



OPTIMIZACIJA IZKORIŠČANJA TERMALNE VODE IZ REGIONALNIH NIZKOENTALPIJSKIH GEOTERMALNIH VODONOSNIKOV Z METODO MATEMATIČNEGA MODELIRANJA TOKA PODZEMNE VODE TER PRENOSA SNOVI IN TOPLOTE



Trajanje projekta: 1.12.2013 do 30.6.2015

dr. Nina Rman, Ljubljana, 16.6.2016



OPREDELITEV TEME

Raba termalne vode v SV Sloveniji

- 73% vseh vrtin v Murski formaciji

- Odvzem vode je v zadnjem desetletju porasel, zdaj raste nekoliko počasneje

- Odvzem 1960-2013

71,6 mio m³ (68% MF)

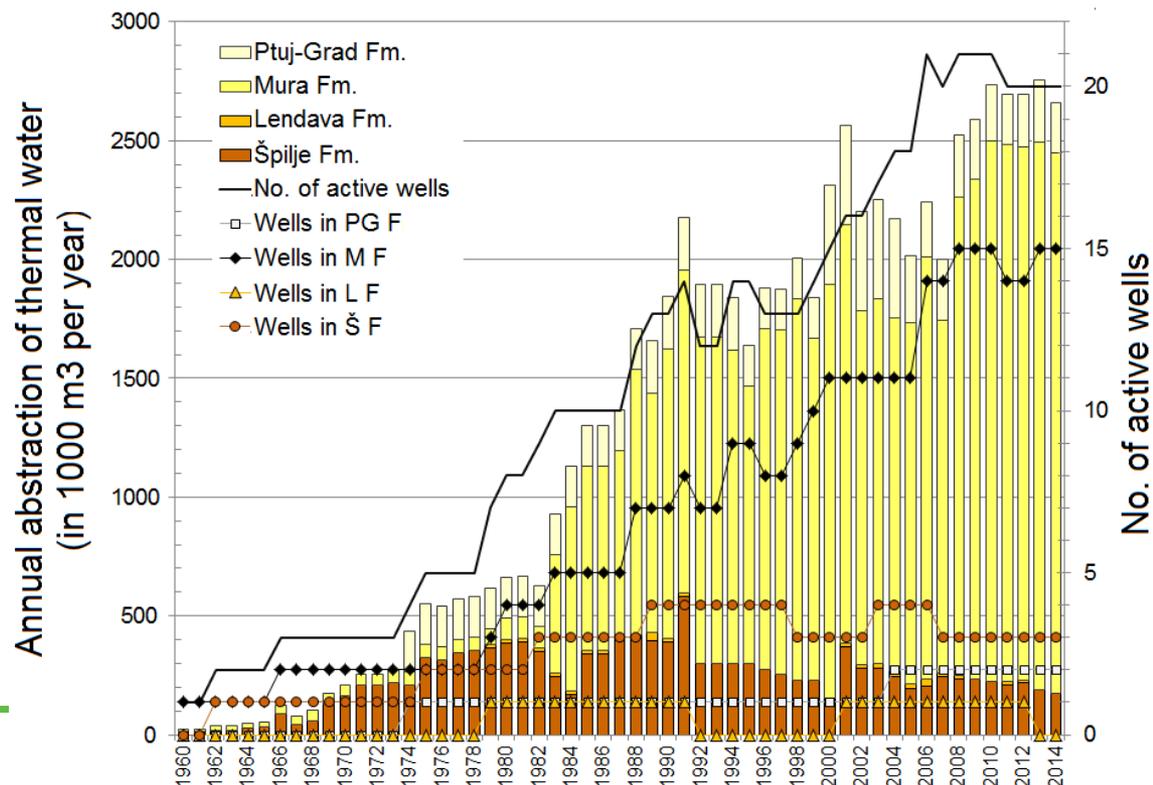
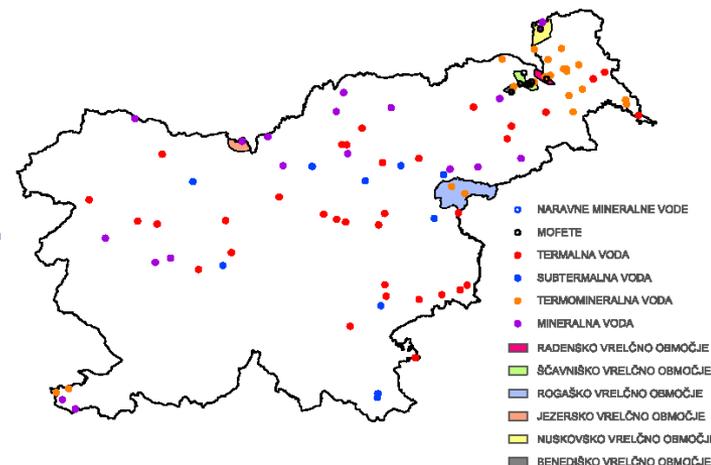
- Odvzem v 2014:

2,8 mio m³ (84% MF)

- Napoved:

5,5 mio m³ (79% MF)

TVEGANJE ZA VELIK ODVZEM



CILJI OPERACIJE

Cilji operacije so bili:

SKLADNI CILJI RAZPISA:

- izboljšanje kakovosti raziskovalnega dela,
- okrepitev sodelovanja med RO in GOSP,

PRILAGOJENI POTREBAM GOSPODARSTVA:

- optimizacija rabe termalne vode,
- opredelitev hidrodinamskih in geokemičnih trendov opazovanega sistema ter
- opredelitev vplivnih radijev geotermalnih vrtin.

Vsi cilji so bili doseženi z rabo nove metodologije za oceno trendov in optimizacije rabe nizkotemperaturnih geotermalnih vodonosnikov.

