **FIELD TRIP BOOK**





# Mineral and thermal waters in the Sotla region (Rogaška Slatina, Podčetrtek), heat-pump technology, and “beer” water in the Savinjska valley

Guided by: Nina Rman, Andrej Lapanje, Simona Adrinek, Dušan Rajver

Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana (nina.rman@geo-zs.si, andrej.lapanje@geo-zs.si, simona.adrinek@geo-zs.si, dusan.rajver@geo-zs.si)

## Introduction

Rogaška Slatina stores globally-unique natural mineral waters originating from an andesitic aquifer rich in mag-

nesium (1.1 g/l), sulphate (2.2 g/l) and dissolved inorganic carbon (204 g/l). This aquifer is cut by two fault zones,

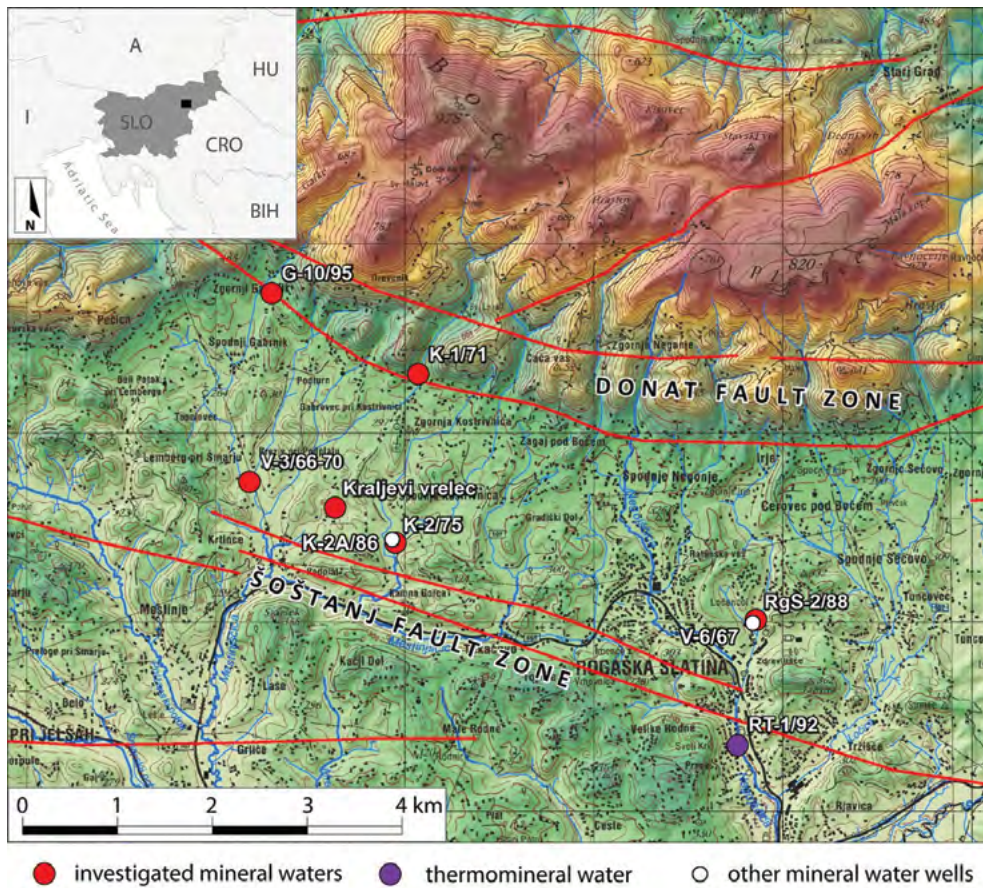


Figure 1: Main fault zones in Rogaška Slatina area and locations of mineral and thermomineral water wells (Rman et al. 2021).

the Donat and the Šoštanj FZ (Figure 1). The sequence outcrops in two W–E directed patches. The one along the Donat Fault Zone is cut by the Labot Fault in the west. The second outcrops south of the Šoštanj FZ, which probably acts as a conduit for CO<sub>2</sub> from the Mantle.

The geological structure of Rogaška Slatina is very complex and has been the subject of recent investigation. The oldest rocks are claystones, quartz sandstones and conglomerates of Carboniferous age (C), which were encountered in the geothermal well RT-1/92 under a mixed carbonate-clastic-volcanic Pseudozilijan series of formations (T<sub>2,3</sub>). In the area of Boč, Dreveniška gora, and along the Donat fault zone from Kostivnica to Zg. Negonje (the northern andesite belt) rocks of Middle Permian age outcrop. These are massive limestone (Pa), sandstone, conglomerate, claystone (Pk), and Tarviso breccia (TB). The Middle Permian rocks are overlain by black marly limestone of the Lower Triassic age (T<sub>1</sub>), massive limestone (T<sub>2</sub><sup>1a</sup>) and massive dolomite (T<sub>2</sub><sup>1d</sup>) of Middle Triassic age in the area of Boč. Fault zones contain erosional residues of the Upper Eocene numulitic limestone (E<sub>3</sub>). The mineral water aquifer consists of pyroclastic rock series – andesite tuffs, tuff breccias, and tuff sandstones (<sup>2</sup>Ol<sub>1</sub>), in which a thick layer of andesite (α) is deposited (Novak et al., 2010).

### Natural mineral waters in Rogaška Slatina

The oldest known written sources on mineral water in the Rogaška Slatina area date back to the 12<sup>th</sup> century. Initially, mineral waters called Tempel and Styria were exploited from shallow dug wells. In 1908, mineral water was captured in the 10 m-deep drainage Knetteum, where highly mineralised mineral water of the new Donat type was captured for the first time. After 1950, under the leadership of Josip Bač and Anton Nosan, the period of mineral water extraction from boreholes began in Rogaška. Research was extended eastwards to Rogatec and westwards to Gabernik. The Donat mineral water

was captured in the deep wells V-6/67 in Rogaška Slatina, V-3/66-70 in Podplat, and K-2/75 in Spodnja Kostivnica. Due to the high magnesium content (over 1 g/l), the Mg acronym was officially added to the brand name in 1976 to become Donat Mg. Very recently, the brand changed its name back to Donat. Today, the water is used for bottling and for drinking treatments in the mineral water drinking hall of the Rogaška Medical Centre.

Different geological settings, deep-seated faults, different retention times of groundwater, and other settings lead to chemically different waters (Figure 2). The hydrogeochemical type of groundwater from the northern carbonate massif are Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> with mineralisation of 0.5 g/l. The mineral water tapped in the northern and central parts of the andesitic tuffs are of the Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> type, with a mineralisation of 6-9 g/l (wells G-10/95, K-1/71, Kraljevi vrelec). Bottled mineral waters from the southern part of the andesitic tuffs have a characteristic water type of Mg<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> with a mineralisation of about 14 g/l (wells V-3/66-70, K-2/75, RgS-2/88). South of the Šoštanj fault, thermomineral water of Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Cl<sup>-</sup> type with mineralisation of 6 g/l is captured in the deepest well in the region, RT-1/92.

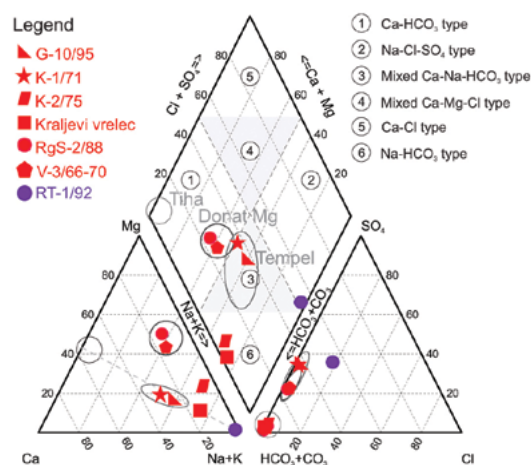


Figure 2: Piper diagram of mineral and thermomineral waters in Rogaška Slatina (Rman et al., 2021).

The stable isotopes of oxygen and deuterium in the mineral waters are lighter than recent precipitation and show distinctive oxygen depletion due to the CO<sub>2</sub> effect. Tritium activity in these wells is very low, mostly below 0.02 TU (Trček and Leis, 2017). Carbon-13 indicates that all mineral waters dissolve carbonates, while this effect is not so evident in RT-1/92. Carbon-14 indicates a retention time of several thousands of years, but a reliable determination is difficult to make due to CO<sub>2</sub> gas and the dissolution of carbonates. CO<sub>2</sub> represents more than 99 vol % of the dissolved gas and more than 95 vol % of the separated gas. All waters have an excess of helium. Mineral waters contain 75-97 % helium from the Earth's mantle, while thermomineral water from the well RT-1 contains only 16 % (Brauer et al., 2016; Figure 3). Since all of them show subsurface degassing, the paleo-infiltration temperature could not be calculated (Rman et al., 2021).

The waters are rich in heavy sulphur isotopes –  $\delta^{34}\text{S}$  from 26.6 to 28.9 ‰, and  $\delta^{18}\text{O}$  from 8.9 to 11.1 ‰, indicating the predominant origin of sulphur through the dissolution of evaporites in carbonate rocks. Boron in water has two origins – from hydrothermal alteration with  $\delta^{11}\text{B}$ =11.3-16.4 ‰, and from dissolution of carbonates with  $\delta^{11}\text{B}$ =26.6-

31.7 ‰. The strontium isotope ratio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) indicates three sources: 0.7106 for Miocene clastic rocks, 0.7082 for Triassic carbonates, and 0.7070 for Lower Oligocene andesitic rocks (Rman et al., 2021).

### Thermomineral water from RT-1/92 borehole

The thermomineral water in Rogaška Slatina is exploited from an entirely different aquifer than the mineral water – a complex of Ladinian Pseudozilian series. Below the Tertiary, the Ladinian dark grey to black clay slate that undergoes diagenetic dolomitisation is encountered to depth of 1.6 km. The borehole RT-1/92 was drilled in 1992 and ends at 1.7 km in Carboniferous black clayey siltstone (Figure 4). The rocks are poorly permeable; geophysical measurements marked the section between 1506-1570 m in the dolomitic clayey slate as water-bearing, while the major thermal water inflows occur only in a few narrow fractures between depths of 1507 and 1518 m.

The artesian water has a thermal and gas lift with a dynamic wellhead pressure of 3.2 bar. The hydrogeochemical type of the water is Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-(Cl<sup>-</sup>), mineralisation

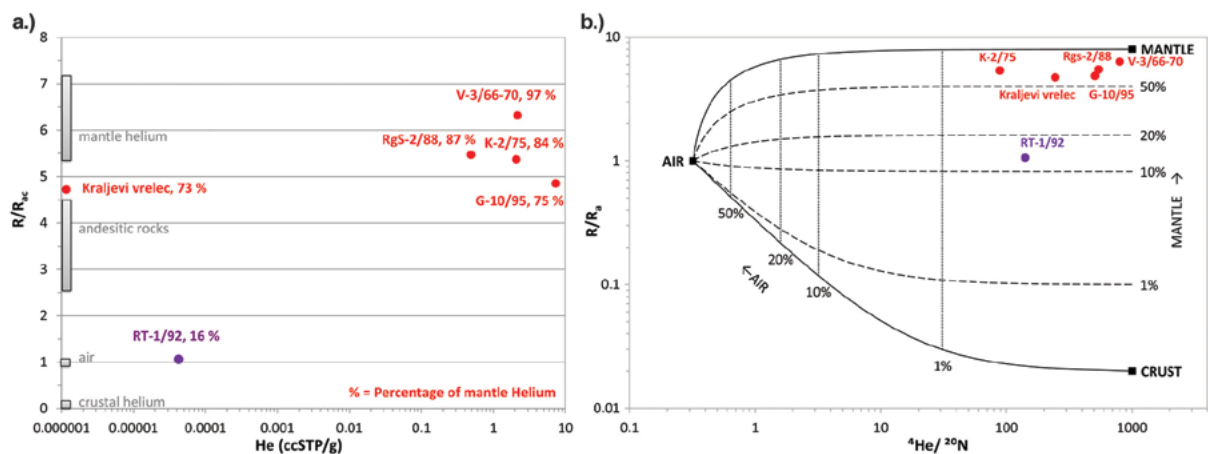


Figure 3: Origin of helium in mineral and thermal waters of Rogaška Slatina (Rman et al., 2021).

is 5.4 g/l, electrical conductivity is 5760  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , and contains 1.3 g/l of dissolved  $\text{CO}_2$ . The dynamic reserves are estimated at 6 l/s. The stable isotopes of oxygen and deuterium are rather heavy and similar to freshwater from the dolomite. Carbon-14 shows a longer retention time than that of mineral waters.