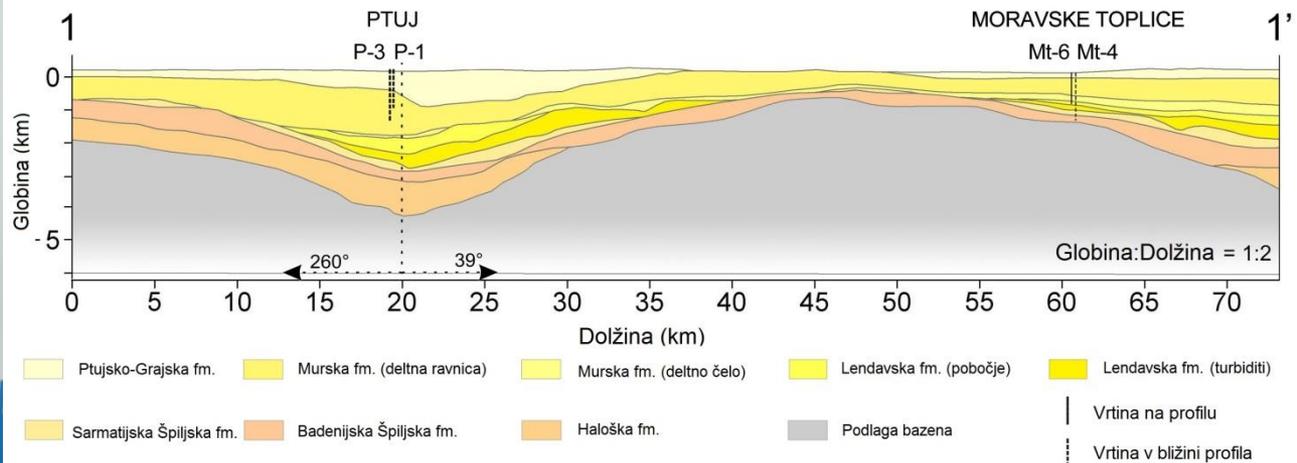
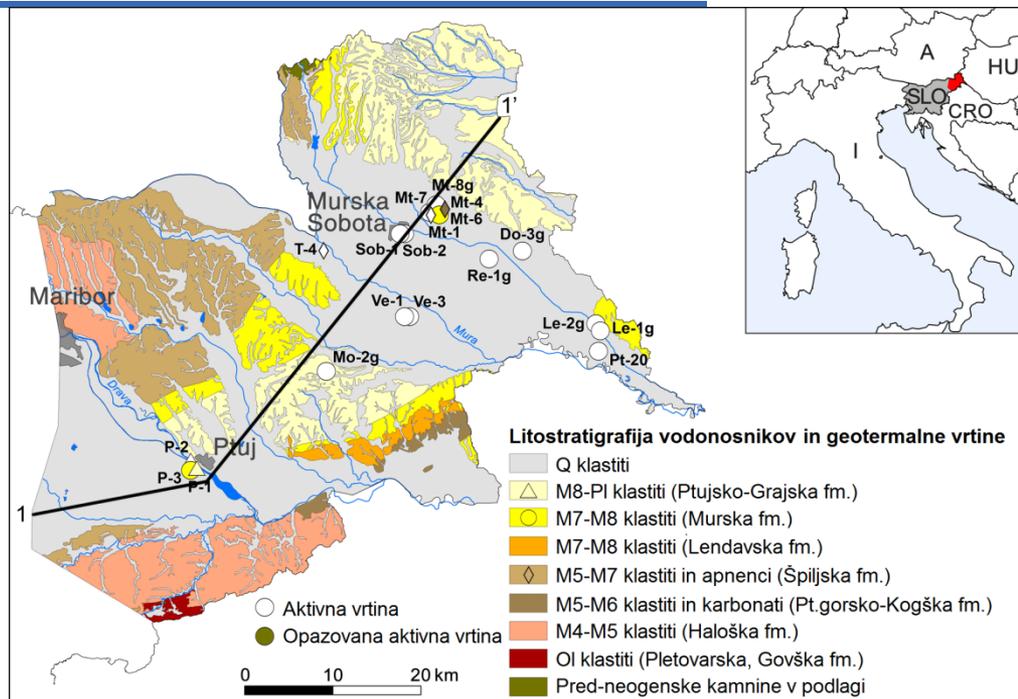
- Pogodba med MIZŠ in GeoZS št. 3330-14-509001
- Pisni sporazum o sodelovanju med GeoZS in Savo Turizmom d.d. št. 1160-20/2014 z dne 20.3.2014
- Tesno sodelovanje med strokovnim osebjem Save Turizma d.d. na testnih lokacijah Moravske Toplice in Ptuj, za kar se jim iskreno zahvaljujemo.

FAZNI PRISTOP PROJEKTA

1. Izdelava konceptualnega modela geotermalnih vodonosnikov v Mursko-Zalskem bazenu, interpretacija trendov arhivskih podatkov in zasnova opazovalnega sistema izbranih geotermalnih vrtin.
2. Vzpostavitev opazovalnega sistema gladine, temperature, odvzema in elektroprevodnosti termalne vode na izbranih črpalnih in opazovalnih vrtinah ter enoletno mesečno hidrogeokemijsko vzorčenje termalne vode iz izbranih štirih vrtin (P-1 in P-3 v Termah Ptuj ter Mt-4 in Mt-6 v Termah 3000).
3. Izdelava 3D geološkega modela in matematičnega modela nizkoentalpijskih geotermalnih vodonosnikov z oceno vpliva vrtin na regionalno količinsko stanje vodonosnika.
4. Ugotovitev primernih lokacij za postavitev reinjekcijskih vrtin na območju črpališč Save Turizma d.d. z določitvijo točke toplotnega preboja v črpalnih vrtinah.

GEOLOŠKI KONCEPTUALNI MODEL in REGIONALNI TOK TERMALNE VODE

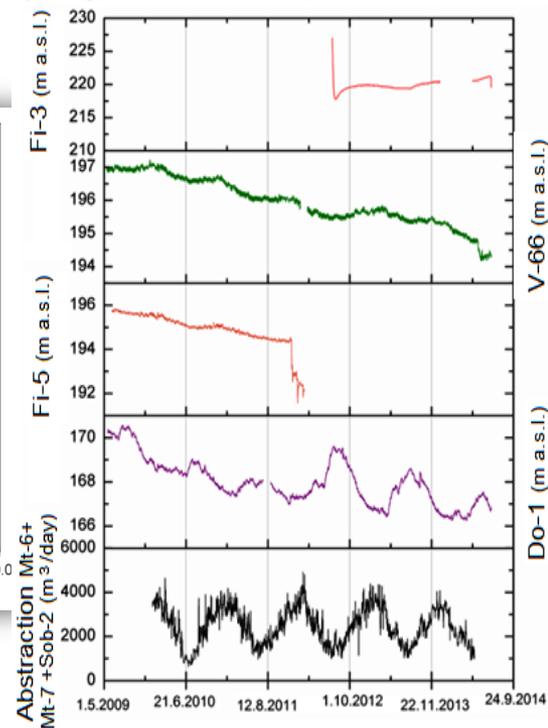
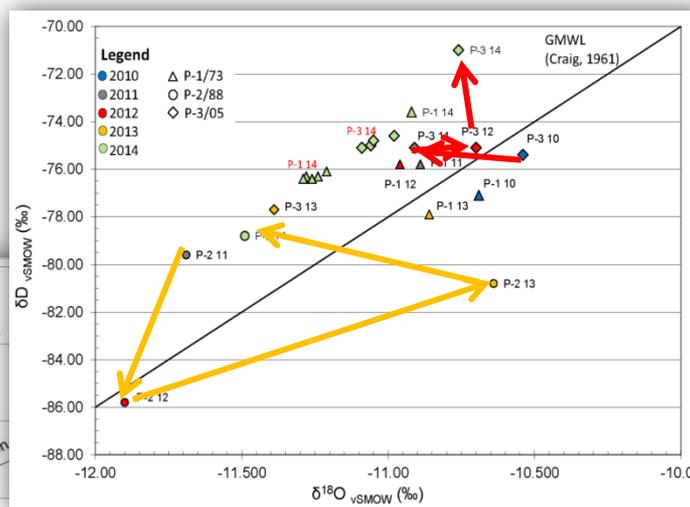
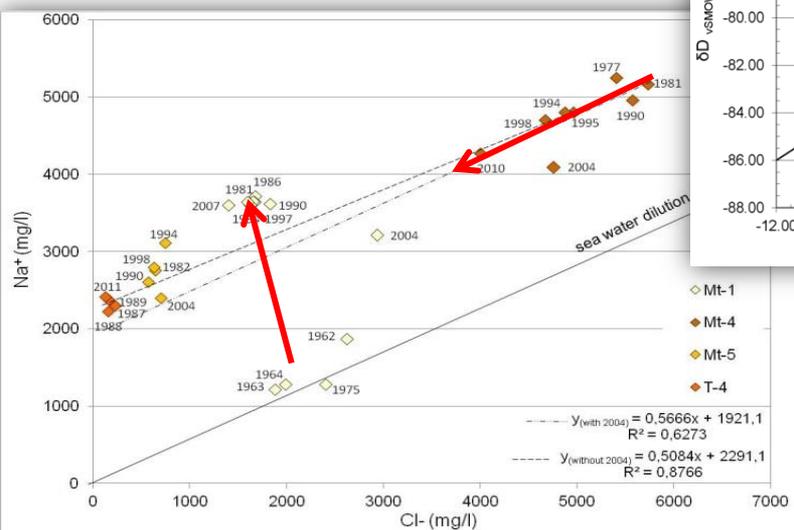
- 3 regionalni vodonosniki v neogenskem Mursko-zalskem sedimentacijskem bazenu
- Najpomembnejši je slabo sprijeti pesek Murske formacije z regionalnim tokom vode
- Globina do 2 km s T vode do 65 °C



HIDRAVLIČNI IN HIDROGEOKEMIJSKI KONCEPTUALNI MODEL

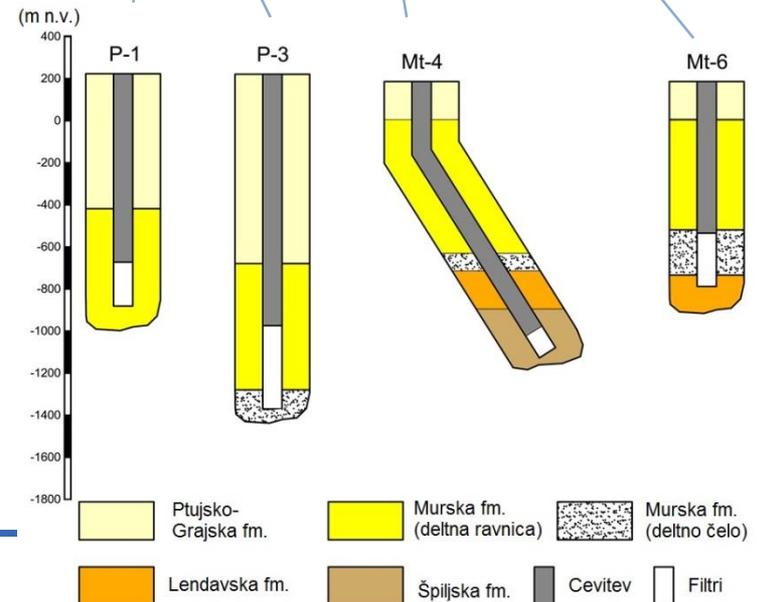
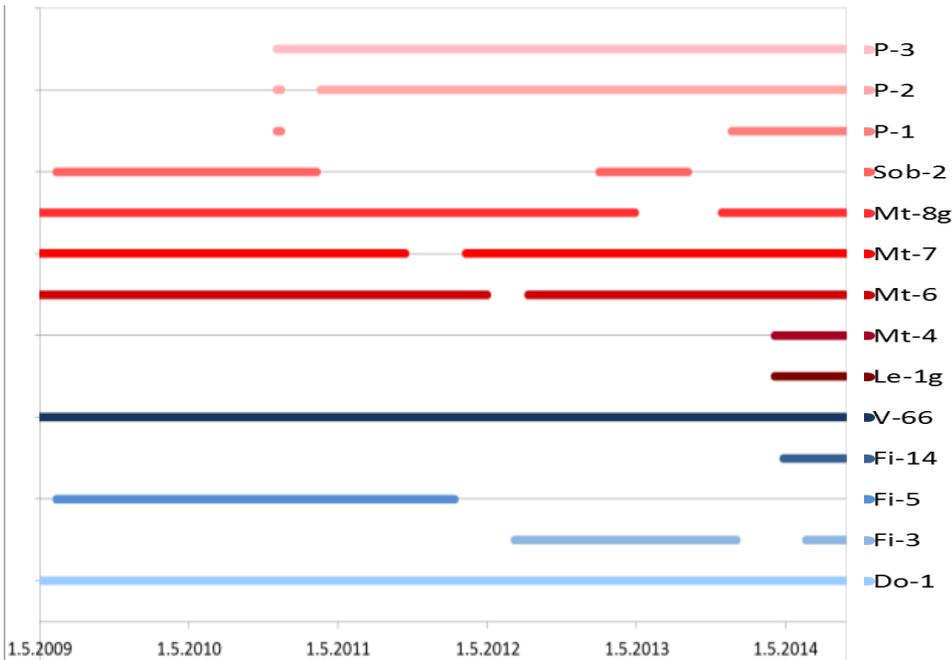
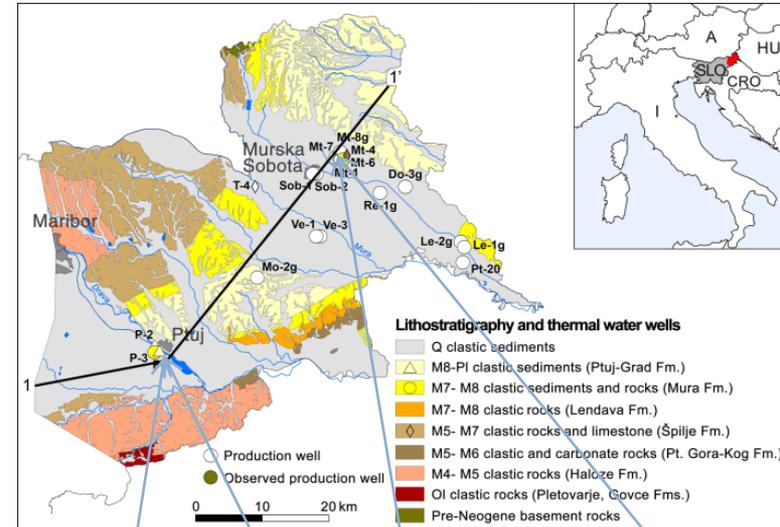
- Pleistocenska paleo-meteorna voda
- Analize geokemičnih trendov (1960-2013): ↓ ↑ TDS, Cl⁻, HCO₃⁻, Na⁺, ↑ plina
- Analiza urnih hidravličnih meritev (2009-2013): letno znižanje gladine ~0,5 m