The thermomineral water is used in the thermal pools of the Grand Hotel Sava and SLKI Co. 800 m from the well, water reaches an average outflow below 2 l/s and an average temperature of 57.2 °C in 2016. Before utilization, the iron must be removed in sandy filters and the water must be cooled.



Figure 4: Wellhead of thermomineral water well RT-1/92 with a monitoring system.

### Occurrences and use of thermal water in Podčetrtek (Terme Olimia, a former “Atomic spa”)

Terme Olimia is situated in Podčetrtek, where it is one of the several thermal water occurrences in the crossborder region between Slovenia and Croatia, which structurally belongs to the Sava folds. The Sava folds are situated in the triangle between the W-E striking Periadriatic fault zone in the north, the NW-SE Idrija tectonic zone in the west, and the WSW-ENE Mid-Hungarian tectonic zone in the east. The folding is related to the shaping of the in-

tersection area between two tectonic zones, the so-called Idrija - Mid-Hungarian transection zone, which is characterised by a typical parquet structure and the absence of a dominant direction of shear displacements. Thus, in the triangular segment between the Idrija and Mid-Hungarian tectonic zones, called the Sava compressive wedge, a field of increased N-S oriented normal tensions was formed, which led to the folding of the W-E oriented Sava folds. As a result of the folding, the compressive wedge shortened by about 20 km in the N-S direction, leading to a southward shift of the Periadriatic tectonic zone and its narrowing. The compression is related to the folding and uplift of the compressive wedge and the formation of the antecedent valley of the Sava River between the Ljubljana and Krško basins (Placer, 1999).

The internal structure of the Sava folds with its three structural packages is very important for the occurrence of thermal water. The lowest package consists of soft Paleozoic clastic rocks of Carboniferous to Permian ages. The middle structural package, which is thrust over the lower package (decollement) in the form of extensive nappes, consists of Permian, Triassic, Jurassic, and Cretaceous rocks composed of marine carbonate, clastic rocks and volcanoclastic facies. The third, uppermost structural package consists of discordantly sedimented Tertiary loose clastic and carbonate rocks. The rocks of the third package function as an impermeable hanging-wall and thermal blanket for the thermal aquifers formed in the Mesozoic carbonate rocks of the middle package. Some secondary thermal aquifers are also developed in the Badenian lithotamnian limestones in the third package.

Thermal springs in the Sava folds occur where the impermeable Tertiary rocks pinch out, usually at the intersection of faults with anticline limbs. Some thermal springs also occur in the fold crests from fractured Badenian limestones and conglomerates (e.g. Tuheljske Toplice and Krapinske Toplice in Croatia) (Figure 5).



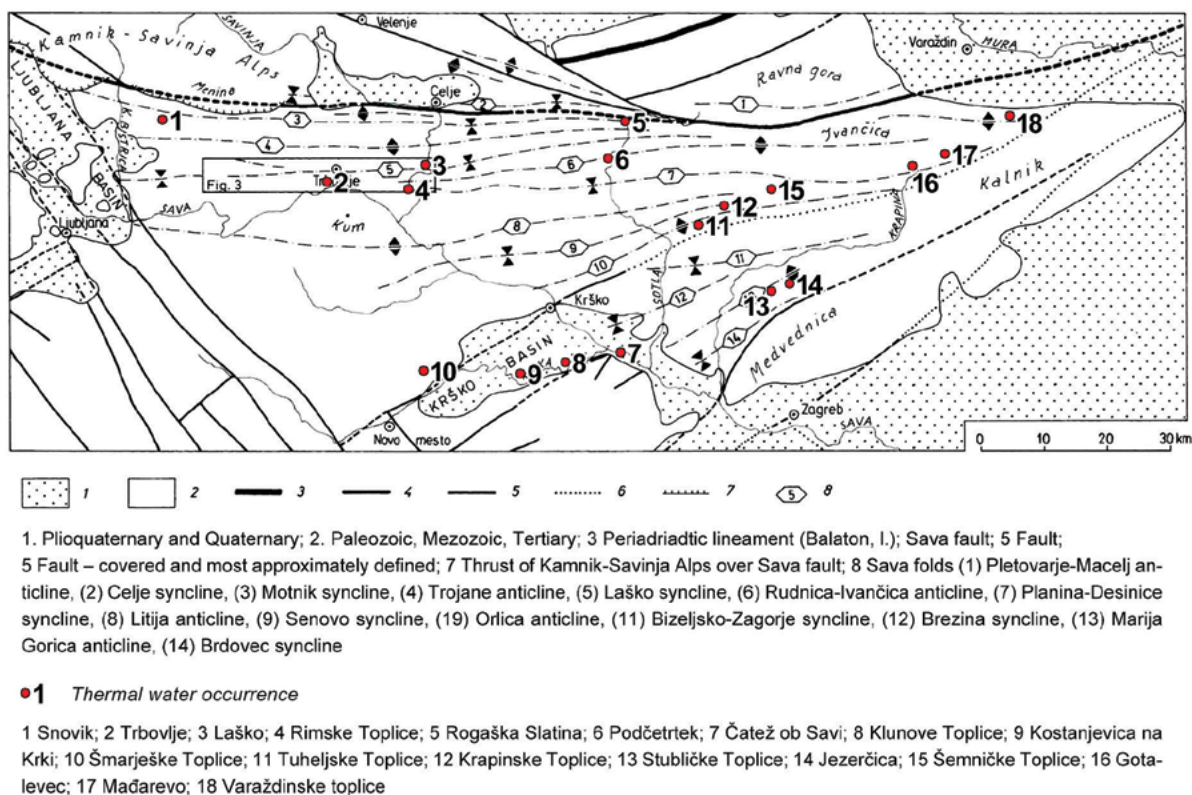


Figure 5: Thermal water occurrences in the Sava folds (modified after Placer (1999) and Šimunić and Avanić (2008)).

In Podčetrtek, thermal water gushed naturally from several springs on the Toplice meadow on the Slovenian side of the Sotla River and in its riverbed, as well as from the Harina Zlaka spring on the Croatian side of the river. The thermal water outflows from the Anisian dolomitic aquifer, where impermeable Tertiary clastic rocks pinch out. The Harina Zlaka spring itself was captured as a primitive excavated pool with a temperature of up to 33 °C. In 1965/66, the first hydrogeological investigation was carried out on the Slovenian side of the Sotla River. From the borehole V-3/65, 4 l/s of thermal water with a temperature of 35 °C flowed out. A wooden basin was built next to the borehole (Figure 6) (Lešnik, 1970). The yield of the Harina Zlaka spring depleted significantly. With the quick development of spa over the following decade, the natural springs ceased to exist.



Figure 6: Left: Impression from wooden basin in 1970 (Lešnik, 1970).

The need for larger amounts of thermal water at higher temperatures rises proportionally with the development of spas (Figure 7). Consequently, several wells were drilled (K-1/67, K-2/70, V-1/72, V-2/72, V-3/75 and fi-



Figure 7: Terme Olimia Spa in 2022 (photos by Terme Olimia d.d.).

nally V-4/84). Each well was drilled further west of the Sotla River and deeper as the thickness of the impermeable rock increased towards the northwest. The deepest borehole, V-4/84, is 500 m deep and can produce 20 l/s of thermal water at 43 °C from the Anisian dolomite at depths ranging from 272 to 500 m.

The radioactivity of the spring in Harina Zlaka was measured for the first time in 1952. Already in 1956, journalist Boris Kuhar sensationally announced in the newspaper Slovenski poročevalec that the water of the Harina Zlaka spring was radioactive and named the location Atomske Toplice (Atomic spa). The name was used as the commercial name of the spa for almost fifty years; later, in the mid- 2000s, the name was changed to Terme Olimia after the nearby monastery. The measured radioactivity of the thermal water is elevated (radon activity up to 100 Bq/l), which is comparable to and characteristic of all deep-circulation waters.

The thermal water in Podčetrtek is of the hydrogeochemical type Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> to Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>, TDS is between 500 and 600 mg/l. The temperature of the thermal water varies: the water from the westward- and deepest borehole V-4/84 is warmest, while the temperature of the water from the boreholes situated near the Sotla River is lowest.

The recharge area for the Anisian dolomitic thermal aquifer is in the Rudnica (SI) in the west, and Brezna, Košnička, and Desinička gora (HR) in the east. Precipitation infiltrates the Anisian dolomitic aquifer in the mountainous region of the Rudnica-Ivančica anticline and partially sinks through the aquifer northward into the Laško syncline, where the dolomitic aquifer ( $T_2^1$ ) is covered by impermeable Tertiary (OM) and Ladinian rocks ( $T_2^2$ ,  $\beta\beta$ ) (Figure 8). The basement of the thermal aquifer consists of Scythian clastic and carbonate rocks ( $T_1$ ). The actual thickness of the thermal aquifer is estimated at 300 m. The depth of water circulation in this aquifer is estimated to be about 1000 m below the surface. At this depth, the water heats up to about 45 °C and then rises due to gravity through the fault zone in the NW-SE direction, to the surface in Podčetrtek. The recharge of the thermal aquifer is limited. Nowadays, the natural thermal springs have dried up and the periphery of the thermal zone (in shallow wells) near the Sotla River shows slowly decreasing water temperatures.

### Shallow geothermal systems technology and applications – KRONOTERM company

Shallow geothermal energy (SGE) is a renewable energy source that will play an important role in future energy management plans (EU Directive 2018/2001/EC). It

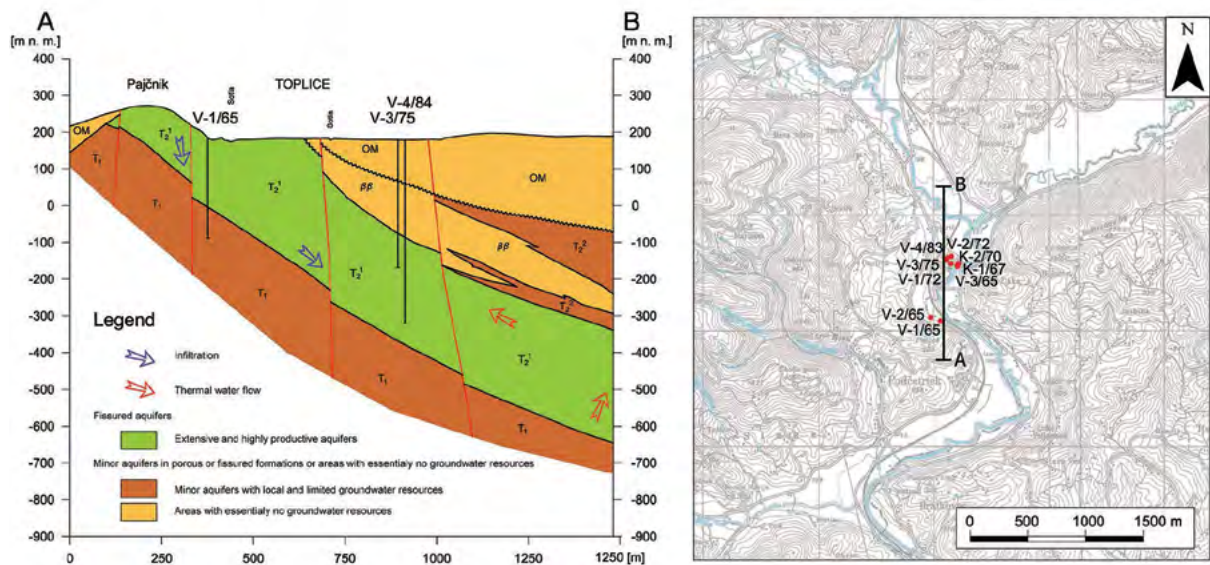


Figure 8: a) Hydrogeological cross-section of the dolomitic thermal aquifer at Podčetrtek. b) Location of the geological profile with thermal wells.

is a reliable source of energy used for space heating and cooling through the application of various ground source heat pump technologies, including open-loop (GWHP – groundwater heat pump) and closed-loop (GCHP – ground-coupled heat pump) systems (Lund, 2000). In GWHP systems, the main heat carrier is groundwater extracted through wells, while in GCHP systems, fluid circulates in closed pipes of various configurations (horizontal loops, borehole heat exchangers, energy baskets, slinky loops) of ground heat exchangers (Lund, 2000).