TVEGANJE ZA DOLGOROČNE SPREMEMBE STANJA



VZPOSTAVITEV OPAZOVALNEGA SISTEMA VRTIN

- 4 vrtine s termalno vodo do 74°C
- Globine 720 do 1570 m
- Gladina, temperatura, odvzem
- + 3 aktivne (Le-1g, Mt-7, Mt-8g)
- + 4 opazovalne (Do-1, Fi-3, Fi-14, V-66)

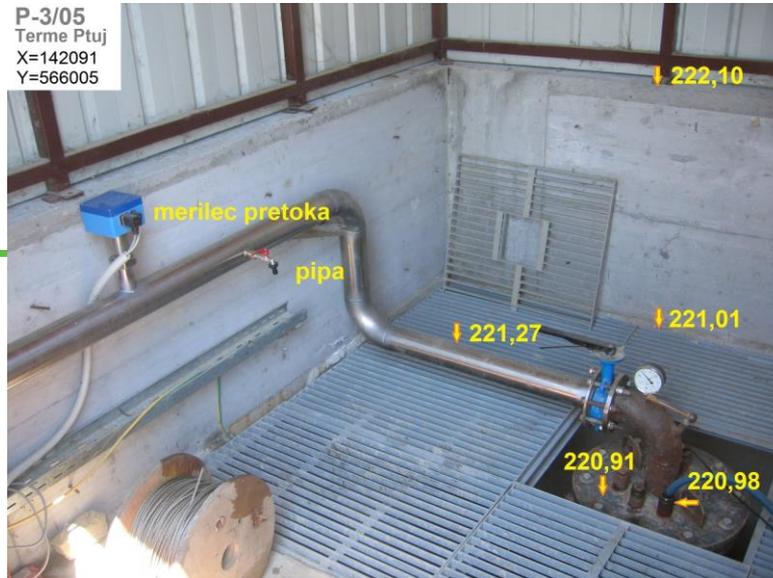


VZPOSTAVITEV OPAZOVALNEGA SISTEMA VRTIN





a) Vrtina P-1



b) Vrtina P-3



c) Vrtina Mt-4



d) Vrtina Mt-6

VZORČENJE TERMALNE VODE



- Mesečne analize: Feb. 2014 – Jan. 2015

- Standardni postopki za vzorčenje podzemne vode

Terenske meritve

- T, pH, EC: pH/Cond 340i, AC $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, ± 0.01 , $\pm 0.5\%$

- Raztopljen kisik: FDO 925; ORP: SentixORP

- Alkalnost: terenski pribor

Značilni in konservativni ioni

- 36 x Natrij: ICP-AES at MFGI, DL 0.03 mg/L, AE $\pm 2\%$.

- 52 x Klorid: IC EC UV detec., DL 0.1 mg/L, AE $\pm 2/20\%$

- MFGI laboratorij v Budimpešti

Stabilna izotopa $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$

- 52 x Picarro 2130i v Hydroisotopu, AE ± 0.10 , 1.0% (4 duplikati)

- 2 x MS Isoprime na JSI v Ljubljani, AE $\pm 0.1\%$, 1.0% (2 duplikata)

Analize plinov v mineralni in termalni vodi

- 12 x Žlahtni plini, volumski delež in izotopska sestava

- GFZ Potsdam

Neparametrične metode statistične obdelav, AquaChem, Statistica

IZVOR VODE IN PLINA VARIABILNOST SESTAVE VODE

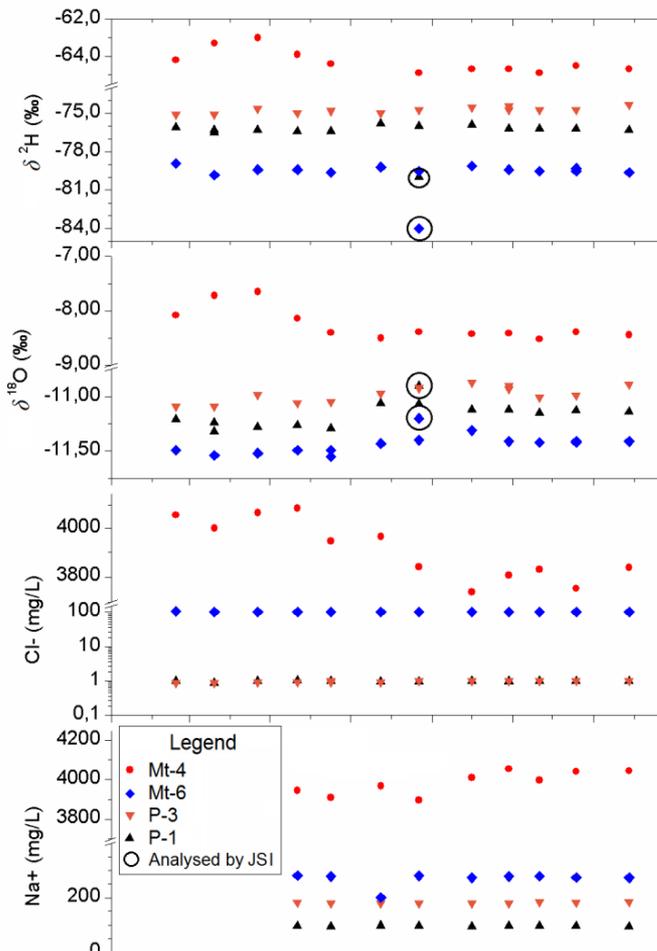
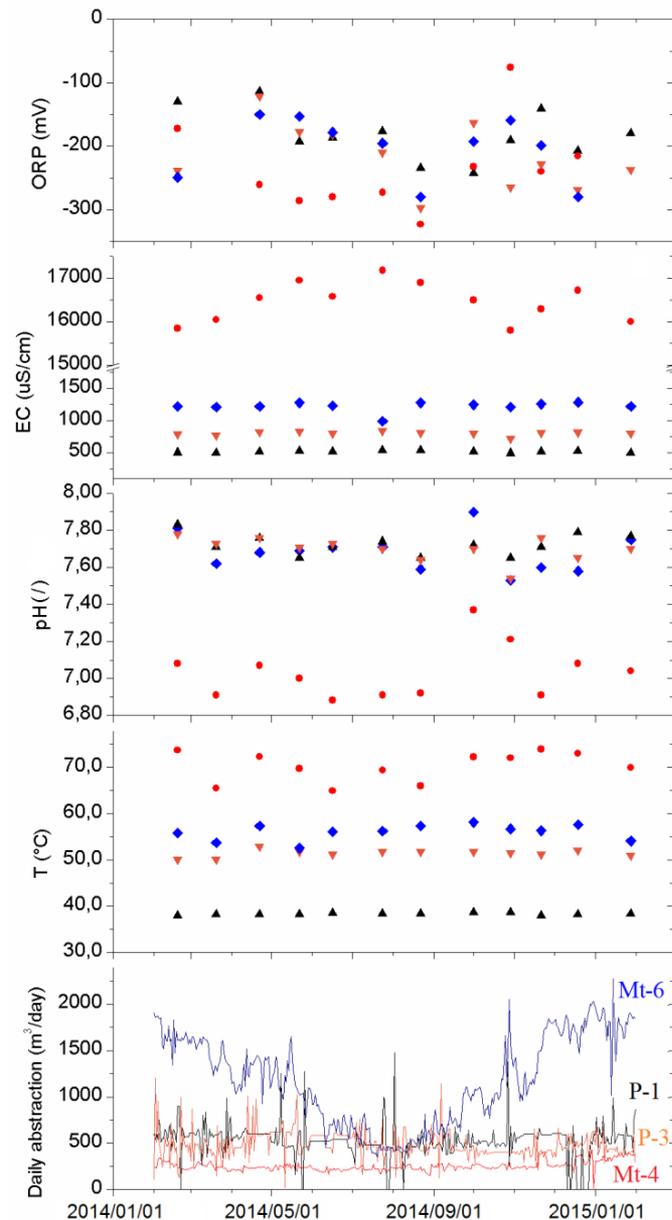


DOSEŽEN MEJNIK 1

Reinterpretacija arhivskih podatkov in
zasnova opazovalnega sistema izbranih vrtin



MESEČNA NIHANJA



- N=12
- Linearna korelacija in regresija

Ni sprememb:

- pH, EC, ORP

Obogatitev:

- Na (Mt-4), $\delta^{18}\text{O}$ (P-3, Mt-6), $\delta^2\text{H}$ (P-3)

Osiromašenje:

- Cl (Mt-4), $\delta^{18}\text{O}$ (Mt-4)

Parameter	P-1	P-3	Mt-6	Mt-4	r (%)
Q (m³)	191,270	175,279	430,906	92,178	/
T (°C)	38.3±0.2	51.4±0.8	56±1.7	70.2±3.2	6
pH	7.72±0.06	7.7±0.07	7.68±0.11	7.03±0.15	3
EC (µS/cm)	517±16	802±32	1222±78	16445±455	8
ORP (mV)	-181±40	-217±52	-204±49	-236±70	62
Na⁺ (mg/L)	95.7±1.1	182±2	277±3	3986±59	2
Cl⁻ (mg/L)	0.99±0.03	0.96±0.06	102±2	3911±124	8
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-11.17±0.08	-10.99±0.08	-11.44±0.06	-8.26±0.3	5
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-76.2±0.2	-74.8±0.2	-79.4±0.2	-64.4±0.8	2

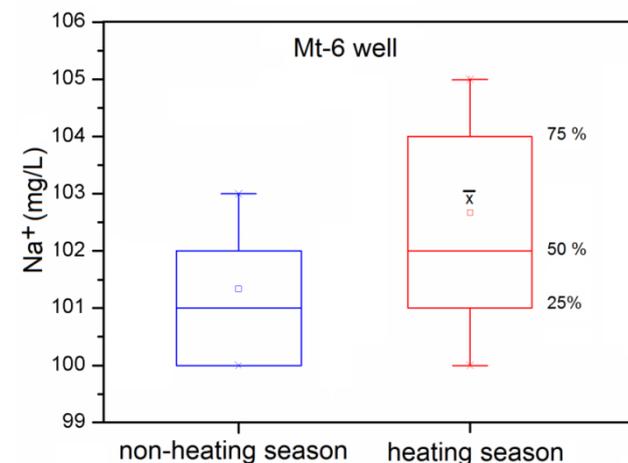
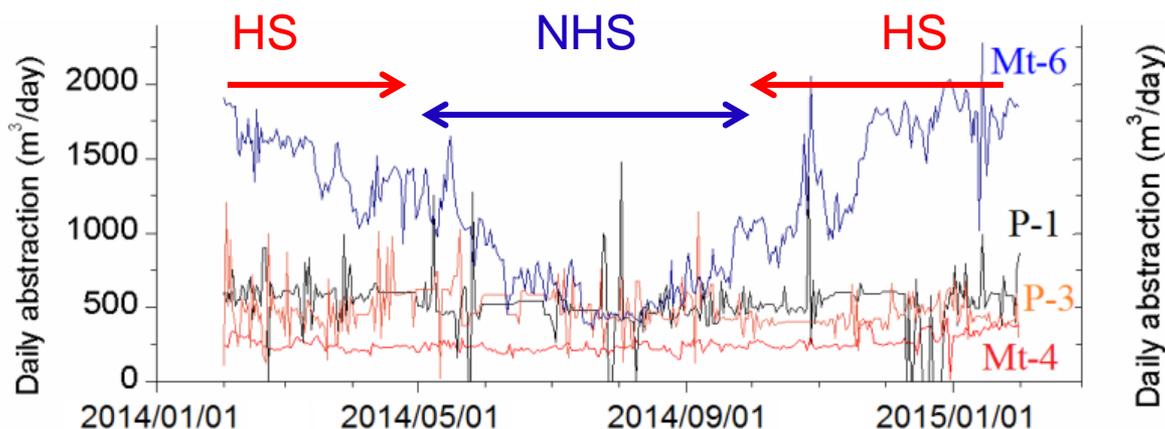
SEZONSKA NIHANJA

Dve skupini:

- Toplejše obdobje ($N_{NHS}=6$)
- Hladnejše obdobje ($N_{HS}=6$ (3 za Na^+))

ANOVA in Kolmogorov–Smirnov test

NI UGOTOVLJENIH ZNAČILNIH SEZONSKIH RAZLIK



	P-1 (m ³)	P-3 (m ³)	Mt-4 (m ³)	Mt-6 (m ³)
NHS	91.670	90.488	42.441	148.406
HS	99.599	84.788	49.733	282.494