In Slovenia, the boundary between shallow and deep geothermal energy is not precisely defined. According to the Drilling guidelines for shallow geothermal systems (2021), it is 300 m. Down to this depth, the temperature of geological layers under natural conditions is usually in the range of 2 to 20 °C (Figure 9) (Rajver et al., 2006). The GSHP efficiency is highly dependent on the local geological and hydrogeological conditions, so determining the natural conditions is crucial for proper design and operation (Casasso and Sethi, 2017).

In 2021, there were a total of some 14,818 operating ground source heat pumps (GSHP) with a total capacity of 237.75 MWt in Slovenia. Of these, 47.8 % were open-loop systems that extracted about 724.85 TJ of subsurface heat; 34.2 % use horizontal closed-loop heat exchangers (with 272.93 TJ of heat); and 18 % are vertical borehole heat exchangers (with 187.56 TJ of heat). Thus, a total of 1,185.34 TJ (= 329.26 GWh) of heat was used in 2021 (by 8.8 % more than in 2020) (Figure 10), while our approximate estimate is that at least 240 TJ of heat was released underground in cooling mode (Rajver et al., 2022).

One of the leading manufacturers of heat pumps in Slovenia is the Kronoterm company (Figure 11 - left). In their more than 30 years, the company has produced almost 100,000 pumps, is present on 20 markets, and employs more than 110 people. The mission of the company has been to design, develop, produce, and implement high-tech equipment for economical and environmentally friendly heating and cooling.



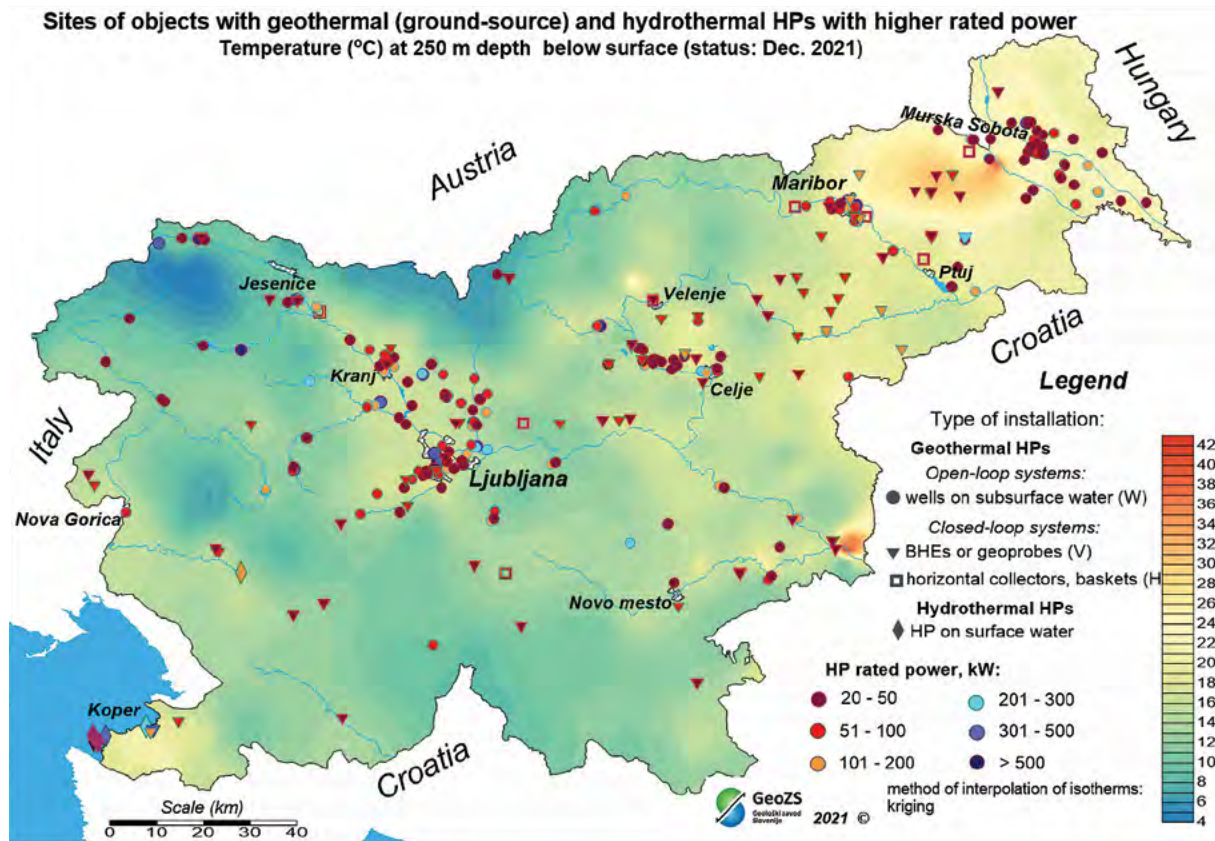


Figure 9: Expected subsurface temperatures at a depth of 250 m and locations of GHP and hydrothermal HP units with a capacity of at least 20 kW in 2021 (Rajver et al., 2022).

They develop and produce air-to-water heat pumps and ground-to-water or water-to-water heat pumps. The advantage of ground source heat pumps is their extremely high efficiency and therefore low costs, the reliability of the heat source, and an extremely long service life. More and more companies and industrial concerns are opting for ground-source heat pumps because they offer great savings, a shorter payback period, and the possibility of using waste heat. Among other things, three years ago they developed the largest heat pump in Slovenia: a geothermal heat pump with an output of 2 MW heats the tomato greenhouses and provides cooling for the warehouses of the Paradajz company. Since 2014, the new Kronoterm building has been heated and cooled using shallow geothermal energy, with a

total installed capacity of 163 kW. In addition to the air-to-water heat pump, an open-loop system (one pumping and one injection well) with an installed capacity of 42 kW and a closed-loop system with an installed capacity of 82 kW are used (Figure 11 - right). The closed-loop system consists of 10 boreholes at a depth of 100 m. They use a passive approach to cool the building.

### Groundwater for beer production in the Savinjska region – Clef brewery

At the end of our field trip, we stop at the Clef brewery, which is located in the middle of the Lower Savinjska



### Trends of utilized geothermal energy by categories of direct heat use in Slovenia

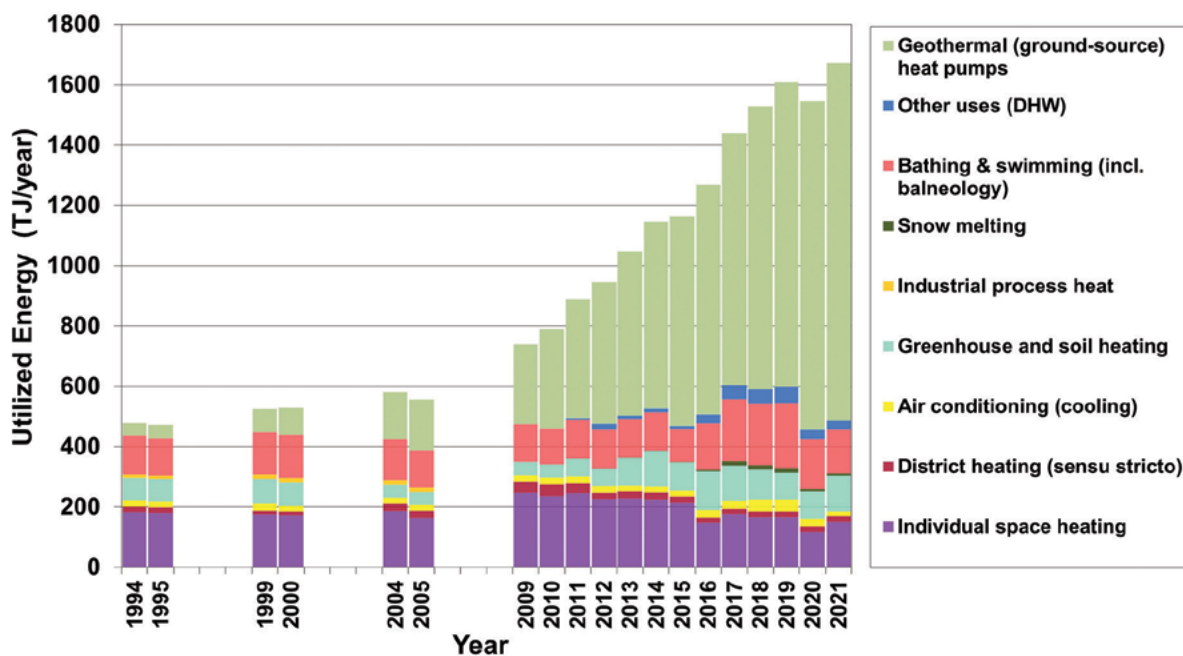


Figure 10: Trends of utilized geothermal energy by categories of direct heat use in Slovenia in the period 1994-2021 (total utilized energy in 2021: 1657.43 TJ) (Rajver et al., 2022)



Figure 11: The Kronoterm company on the left, and one of their ground-source heat pumps on the right (photo courtesy of Kronoterm d.o.o.).

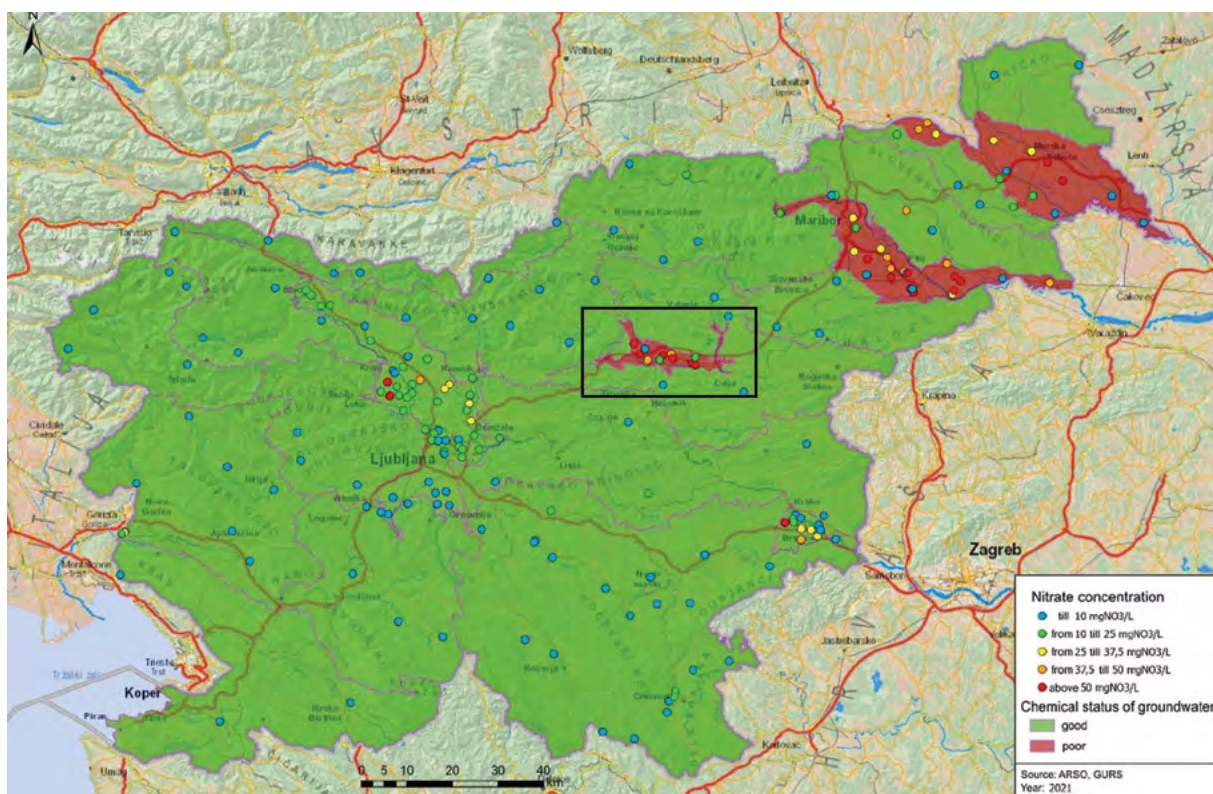


Figure 12: Average annual nitrate values in groundwater samples at the sampling points of the Slovenian national monitoring in 2020. The Lower Savinjska valley is marked by the black rectangle (modified after Internet 1).

valley. We also call it the green gold valley, as it is one of the most important Slovenian (as well as European) regions for hops. The Lower Savinja valley is a large area covering 73.5 km<sup>2</sup>, with an alluvial aquifer, mainly recharged directly by precipitation, and locally by infiltration from surface waters. The average annual precipitation is about 1100 mm and the surface runoff coefficient is very low. The shallow, unconfined aquifer system consists of low permeable Pliocene sediments filling a Miocene depression. Overlying the Pliocene sediments are Pleistocene and Holocene layers, mainly gravel and sand with some interbedded conglomerates and clay intercalations. The middle- to low-permeable Pleistocene and high-permeable Holocene sediments are up to 30 m thick (Uhan et al., 2021).

The groundwater table is shallow. According to the national groundwater monitoring of the Slovenian Environment Agency, the average depth of groundwater ranges from 0.7 to 7.5 m, with an average of 2.4 m and a standard deviation of 2 m. The amplitude of the groundwater level is in the range of 1.4–7.5 m.

An important part of the valley's water demand is covered by pumping groundwater from the alluvial aquifer. More than half of the aquifer's area (69 %) is used for agriculture (ARSO, 2022), therefore the groundwater is heavily polluted with nitrates and pesticides. A recent analysis of national groundwater monitoring data shows poor groundwater chemical status. The trend in nitrate concentration is statistically insignificant and shows no improvement in

groundwater quality (ARSO, 2022). The nitrate concentrations in many wells and boreholes are above the thresholds defined in the Decree on groundwater status (Official Gazette of the RS, no. 25/09, 68/12, 66/16, 44/22–ZVO-2), where the limit for nitrates in drinking water is set at 50 mg/l (Figure 12).

The Clef brewery uses water from the local water supply system for beer production. The water source is located in the dolomite aquifer in the mountains of the southern rim of the Lower Savinja valley. The brewery only started brewing beer here in 2019. Their special marketing angle is that the production is closely related to music, therefore selected craft beers are named after songs by legendary Slovenian bands.

---

### References:

- ARSO, 2022. Nitrates in groundwater. Available on: <https://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/>. Accessed on 1. 9. 2022.
- Brauer, 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.12.016>.
- Casasso, A., Sethi, R. 2017: Assessment and mapping of the shallow geothermal potential in the province of Cuneo (Piedmont, NW Italy). *Renewable Energy*, 102: 306-315. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.045>.
- Drilling guidelines for shallow geothermal systems till 300m. 2021. Republic of Slovenia, Ministry of Infrastructure, Ljubljana: 82 pp.
- EU Directive 2018/2001/EC of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. European Council, Brussels, Belgium: 128 pp.
- Lešnik, R. 1970: Atomske Toplice. Odbor za izgradnjo Atomskih toplic pri Skupščini občine Šmarje pri Jelšah and Turistično društvo Podčetrtek, Šmarje pri Jelšah, Podčetrtek: 35 pp.
- Lund, J.W. 2000: Ground-source (geothermal) heat pumps. In: Lienau P.J.(conv.): Heating with geothermal energy: Conventional and new schemes, Course on WGC 2000 Short Courses. Tohoku District, Japan: 209-236.
- Novak, M., Celarc, B., Lajmiš, L., Leis, A., Trček, B. 2010: Geologic structure of the Rogaška Slatina aquifer system and its geochemical characteristics. In: Košir, A. (ed.) et al.: Povzetki in ekskurzije = Abstracts and field trips - 3. Slovenski geološki kongres, Bovec. Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa, Paleontološki inštitut Ivana Rakovca, Postojna, Ljubljana: 36 pp.
- Placer, L. 1999: Structural meaning of the Sava folds. *Geologija*, 41: 191-221.
- Rajver, D., Šafanda, J., and Dedeček, P. 2006: Monitoring of air-ground temperature coupling and examples: *Geologija*, 49/2: 279-293. <https://doi.org/10.5474/geologija.2006.021>.
- Rajver, D., Lapanje, A., Rman, N., Prestor, J. 2022: Geothermal energy use, country update for Slovenia. In: Proceedings of the European Geothermal Congress 2022. EGEC, Berlin: 13.
- Rman, N., Szócs, T., Palcsu, L., Lapanje, A. 2021: Chemical and isotopic composition of CO<sub>2</sub> rich magnesium-sodium-bicarbonate-sulphate type mineral waters from volcanoclastic aquifer in Rogaška Slatina, Slovenia. *Environmental Geochemistry Health*, 44: 2187-2214. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01062-2>.
- Šimunić, A., Avanić, R. 2008: Geotermalne i mineralne vode Republike Hrvatske. Hrvatski geološki institut, Zavod za geologiju, Zagreb: 343 pp.
- Trček, B., Leis, A. 2017: Overview of isotopic investigations of groundwaters in a fractured aquifer system near Rogaška Slatina, Slovenia. *Geologija*, 60/1: 49-60.
- Uhan, J., Vižintin, G., Pezdich, J. 2011. Groundwater nitrate vulnerability assessment in alluvial aquifer using process-based models and weights-of-evidence method: Lower Savinja Valley case study (Slovenia). *Environmental Earth Sciences*, 64: 97-105. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0821-y>

## Hydrogeological features of the Dolenjska karst

Guided by: Luka Serianz<sup>1</sup>, Mihael Brenčič<sup>2</sup>, Mitja Prelovšek<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana (luka.serianz@geo-zs.si)

<sup>2</sup>University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of Geology, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana (mihael.brencic@ntf.uni-lj.si)

<sup>3</sup>ZRC SAZU, Karst Research Institute, Titov trg 2, 6230 Postojna (mitja.prelovsek@zrc-sazu.si)

### Introduction

The Dolenjska Karst is a groundwater system in south-eastern Slovenia dominated by Mesozoic limestone and dolomite rocks with typical karstic porosity (Figure 1). Buser (1976) considers the area as part of the Mesozoic blocks of the western Dolenjska region. Unlike the karst

in southwestern Slovenia, where Cretaceous limestones predominate, this karst developed in Triassic and Jurassic limestones and dolomites covered by thicker sediments. Dolenjska karst develops in its own characteristic way. The main features are a thick soil layer, consisting mainly of

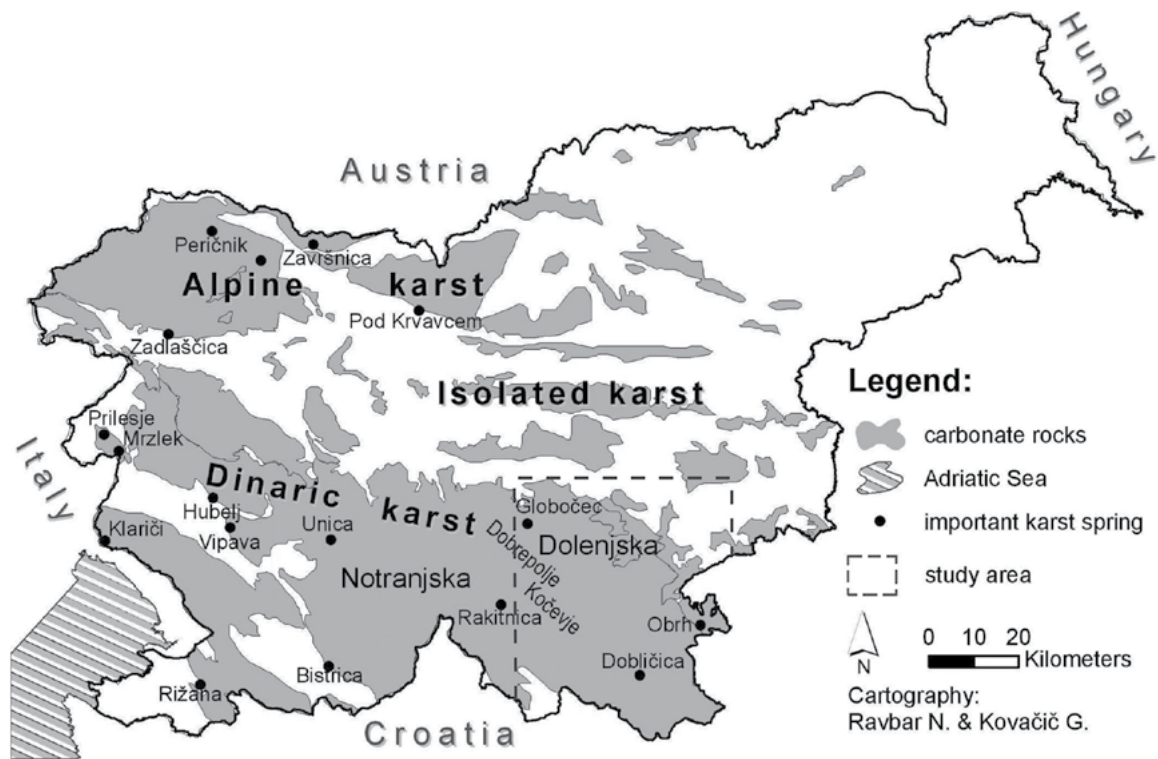


Figure 1: Distribution of carbonate rock and karst types in Slovenia (modified after Kovačič and Ravbar, 2010).



clay, and a high and highly fluctuating water table (Čarman, 2010). Morphologically, a near-normal relief with valleys and a sporadic surface river network has developed on a predominantly dolomitic base (Habič, 1982). This area is part of the Sava compression wedge (Placer, 1999), which has undergone several phases of tectonic processes. Therefore, the limestone in the Dolenjska Karst is tectonically deformed and divided into broad zones of breakup and comminution, where the limestones are often fractured to the degree of a tectonic breccia (Knez et al., 2016).

The very diverse picture of the karst is also reflected in the diversity of hydrogeological conditions. The Kostanjevica Cave was opened up by a flood in 1937. The cave was formed in Cretaceous limestones, and the karst channels were mostly formed in the area of strong groundwater fluctuations. The Krupa River karst spring is the most productive spring in the Bela Krajina region. The spring flows into a flowing lake under a tectonically deformed rock wall about 30 m high. One of the most interesting karst phenomena is the Temenica depression, a karst river 35 km long that descends twice along its course. Near Dolenje Ponikve, a karst field with numerous gullies has formed in the karstified Jurassic limestone. Special conditions prevail in the area due to relatively thick packages of carbonate rocks, which enable hydraulic connections in the whole system and thus the circulation of water to greater depths. Direct evidence of deep groundwater circulation is the presence of thermal springs manifested by thermal convection. The best known area with thermal springs is located in Dolenjske Toplice.

### Cave of Kostanjevica

---

Almost half of Slovenia is formed of carbonate rock in which karst has developed. As a result, groundwater is an important source of drinking water. Karst is characterized by karst – channel porosity, in which the groundwater flow of is relatively fast. This also affects the distribution of water

temperature within the karst rock, as karstic groundwater is consequently relatively cold. Karst channels form in both saturated (phreatic zone) and unsaturated areas (vadose zone). In the phreatic zone, phreatic loops are formed in the vadose zone vertical channels in the form of potholes and chasms. Special channel shapes are also formed where groundwater levels fluctuate (Brenčič, 2002). During the field trip, as an example of a karstic cave, we will visit the Cave of Kostanjevica (in Slovenian Kostanjeviška jama), which is part of the Gorjanci Mountains karst. The cave entrance was opened in 1937 after a violent storm. Since 1971, it has been equipped with electric lighting stretching some 300 m for tourist visits. The channels stretch a total of 1871 m, and the height difference between the highest and the lowest point is 47 m (Figure 2). The Cave of Kostanjevica is developed in limestones from the Cretaceous period, which were formed in the area of the shelf. They are represented by light gray micritic and biosparitic limestones, in which there are remains of shells, algae, and foraminifera. In some parts of the cave, dark grey to light grey limestone with thin layers of granular dolomitized limestone and limestone occur. The formation of the cave was influenced by brittle tectonics.

In the cave, the structures of the Dinaric direction NW-SE and the Balaton direction NE-SE predominate. As a result of tectonics, there are also many collapses in the cave, which were formed by the collapse of rocks and channels near the surface. The channels in the Cave of Kostanjevica were formed in several phases. Few channels would be interpreted as true phreatic channels, nor are there any channels that would have formed only in the vadose area. Most of the cave is dominated by channels formed in the area of intense fluctuations of groundwater level.

### Regional groundwater flow and Dolenjske toplice

---

In Slovenia, significant groundwater flow can be found in the carbonate rocks of the Mesozoic age, which cover approximately 12,500 km<sup>2</sup> of the nation's territory.