Well	Season	Q (m ³ /day)	T (°C)	pH	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	$\delta^{18}O$ (‰)	δ^2H (‰)	d-excess
P-1	NHS	498±22	38.5±0.01	7.69±0.04	524±16	95.6±1.2	0.99±0.03	-11.15±0.09	-76.1±0.2	13.1±0.5
	HS	551±88	38.2±0.04	7.76±0.04	510±10	95.9±0.7	0.98±0.04	-11.19±0.06	-76.2±0.1	13.3±0.4
P-3	NHS	492±58	51.5±0.2	7.67±0.06	802±39	180.5±0.8	0.96±0.05	-10.96±0.07	-74.7±0.2	12.9±0.5
	HS	468±48	51.2±1.0	7.73±0.04	801±16	184.3±1.7	0.96±0.07	-11.00±0.07	-74.8±0.3	13.3±0.3
Mt-6	NHS	806±255	56.1±1.8	7.69±0.12	125±25	278±3	101±1	-11.42±0.06	-79.4±0.2	12.0±0.4
	HS	1,560±201	55.8±1.5	7.67±0.08	123±26	276±2	103±2	-11.46±0.05	-79.5±0.3	12.3±0.5
Mt-4	NHS	230±14	69.0±2.8	7.05±0.18	16,650±445	3,964±55	3,897±114	-8.38±0.11	-64.8±0.6	2.3±0.5
	HS	274±40	71.3±3.0	7.02±0.08	16,240±313	4,028±22	3,924±121	-8.13±0.35	-64.1±0.7	1.0±2.1

IZVOR TERMALNE VODE

Nova P-LMWL za P-1, P-3, Mt-6:

- $\delta^2\text{H} = 9,2 * \delta^{18}\text{O} + 26,3$ (N=36, R=0,95, p<0,001)
- Osiromašenje $\delta^{18}\text{O}$ za 2.0-2.5‰ ($T_{\text{inf}}=6-7^\circ\text{C}$, w=80%, kontinentalni in višinski vpliv)

Nova premica mešanja za termomineralno vodo iz Mt-4:

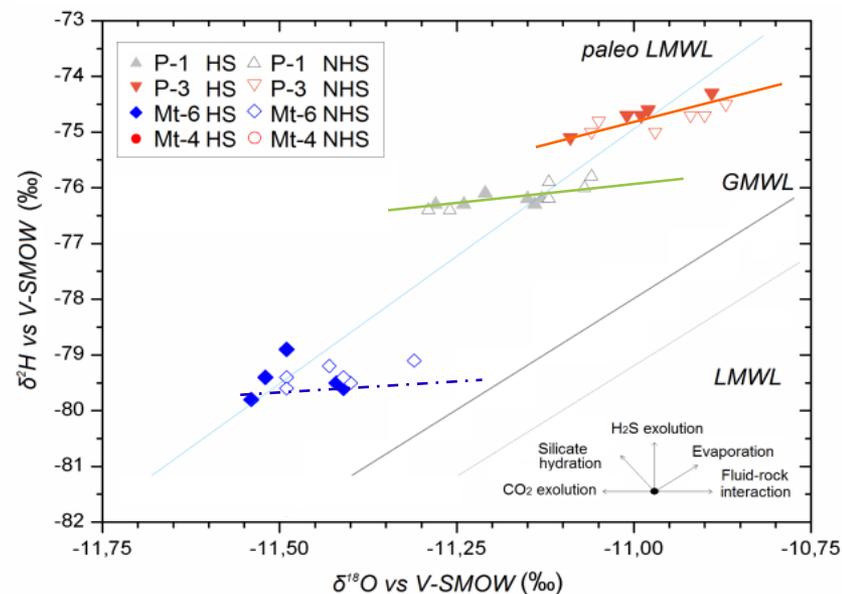
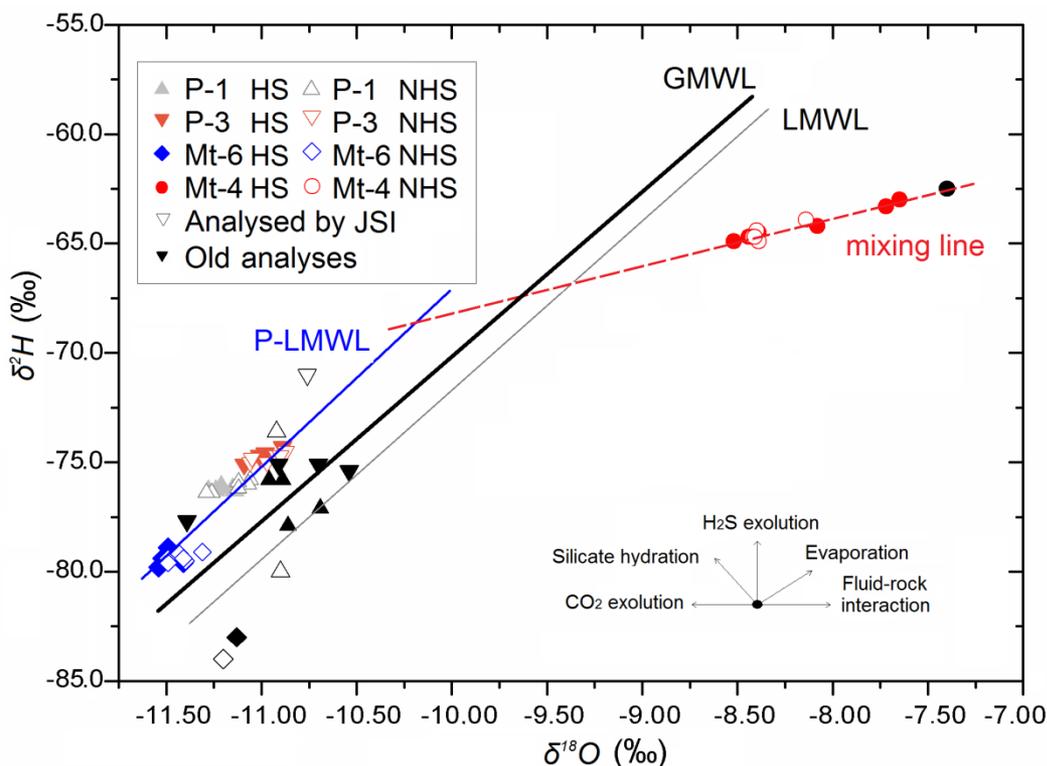
- $\delta^2\text{H} = 2,3 * \delta^{18}\text{O} - 45,2$ (N=12, R=0,86, p<0,001)

NI PRIČAKOVANIH VEČJIH NIHANJ

Vodoravni zamik $\delta^{18}\text{O}$: 0.22-0.23‰ (> AE)

R=0.85 (p<0.001), k = 1.87

R=0.82 (p<0.001), k = 2.56



DOLGOROČNE SPREMEMBE SESTAVE VODE

- **pH** v vodah bogatih s CO₂ : od 7.28 (1995) do 7.03 v Mt-4

- **elektroprevodnost:**

od 18,211 μS/cm (1977-2010) do 16,445 μS/cm (D=0.86, p<0.001) v Mt-4

od 1,353 μS/cm (1983-2007) do 1,222±78 μS/cm (D=0.6, p=0.13) v Mt-6

- **Na⁺:**

od 4756 mg/L (1977-2010) do 3986 mg/L (D=1.0, p<0.001) v Mt-4

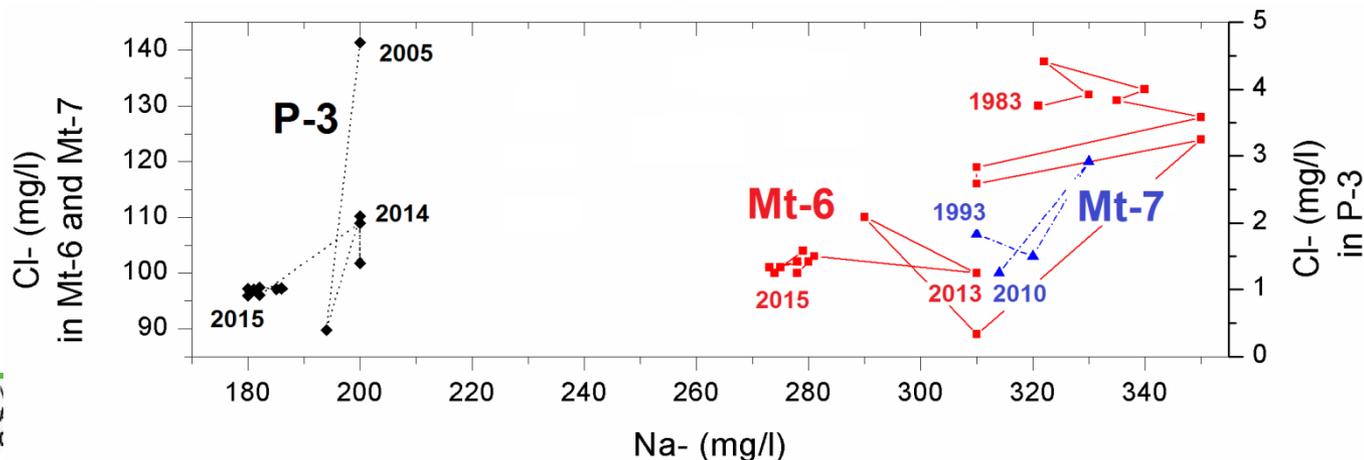
od 320 mg/L (1983-2007) do 277 mg/L (D=0.91, p=0.002) v Mt-6

od 105 mg/L (1973-2010) do 96 mg/L (D=1.0, p=0.001) v P-1

- **Cl⁻:**

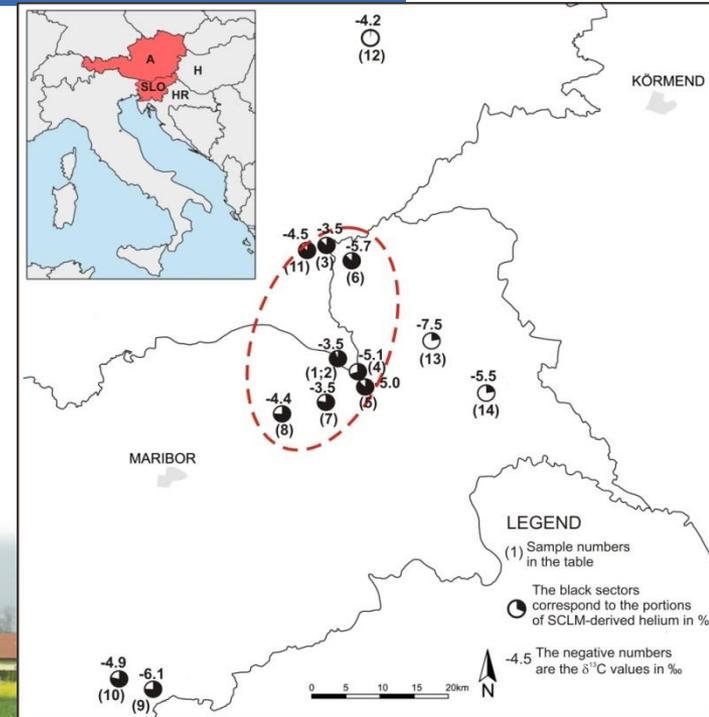
od 4988 mg/L (1977-2010) do 3911 mg/L (D=0.88, p<0.001) v Mt-4

od 123 mg/L (1983-2007) do 102 mg/L (D=0.91, p<0.001) v Mt-6



IZVOR PLINA V TERMALNI VODI

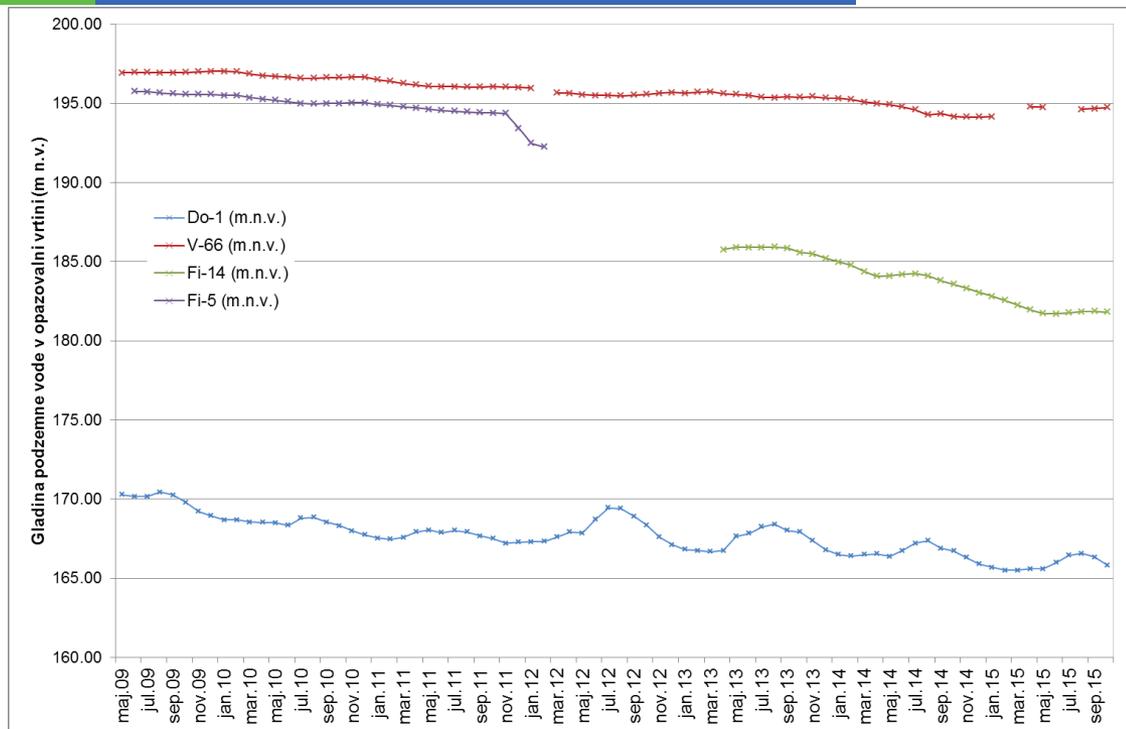
- Izvor CO₂ (¹³C) in He
- Procesi: ekstenzija brez vpliva subdukcije, globoki prelomi
- **magma iz plašča** (tudi Rogaška Slatina), Ne (atm.), Ar (atm., plašč)
- **zemeljska skorja** v Mor. Toplicah in Renkovcih