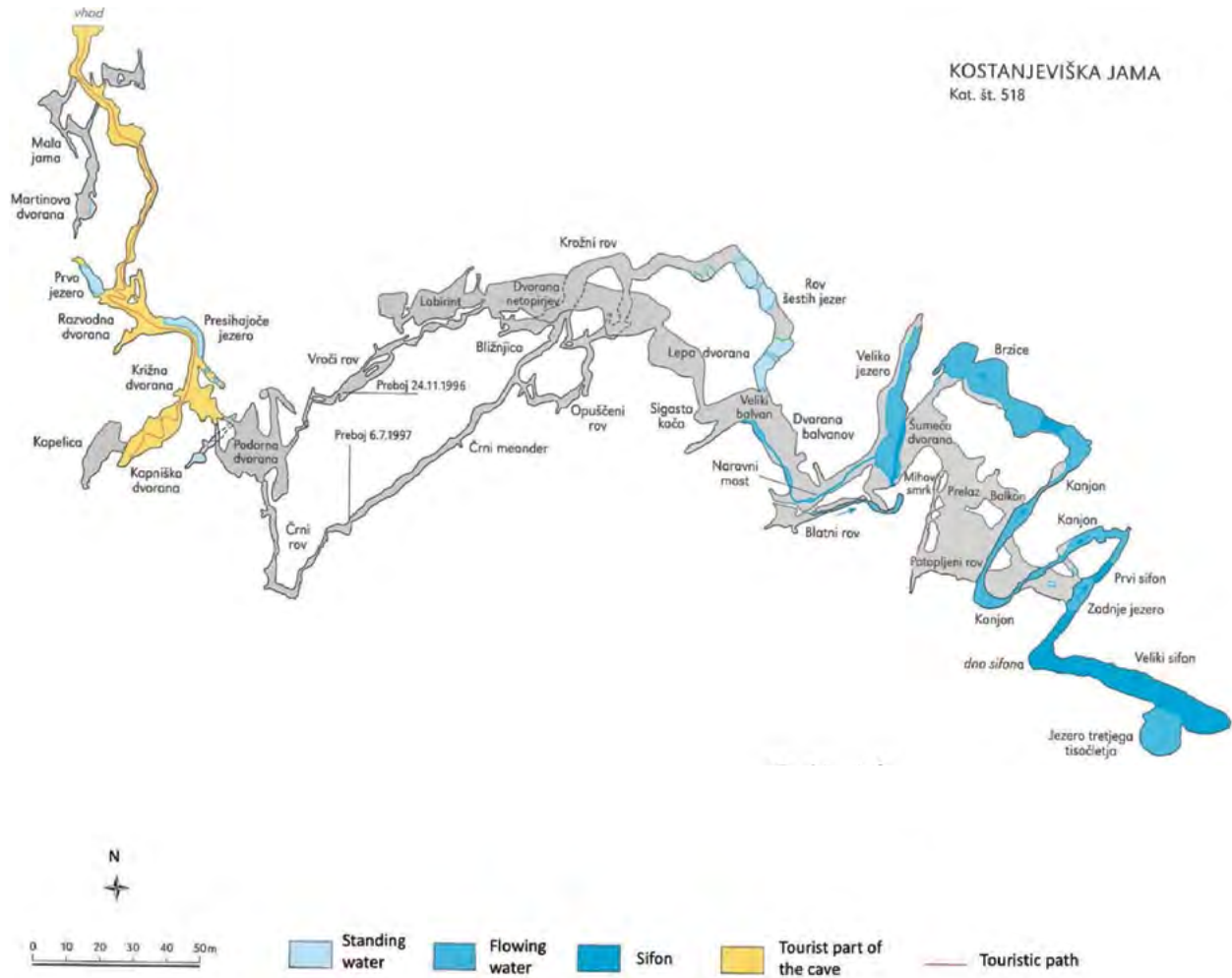


Figure 2: Ground plan of Cave of Kostanjevica (modified after Gams, 2004).

Limestone aquifers with high karst porosity are located in large continuous areas in the west and south, from the Julian Alps to the Dinaric karst, and supply almost half of the Slovenian population with drinking water. The aquifers can reach thicknesses of several hundreds of meters, sometimes even kilometres. Aquifers with karstic and fissured porosity are characterized by a heterogeneous structure and three types of porosity: micropores in rock matrix, small fissures or fractures, and larger fissures and conduits (karst). Groundwater recharge and discharge drive the flow through the aquifer, whereas the height of the base level establishes the pressure difference for flow within the aquifer (Scheidler et al., 2021). Slovenia is characterized by complex landforms and geological settings that produce multi-scale groundwater flow systems. The latter can be understood within a conceptual framework of hierarchical flow systems, consisting of local, intermediate, and regional flow systems (Figure 3) where the main driving force is gravity, thus named gravity-driven regional groundwater flow (Toth, 1963, 1999). It is well known that the regional groundwater flow is mostly affected by local hydrogeological

conditions, hydraulics, geology, geomorphology, topography, and drainage area characteristics (Gleeson and Manning, 2008) which also determine the dynamic of the thermal flow regime (Garven, 1995; Cao et al, 2016). The convective process induces higher temperatures in the upper part of the circulation system and a corresponding drop in temperature occurs in the lower part. Studying the dynamics of the regional groundwater flow system from the recharge areas to the discharge zones is probably the most efficient way to answer some fundamental hydrogeological questions, namely: what kind of geometry does the groundwater circulation system exhibit; where are the main flow paths; what is the natural temperature distribution in different geological formations; and what is the intensity of the groundwater flow? Deep carbonate rock aquifers, most of which are to some degree karstified, are probably the most important thermal water resources outside of volcanic areas (Goldscheider et al., 2010). In western and central Slovenia, predominately dolomitic carbonate aquifers provide many warm-water-system-type local geothermal reservoirs, such as Dolenjske Toplice.

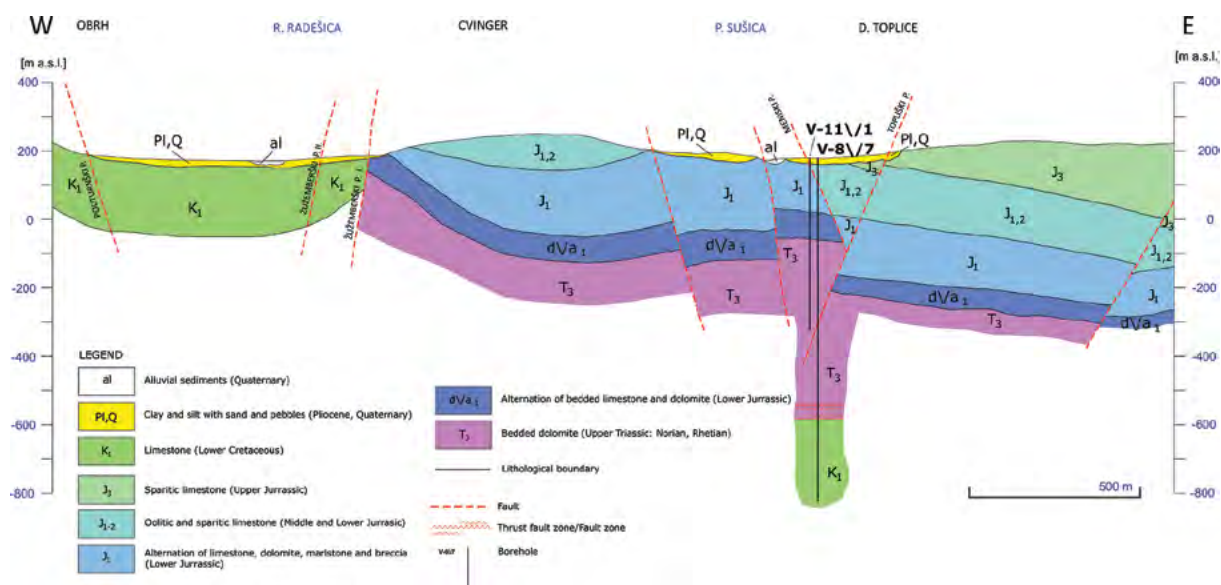


Figure 3: Geological cross-section at Dolenjske Toplice (modified after Lapanje and Brenčič, 2015).

The occurrence of warm springs in the Dolenjske Toplice area is closely related to the geological conditions in the wider Dolenjska and Bela Krajina area (Lapanje and Brenčič, 2015). The formation of this thermal system is the result of the occurrence of carbonate rocks, in which karstification and consequently high water permeability also developed. The Toplice thrust plays the most important role among the geological structures, as it separates the Upper Triassic strata from the underlying Cretaceous strata in the Rog thrust nape at a depth of about 1000 m (Premru et al., 1977). The various vertical faults of the Dinaric and Middle Hungarian directions are responsible for the vertical flow of water from the primary thermal aquifer to the surface. The investigations based on previous data show that the water temperature before the intensive use of the thermal system was between 37 and 38 °C. However, these values are no longer valid, as today the temperatures range from 24 to 36 °C, with an average temperature of about 31 °C and an average outflow of 15 l/s. The presence

of the thermal spring in Dolenjske Toplice is linked to the Sušica stream that flows through the town.

### Karstic spring of the river Krupa

The Krupa spring is one of the largest springs in Bela Krajina, with a mean flow rate of 3 to 5 m<sup>3</sup>/s (Polič et al., 2000). The water rises to the surface in strong karstic springs underneath steep overhanging rock faces in a unique, green-coloured dammed pool (Figure 4). The river has a relatively small drop in altitude as it flows 2600 m through a gorge 30 m deep into the Lahinja river. The recharge area is predominantly karstic, with numerous karstic fractures in various directions, and a total catchment area of 140 to 170 km<sup>2</sup>. The area is composed of layered lower cretaceous limestones with a total thickness of more than 1500 m. According to tracer tests in the recharge area, filtration velocities range from 0.39 to 3.9 cm/s (Habič and Kogovšek,



Figure 4: Krupa karst spring.



1992). The absolute minimum flow is around 400 l/s, and the average minimum is around 1000 l/s. According to the hydrogeological characteristics of the Krupa river and its recharge area, it was potential source for drinking water supply in Bela Krajina region. In 1983 high content of polychlorinated biphenyls (PCBs) in water and sediment was found. This was consequence of dumped waste and other emissions of the Iskra Kondenzatorji factory in Semič where capacitors in the period 1962–1985 were produced. Due to pollution spring hasn't been captured. PCBs degrade very slowly and are classified as one of the twelve most harmful persistent organic pollutants for the environment and are therefore subject to the most stringent technical control and environmental protection measures.

In recent years, the ecological load of PCBs in the environment has decreased significantly, but there is still a long way to go before a satisfactory result will be achieved. However, some recent hydrogeological studies already indicate possible use of the deeper underground karst waters in the Krupa recharge area. Despite the heavy pollution, the river is rich in life. Here we find the only known locality of the cave mussel (*Congeria jalzici*), an endemic species of cave snails and the largest cave vertebrate, the human fish (*Proteus anguinus*). The Krupa spring and its surroundings represent exceptional natural and cultural heritage, and is one of the most important cultural monuments in the country, declared a site of outstanding natural importance in 1997 (Polič et al., 2000).

### River Temenica

---

The Temenica river is a typical karst river, which flows on the eastern edge of the Slovenian karst (Glavan and Pintar, 2010). Its source is in Posavsko Hribovje at 550 m a.s.l., at the village Javorje in the municipality of Šmartno pri Litiji (Figure 5). The river proceeds to flow along Dolenjsko Podolje through the municipality of Trebnje, where it first sinks after flow of 28 km at 264 m a.s.l. Palaeozoic clastics

with very low permeability and Triassic dolomites with low permeability allow surface water to collect and drain at the upper part of the Temenica river (Buser, 1968). At the transition to karstic, predominantly Jurassic limestones near Ponikve it sinks at several sinkholes. During major precipitation, those sinkholes can't drain the total water volume and the river begins to flood. The underground water flow extends on the distance of 1.75 km in more or less straight line. The height difference between sinks and second springs is approximately 25 meters. The second spring occurs near the village of Vrhpeč below the Zijalo cliff. Several springs can be found nearby, flowing directly from fractures in the aquifer.

After 8 km it sinks again near Vrhovo. The third spring occurs at Luknja near the village of Prečna, where after 6 km flows into the Krka river. The total catchment of the Temenica spreads over more than 300 km<sup>2</sup>. An important part of the recharge comes from the extensive karst aquifer of Suha Krajina. Hydrographs of the Rivers Temenica and Prečna reflect a hydrological regime with maximal discharges in November. The low waters conditions are present in August and February, during which time the water quality of the Temenica river is particularly vulnerable. Groundwater flows from the stream Lukovski potok towards the Zijalo spring and further to the Prečna spring, which was proven using a tracing test. The flow velocity at low waters is relatively high, with an average velocity of 1.3 cm/s. The flow velocity between the Zijalo and Prečna springs was even as high as 4.1 cm/s, but was influenced by some additional rain (Kogovšek and Petrič, 2016). At high waters, faster flow can be expected, and at the same time also fast spreading of eventual pollution, even though dilution is also an important factor under said conditions.

### The Jelševnik and Otovski Breg springs

---

At the western border of the Bela Krajina karst plateau, several important karst springs are located under the



Figure 5: The river Temenica catchment.

higher forested karst plateau. The biggest one, the Dobljica Spring, is captured for regional water supply. Although this spring drains a sparsely populated karst area with extensive agriculture, the chemical status of this water is good. On the opposite, some springs, especially the Otovski Breg, have been characterized in recent years by far poorer water quality, with nitrate concentrations of between 10 and 18 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L. This is already above the threshold concentration for the olm (*Proteus anguinus*) which is an amphibian living in karst groundwater. The threshold value is estimated at 9.2 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L (Kolar, 2018). Excessive nitrate levels accompa-

nied by other pollutants is probably responsible for the disappearance of the proteus population at the Otovski Breg over the past decade. At the nearby Jelševniščica spring, a darkly pigmented subspecies of the olm (*Proteus anguinus parkelj*) was documented with eDNA, confirming a narrow expanse of less than 2 km<sup>2</sup> (Gorički et al., 2017). This, together with deteriorating water quality in the past decades, probably due to the excessive application of liquid manure on agricultural land, classifies this subspecies as highly endangered. In both cases, the small settlements in the catchment areas lack proper wastewater management, which is limited to the use



of porous septic tanks. Underground, the uptake of nutrients is highly limited due to the absence of primary (photosynthetic) production. Dilution, which should not be considered a solution, is likely to be the only efficient process of reducing contaminant concentrations in underground karst massifs.

As a response to unfavourable and threatened water quality, an environmental project was launched in October 2021 to (i) delineate the catchment areas of two targeted springs (the Jelševniščica and Otovski Breg), (ii) identify the source of pollution and (iii) identify and apply meas-

ures to improve water quality and reduce threats. For purposes of better interpretation, monitoring is not limited to only two highlighted springs (Jelševniščica and Otovski Breg) but also extends to ten others located in the vicinity (Figure 6). Three project partners from different research perspectives are working on the project and related activities, i.e. Karst Research Institute ZRC SAZU, Biotechnical Faculty UL, and Geological Survey of Slovenia. The project is financed by the Slovenian Research Agency, the Ministry of the Environment and Spatial Planning, and the Ministry of Agriculture, Forestry and Food.

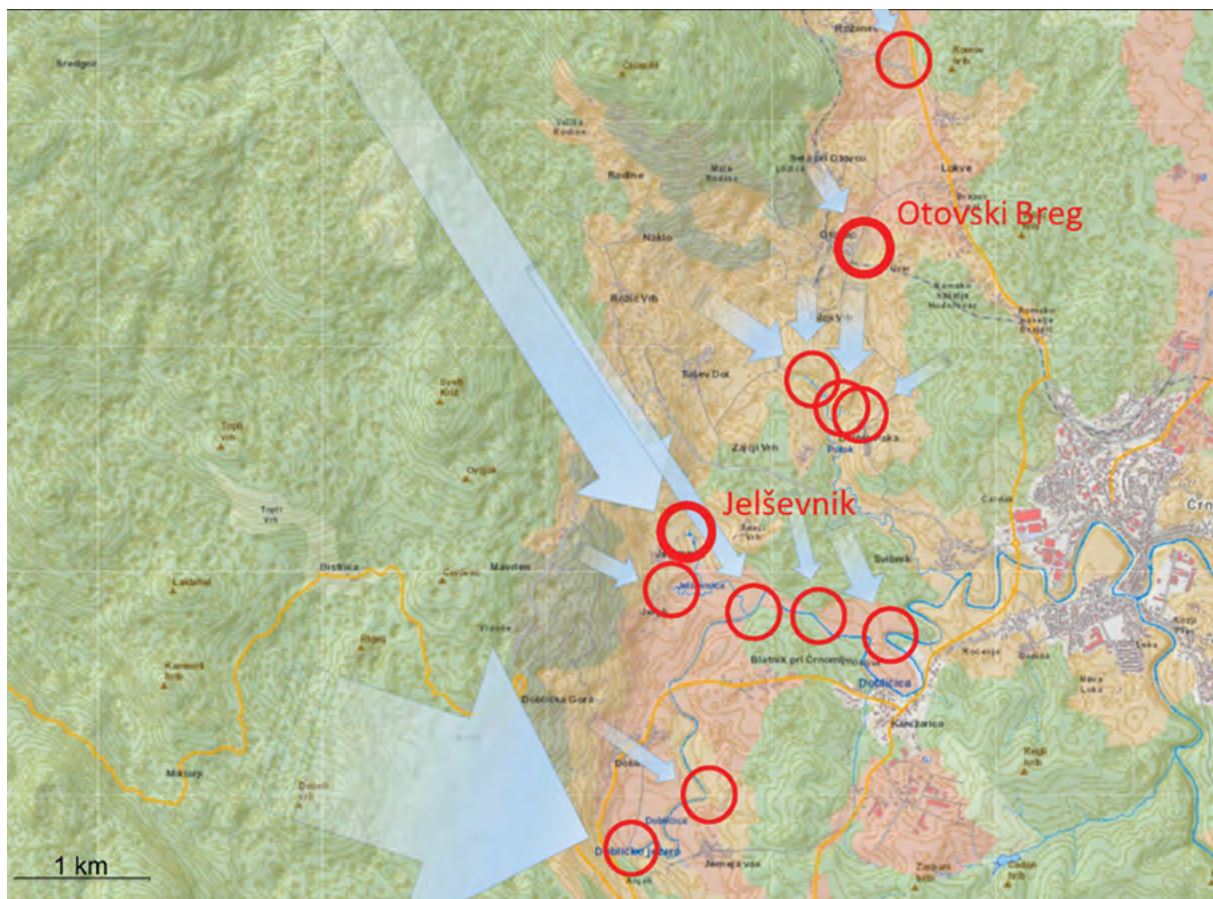


Figure 6: Sampled springs with plausible water flow direction and discharge (arrow width). Note differences in extent, land use (green-forest, light brown-agricultural land) and settlement distribution upstream of both highlighted springs.

Monthly field measurements (T, SEC, pH, O<sub>2</sub>) and water sampling for basic chemical and isotopic composition indicate different catchment areas and most probably also dilution effect, which is reflected in varying water qualities (Figure 7). The Jelševniščica spring drains more extensive and higher forested area, which results in better water quality if liquid manure application upstream of the spring is not excessive. The Otovski Breg drains a smaller and much lower catchment area with a far higher share of agricultural land and settlements in the catchment area. Significant differences have been detected in water T, SEC, isotopic composition ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) and concentrations of other pollutants, namely chloride and sulphate.

We expect that other methodologies employed, which include water level and discharge monitoring, hydrogeological mapping, microbial contamination of water, continuous nitrate monitoring for quantitative nitrogen mass balance, definition of natural background concentrations and anthropogenic inputs, passive sampling of emerging organic compounds, and X-ray analysis of sediments at the springs will help us delineate and characterize the catchment area, define the share of pollution between the most plausible sources (agricultural production and municipal wastewater), and improve existing and introduce new measures to minimize anthropogenic pressure in the next year.

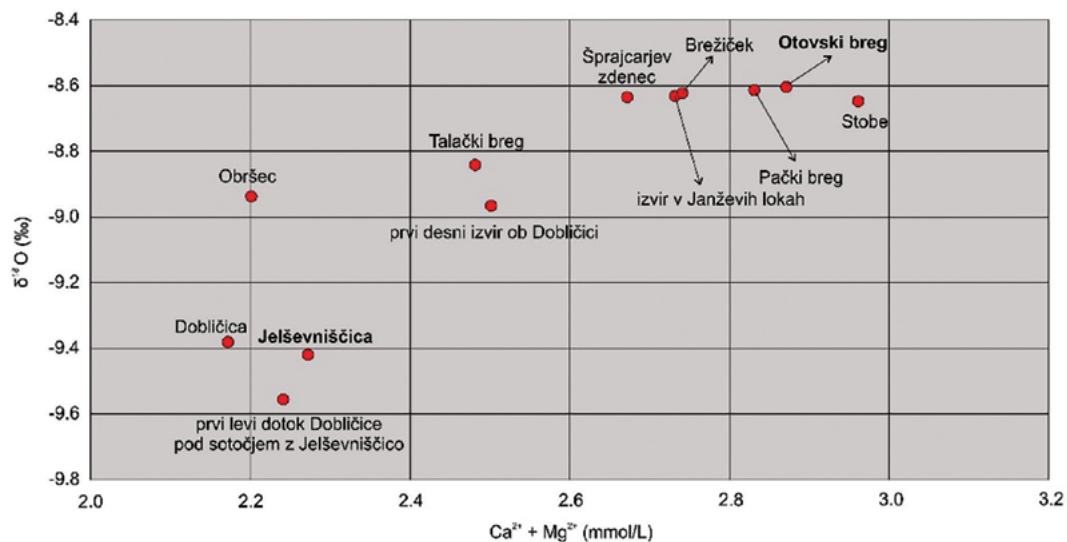


Figure 7: Mineralization of water represented by two by far the most common cations (Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>) compared with share of the  $\delta^{18}\text{O}$ . The Jelševniščica and Otovski Breg springs are bolded.

#### References:

- Brenčič, M. 2002: Geologija Kostanjeviške jame (Geology of Cave of Kostanjevica). In: Hudoklin, A. (ed.): Kostanjeviška jama (in Slovenian). Jamarski klub, Novo mesto; Klub jamarjev, Kostanjevica na Krki: 70-87.
- Buser, S. 1976: Tektonska zgradba južnozahodne Slovenije. In: Osterc, V. et al. (eds.): 8.jugoslovanski geološki kongres Bled 1.-5. oktober 1974. Ljubljana, Slovensko geološko društvo: 45-58.
- Buser, S. 1968: Osnovna geološka karta 1:100.000 - list Ribnica.- Zvezni geološki zavod, Beograd.



- Cao, G. L., Han, D. M., Currell, M. J., Zheng, C. M. 2016: Revised conceptualization of the North China Basin groundwater flow system: Groundwater age, heat and flow simulations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 127: 119-136.
- Čarman, M. 2010: Some cases of terrain instability from the Dolenjska karst area. *Geologija*, 53/2: 169-172.
- Gams, I. 2004: *Kras v Sloveniji v prostoru in času*. Ljubljana: Založba ZRC, ZRC SAZU: 515 p.
- Garven, G. 1995: Continental-scale groundwater flow and geologic processes. *Annual review of earth and planetary sciences*, 23: 89-118.
- Glavan, M., Pintar, M. 2010: Impact of point and diffuse pollution sources on nitrate and ammonium ion concentrations in the karst-influenced Temenica river. *Fresenius environmental bulletin*, 19(5): 1005-1014
- Gleeson, T., Manning, A.H. 2008: Regional groundwater flow in mountainous terrain: three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls. *Water resources research*, 44: W10403.
- Goldscheider, N., Mádl-Szónyi, J., Eröss, A. & Schill E. 2010: Review : Thermal water resources in carbonate rock aquifers. *Hydrogeology Journal*, 18: 1303–1318. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0611-3>
- Gorički Š., Stanković D., Snoj A., Kuntner M., Jeffery W.R., Trontelj P., Pavičević M., Grizelj Z., Năpăruș-Aljančić M., Aljančić G. 2017: Environmental DNA in subterranean biology: range extension and taxonomic implications for *Proteus*. *Scientific Report*, 7: 45054. <https://doi.org/10.1038/srep45054>
- Habič, P. 1982: Pregledna speleološka karta Slovenije. *Acta carsologica* 10: 5-22.
- Habič, P., Kogovšek, J. 1992: Sledenje voda v kraškem zaledju Krupe v JV Sloveniji. *Acta carsologica*, 21: 35-76.
- Knez, M., Slabe, T., Šebela, S. 2016: Karst uncovered during the Bič- Korenitka motorway construction (Dolenjska, Slovenia). *Acta Carsologica*, 33/2: 75-89. <https://doi.org/10.3986/ac.v27i2.511>
- Kogovšek, J., Petrič, M. 2016: Značilnosti pretakanja voda v kraškem zaledju Temenice. *Acta Carsologica*, 27/2: 221-233. <https://doi.org/10.3986/ac.v33i2.292>
- Kolar B. 2018: The threshold concentration for nitrate in groundwater as a habitat of *Proteus anguinus*. *Natura Sloveniae* 20(2): 39-42.
- Kovačič, G., Ravbar, N. 2010: Extreme hydrological events in karst areas of Slovenia, the case of the Unica River basin. *Geodinamica Acta*, 23/1-3: 89-100.
- Lapanje, A., Brenčič, M. 2015: Geološke in hidrogeološke razmere. V: PESKAR, R. (ur. Dolenjske Toplice v odsevu časa : [znanstvena monografija ob 800-letnici prve omembe Dolenjskih Toplic v zgodovinskih virih]. Dolenjske Toplice: Občina, 2015. Str. 39-52, ilustr. ISBN 978-961-281-758-9.
- Placer, L. 1999: Structural meaning of the Sava folds. *Geologija*, 41: 191-221.
- Polič, S., Leskovšek, H., Horvat, M. 2000: PCB pollution of the karstic environment (Krupa River, Slovenia). *Acta carsologica*, 29/1: 141-152.
- Premru, U., Ogorelec, B., Šribar, L. 1977: O geološki zgradbi Dolenjske = On the Geological Structure of the Lower Carniola. *Geologija*, 20: 167-192.
- Scheidler, S., Huggenberger, P., Dresmann, H., Auckenthaler, A., Epting, J. 2021: Regional groundwater flow and karst evolution—theoretical approach and example from Switzerland. *Environmental earth sciences*, 80: 201. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09471-3>
- Tóth, J. 1963: A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68/16: . 4795-4812.
- Tóth, J. 1999: Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology journal*, 7: 1–14.

## Managing vulnerable groundwater bodies: Case Dravsko polje

Guided by: Janko Urbanc, Nina Mali, Sonja Cerar

Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana (janko.urbanc@geo-zs.si, nina.mali@geo-zs.si, sonja.cerar@geo-zs.si)

### Introduction

Due to its favourable hydrogeological characteristics, such as good permeability and great thickness of the saturated zone, the Dravsko polje alluvial aquifer is considered one of the most prospective intergranular aquifers for drinking water supply in Slovenia (Figure 1). On the other hand, due to these hydrogeological characteristics, the Dravsko polje is one of the most susceptible aquifers to groundwater pollution. The poor chemical condition of the Dravsko polje aquifer is the result of excessive concentrations of nitrates and pesticides. The southern part of the aquifer is

particularly problematic, where the Skorba pumping station is located, and which supplies the city of Ptuj and its surroundings with drinking water. The problem of pollution of the lower Plioquaternary aquifer is presented by the high concentrations of nitrates in the groundwater. There are occasional problems with water quality in the water extracted from the Vrbanski plateau, where the region's largest pumping station is located. Some projects and activities aimed at the protection of drinking water quality have been carried out in the Vrbanski plateau and also in

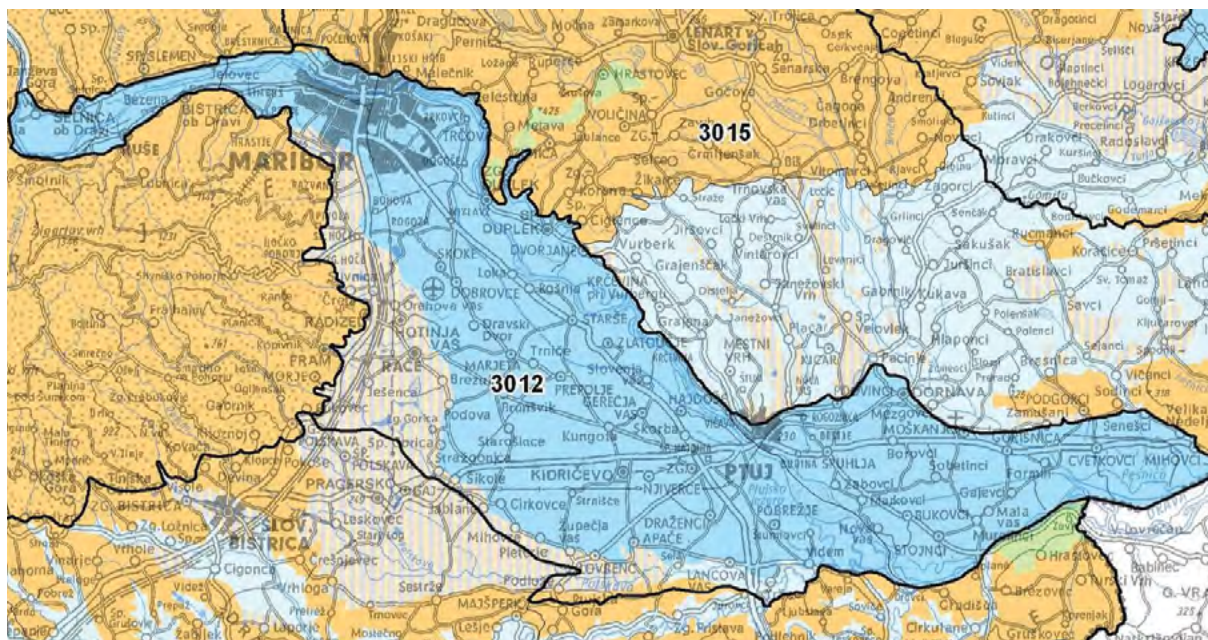


Figure 1: Aquifer of Dravsko polje.

Dravsko and Ptujsko polje. In addition to the pollution of groundwater with nitrates and pesticides, there is also pollution consisting of inorganic elements, most of which come from local sources of pollution and are therefore often not seen as characteristic parameters for the pollution of groundwater flow in the Dravsko polje. The closed Rdeče blato landfill for non-hazardous waste is an example of such loadings, where operational monitoring of the state of the groundwater is currently being carried out since 2015.

### Hydrogeological description of the Dravsko polje aquifer

Dravsko polje is the floodplain of the Drava River, which is filled with Holocene and Pleistocene gravel, sand, and clay loam sediments (Žlebnič, 1982). In the north, it starts with the urban area of the city of Maribor and extends towards the south as a predominantly agricultural area with smaller settlements. Dravsko polje ends on the SE side near Ptuj by the Drava River, where Ptujsko polje begins

to the east. There are three aquifers in the Dravsko polje area (Figure 2; Klasinc, 2013). The first aquifer is the upper Drava gravel and sand aquifer – an alluvial aquifer consisting of coarse-grained terrestrial sediments (gravel and sand) of Quaternary age. The second aquifer is an aquifer in Tertiary sediments, which consists of sand, gravel, silt, clay, and marl of Tertiary age. The third aquifer is a thermal aquifer in deeper Tertiary sediments and pre-Tertiary bedrock. It consists of sand, gravel, silt, clay, and metamorphic rocks, and in some places carbonate rocks.

All three aquifers are developed in the vertical direction over practically the entire area. The first, alluvial aquifer, is located on the surface and down to a depth of approximately 32 m, the second aquifer in Tertiary sediments is generally located from a depth of 40 m and most often down to a depth of approximately 200 m, and the third, thermal aquifer, is at 1,000 and more meters deep the deepest. The distribution of pollution along the depth of the first aquifer is fairly uniform. Part of the water body with poor groundwater chemical status is located in the alluvial aquifer.

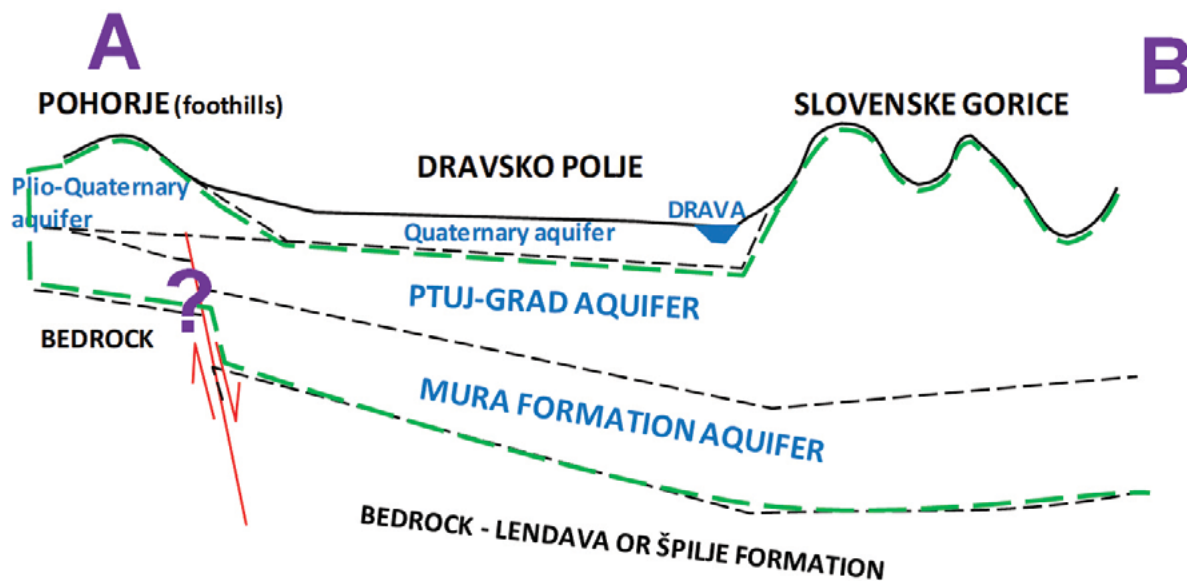


Figure 2: Conceptual model of the Dravsko polje aquifers (Klasinc, 2013).

The supply of drinking water is already largely supplemented by underground water from the second aquifer, owing to the poor quality of the water in the upper aquifer. The available groundwater reserves in the Ptujsko-Grajsko polje tertiary aquifer are much more limited and cannot replace all of the water from the upper aquifer. In addition, there is already a serious risk of the penetration of contaminated water from the alluvial aquifer into the tertiary aquifer due to the drop in hydraulic pressure in the process of exploiting water from the tertiary aquifer.

One of the most important observation stations for monitoring changes in nitrate concentrations in the underground water of the upper Dravsko polje aquifer is the Skorba pumping station (Figure 3). In addition to continuous measurements of nitrate concentrations in groundwater with a UV\_VIS spectrometer, groundwater level, temperature, and electrical conductivity sensors are also installed, as well as a small meteorological station measuring air temperature and precipitation. Each station also has TDR meters for measuring the water content and temperature



Figure 3: Measurement station Skorba V-2 for nitrate content in groundwater.

of soil. Measurement data is transferred via a GSM connection to the database at the Geological Survey of Slovenia, where it is processed and prepared for further use.

### Overview of drinking water in Maribor

Maribor is the second largest city in Slovenia, situated in the northeast of the country along the easternmost part of the Alps atop alluvial deposits of the Drava river. As a consequence of the town's growth and its industrial development, pollution has become a major problem. The Maribor waterworks is a regional drinking water supply system for Maribor, Lenart, Pesnica, Ruše, Kungota, Duplek, Šentilj, and partly Radgona. Each day, 35,000 m<sup>3</sup> to 40,000 m<sup>3</sup> of drinking water is pumped from 26 wells at 7 pumping stations (Vrbanski plato, Bohova, Betnava, Dobrovce, Ruše, Selniška dobrava, and Šentilj-Ceršak) and sent into the network, which extends more than 1600 km.

Approximately 60 % of Maribor's water needs are sourced from the Vrbanski plateau recharge area in the northern outskirts of the city. In the distant past, the groundwater of the Vrbanski plateau was polluted with chromium. As a result, constant artificial recharge with water from Mariborski otok had to be introduced in 1986. This recharge causes a local rising of groundwater levels outside the city, thus preventing the intrusion of polluted water. Yet it became clear that further problems and stagnation of the water supply could only be prevented through intensive, well promoted investments into the new DEVELOPMENT PROGRAMME. The programme is based on analysis and investigations aimed at finding workable solutions, taking into account recent changes, ensuring water quality, rationalizing energy consumption, and the workforce. The development programme was part of a larger effort to solve problems related to the quality and quantity of Maribor's drinking water, together with the problem of increasing water losses in the system. The artificial recharge of 75 l/s from Mariborski otok no



longer ensured a sufficiently high quality of water from the Vrbanski plateau. Immediate action was undertaken, and the amount of recharged water was doubled to 150 l/s; currently, 130 l/s of water is recharged.

Nevertheless, the problem of drinking water quality, especially of the water from Vrbanski plateau, still remains unsolved, which is largely due to the resources being located under the polluted city and in growing transit traffic in the region. Another more serious issue lies in the fact that continuous monitoring had shown bad mud deposits on the left bank of the Drava river along Mariborski otok. The static potential water level of the Vrbanski plateau reservoir near Drava river has fallen. The spread of polluted groundwater from any part of the city is becoming increasingly dangerous. The plan of the Maribor Waterworks is to provide maximum protection of the water resources in the Vrbanski plateau, in order to provide a reasonable starting point for a medium-term plan, which would see reducing dependence on a single water source by activating an additional water resource, e.g. that in Selniška dobrava.

In the framework of the above stated problems in Maribor's water supply, three research actions were carried out in the past:

#### ***Groundwater protection zones***

Since 1991, pollution involving chlorinated solvents in the Maribor area has been critical. The pollution moves from the city towards the pumping station. It has been determined that potential polluters are active on the right bank of the Drava river, which leads to the possibility of groundwater flow under the Drava from the right to the left bank. The protection zones for the Vrbanski plateau at that time extended to the Drava river. Over the years, the water table has fallen. The exploitation of water resources has a wider impact than water extracted from wells, which reached beyond the protection zones of the time. Groundwater protection zones were reviewed for the Vrbanski plateau and for the recharge areas of the Lim-

buška dobrava, Pohorje, and the right bank of the Drava river in the east. A mathematical model was implemented for this purpose. The results indicate that the entire area extending from Limbuška dobrava to Dravsko polje is mainly recharged from the Drava: the largest share of water is recharged at Limbuška dobrava from the accumulation at Mariborski otok; less is recharged at the Meljski dam, and the smallest part in the area of Mariborski otok. A considerable amount of groundwater also flows from the recharge areas on Pohorje and Dravsko polje. In the east, the water also flows to the pumping station under the Drava. Interpretations of groundwater flow on the basis of chemical and isotope analyses confirmed the results of the mathematical model. The assumption that the zone of depression extends eastwards under the Drava was confirmed, thus the protection zones were extended in this direction up to the groundwater divide with its recharge area towards Pohorje. As water from the wells on Mariborski otok for the most part originates in Limbuška dobrava, the whole of Limbuška dobrava with its recharge area was also included in the groundwater protection zone.

#### ***Investigations into the artificial recharge and protection of groundwater in the Vrbanski plateau***

Extensive experience of pumping drinking water for Maribor from the Vrbanski plateau, years of the artificial recharge of groundwater by pumping water from Mariborski otok, extensive hydrogeological investigations of the aquifer, and chemical analyses of groundwater all provide sufficient data and knowledge to draw the following conclusions:

- The protection and capacity increase of the Vrbanski plateau pumping station are inevitably connected with the artificial recharge of groundwater.
- The artificial recharge of groundwater, provided that it is performed correctly as regards technology and quantities, can entirely prevent the pollution of groundwater coming from the city area and from the right and left banks of the Drava.
- Sufficient hydrogeological data on groundwater flow and the impermeable basement of the aquifer extend-

ing from Limbuška dobrava, over Mariborski otok and Vrbanski plateau to the area under Maribor on both riverbanks is available.

The researchers behind the project are of the opinion that the investigation offers a quick and reliable way of obtaining the required results, which consist in increasing capacity and safer, higher quality groundwater free from pollution.

#### ***Determination of water reserves and groundwater protection zones in the quaternary deposits of Selniška dobrava***

The problem of extracting sufficient quantities of good quality water from the Vrbanski plateau aquifer brings up another question, namely that of retrieving additional water in the event of environmental accidents. Since 1993, the Selniška dobrava aquifer, which is 20 km upstream from Maribor along the Drava, has been under investigation. So far, investigation results confirm that this aquifer is a suitable alternative water resource for the supply of Maribor and surroundings. The main aquifer is located in the gravel deposits of the old bed of the Drava running parallel to the present riverbed. The aquifer is recharged from the Drava through the infiltration of precipitation and through seepage from the upper terrace aquifer. Within the scope of the investigation, geoelectrical measurements were taken to determine the basement: eight piezometers were set up, a test well was constructed, water levels were measured, and samples were taken for chemical analyses. It is estimated that the water-saturated zone of the main aquifer is about 12 m thick and the overlying stratum is 30 m thick, while the aquifer's permeability is  $8.10^{-3}$  m/s. The area most suitable for well construction is forested, which is favourable for the protection of groundwater, especially in the vicinity of the pumping site. Chemical analyses of water samples determine that the water is suitable for public supply purposes. The research results show that the Selniška dobrava aquifer is a suitable additional water resource with which to supply Maribor.

The facts presented serve as evidence that there are different approaches to solving the water supply problems in Maribor. On the basis of investigations, the most satisfactory solution for Maribor's inhabitants will have to be chosen as soon as possible. The areas around the pumping stations of the Maribor waterworks are becoming intensely urbanized, which adds to the problem of effectively protecting the Quaternary deposits in direct interconnection with the Drava. Hence, increased pollution levels are to be expected also in the future. Although the situation at these pumping stations will improve by water treatment (different pollutants require different treatment procedures, making the operation of water treatment plants technologically demanding), a new water resource will have to be found, taking into account the development of the city and its drinking water needs. Selniška dobrava represents the most appropriate area for such an undertaking.

#### **Rdeče blato landfill**

---

Landfills are a necessary part of our way of life. They are generally considered a minor local nuisance, but they can be a major environmental problem, especially from the point of view of groundwater pollution. After the leachate permeates the waste deposits and reaches groundwater and surface water, it can also cause contamination in the wider environment. Contamination in groundwater may degrade for decades or even centuries. Because landfills have the potential to produce leachate for several hundreds of years, the proper operation of all landfill systems must be ensured during the process of waste site closure. During the time the waste is being degraded, proper operation of all landfill systems must be ensured, while monitoring groundwater status. Such monitoring is carried out in the hydrogeological target zone, a lithostratigraphic unit where groundwater contamination may occur due to leaching of contaminants from the pollution area (Cerar et al., 2022).

One example of a point source of pollution is the closed, non-hazardous waste landfill of Rdeče blato (Figure 4), located on the flat part of Dravsko polje in the municipality of Kidričevo. The landfill is located about 2 km west of the Kidričevo industrial area and lies northwest of the Pehlišče inert waste landfill (distance about 200 m). Today, the landfill covers a total area of about 47 ha and consists of two landfill fields that were used in the past for the disposal of red mud. Red mud, a waste product of bauxite mining in the production of aluminium in the Alumina Factory (TGA) and later in Talum d.d., was deposited in a liquid state in the landfill between 1954 and 1991. In 1991, the landfill was revitalized with manure, sewage sludge from the Ptuj sewage treatment plant, ash, and soil. The revitalized area was planted with trees and grass. Only an area of about 7 ha remained active (Figure 4), which was used by

the Silkem d.o.o. company for the disposal of waste from the production of silicates (water glass, zeolites) and special clays. Partial revitalization of the landfill was completed in August 2006. By 2005, the height of the waste was estimated to be between 16 and 17 m. On 31<sup>st</sup> October 2007, the deposit of waste at the Rdeče blato landfill was closed. In total, some 4–5 million tons of waste are thought to have been deposited at the landfill.

The red mud was deposited on natural topsoil without adequate impermeable protection. Landfill drainage (own or leachate, recharge water, and precipitation) is not regulated. Earth trenches are dug along the landfill surface and at the landfill edge to drain water from precipitation, in which the water spreads freely and sinks into the highly permeable soil. No groundwater-protective sealing is



Figure 4: The location of the Rdeče blato landfill on the orthophotograph. Silkem's waste disposal area marked in orange.

known to have been installed before landfilling began. Thus, the leachate from the waste can initially enter the groundwater in a vertical direction, but when it reaches the groundwater, the pollution spreads in a horizontal direction, i.e. in the direction of groundwater flow (west-east) (Ivanuša-Šket et al., 2013).

The landfill is located on gravelly Quaternary layers of sand that lie at the upper end of the geologic profile and represent a highly permeable open aquifer, in which the groundwater table fluctuates freely depending on the recharge rate. In the area of the landfill, groundwater is recharged by runoff from the western side of the Pohorje Mountains and directly by the infiltration of precipitation. The Dravsko polje aquifer is in general very permeable ( $K = 10^{-3}$  m/s). Based on the permeability measurements in the observation wells, a permeability coefficient of between  $2.17 \times 10^{-4}$  and  $5.01 \times 10^{-3}$  m/s was determined. The base of the aquifer is formed by the deeper Pliocene and Miocene strata, which exhibit different permeabilities.

The groundwater in the landfill area flows from west to east, with a flow rate of about 1.73 m/day. The groundwater table is in a medium to low range, about 6 m below the surface, at an elevation of about 235 m a.s.l. The impact area of the landfill consists of a layer of poorly sorted sandy gravel with silt, saturated to an average thickness of 35 m. It covers the area where the landfill is located and the downstream area where pollution spreads from the area of the landfill body. Potential recipients of groundwater pollution from the landfill area are the Drava River, which is about

9 km away from the landfill, the Kidričevo water pumping station, and the drinking water supply pumping stations Skorba in the north and Lancova vas in the south, as well as the ecologically important area of 42,500 Dravsko polje, the impact of which has not yet been determined.

It is important to know the extent of groundwater contamination in order to determine the necessary remediation measures, especially with regard to drinking water supplies. The results of the chemical analyses of the groundwater show that the most severe contamination of groundwater by landfill is present in the downstream wells, which is reflected in increased electrical conductivity and a significantly more basic pH, which is not typical for Slovenia. Increased mineralization or electrical conductivity downstream of the landfill is the result of groundwater contamination by sodium and sulphate.

The microelements, defined as indicative parameters for monitoring the impact of the landfill on the groundwater status, mostly occur at trace levels or are below the limit of quantification of the analytical method (LOQ). The greatest contamination of groundwater is manifested mainly in very high levels of aluminium, arsenic, molybdenum, and vanadium. Among them, aluminium and arsenic exceed the limits for drinking water. The results of chemical analyses of groundwater show that the contamination plume extends in a narrow strip from the landfill in the direction of groundwater flow at least as far as Talum d.d., while the impact on the drinking water pumping stations of Skorba and Lancova vas has not yet been determined.

---

#### References:

- Cerar, S., Serianz, L., Koren, K., Prestor, J., Mali, N. 2022: Synoptic risk assessment of groundwater contamination from landfills. *Energies*, 15/14: 5150. <https://doi.org/10.3390/en15145150>
- Ivanuša Šket, H., Brenčič, M., Keršmanc, T. 2013: Program obratovalnega monitoringa podzemnih voda za zaprto odlagališče nenevarnih odpadkov Rdeče blato – Talum d.d. Zavod za zdravstveno varstvo Maribor – Inštitut za varstvo okolja, Maribor: 76 p.
- Klasinc, M. 2013: Pliocenski vodonosnik Dravskega polja : diplomsko delo. Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana: 85 p.
- Žlebnič, L. 1982: Hidrogeološke razmere na Dravskem polju. *Geologija*, 25: 151–164.



## SPONZORJI IN RAZSTAVLJALCI

## SPONSORS AND EXHIBITORS

Generalna sponzorja/General sponsors

---



**GeoZS**

**Geološki zavod  
Slovenije**

---

**IRGO**

---

## Zlati sponzor/Golden sponsor

---



## Razstavljalci/Exhibitors

---





## Sponzorji/Sponsors

---



Univerza v Ljubljani  
Naravoslovno-tehniška fakulteta  
Oddelek za geologijo

**Elea iC** a member of iC group



**GeoSi** Inštitut za zemljeslovje



**dana**

**Donat**<sup>®</sup>



KMETIJA  
UKMAR - PRIMOŽEVI  
KRALJICA TERANA  
2022 - 2023



*Hiša vin  
Emino*

Gostitelj/Host

---



Občina  
**ROGAŠKA SLATINA**

---