REGIONALNA GLADINA GT. VODONOSNIKOV

- Vse opazovalne vrtine kažejo nadaljevanje trenda upadanja gladine
- Črpane vrtine večinoma kažejo na upadanje gladine

NADALJEVANJA SLABŠANJA
KOLIČINSKEGA STANJA
VODONOSNIKOV



	Enote\Leto	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015*	Regresijska premica letnih povprečij	
									r (p)	R (p)
Opazovalna vrtina Do-1										
No.		5362	8700	7824	8821	8854	8758	6825		
Min.	m n.v.	168,82	167,59	166,99	166,85	166,41	165,67	165,35		
Maks.	m n.v.	170,57	169,05	168,18	169,61	168,61	167,55	166,88		
Povp.	m n.v.	169,87	168,46	167,64	168,13	167,45	166,62	165,92	-0,92	-0,94
St. dev.	m n.v.	0,55	0,33	0,29	0,81	0,65	0,41	0,42	(p=0,01)	(p=0,005)
Spr.povp.	m/leto	-	-1,41	-0,82	0,49	-0,70	-0,81	-0,70		
Regresijska premica urnih meritev		$y = -0,00006 * x + 169,4, r = -0,77, p < 0,001$								

DOSEŽEN MEJNIK 2

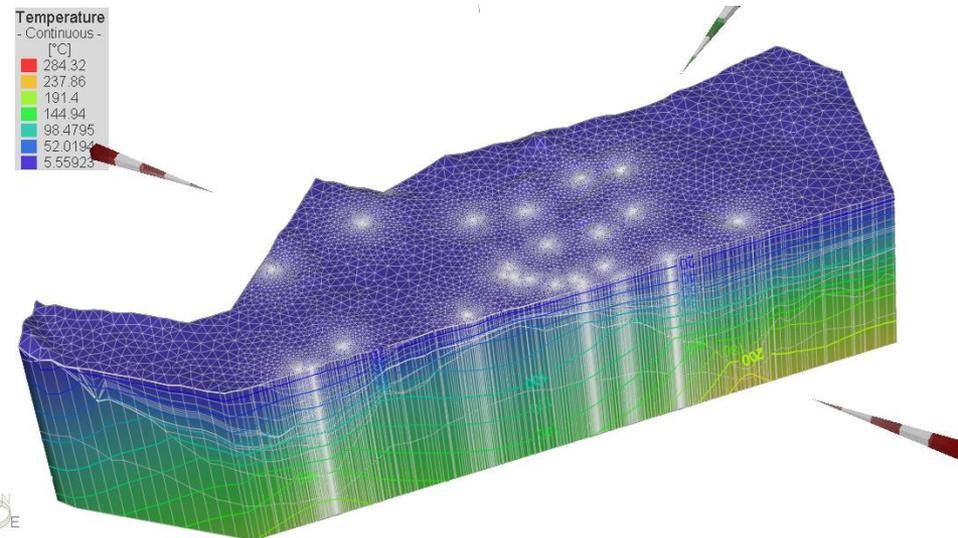
Delujoč hidravlični in hidrogeokemijski
monitoring izbranih vrtin ter interpretacija
trendov opazovanih parametrov

3D GEOLOŠKI IN MATEMATIČNI MODEL

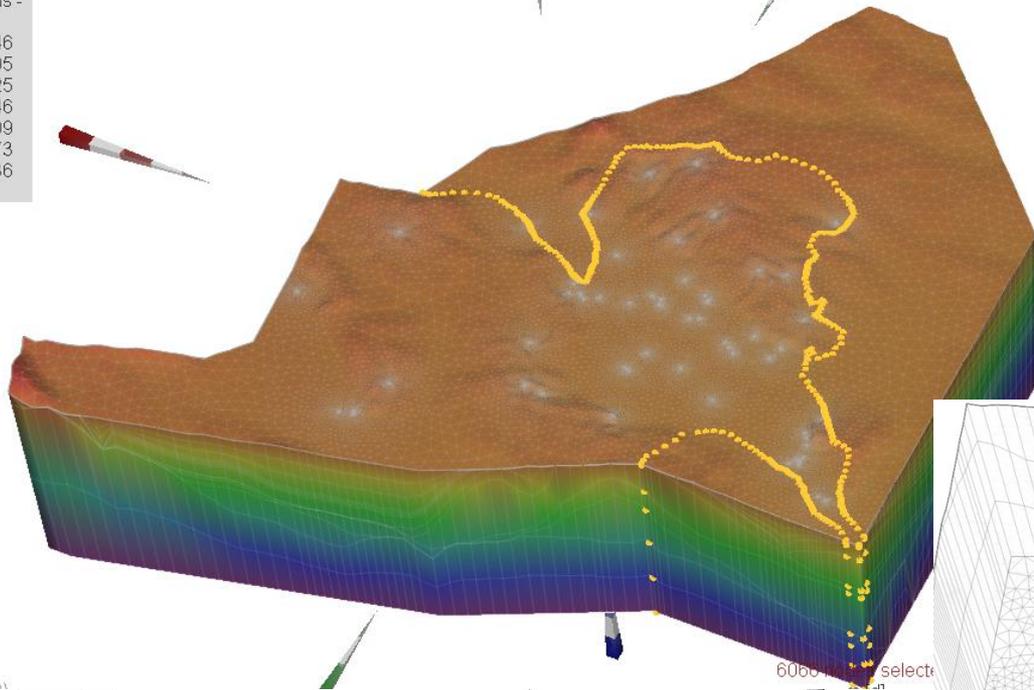
- Geološki model v programu Jewel Suite
- 3D simulacija toka podzemne vode in prenosa toplote s FEFLOW 6.2 in TOUGH 2
- Numerična metoda končnih elementov za integracijo parcialnih diferencialnih enačb v prostoru
- 3D, večplasten in anizotropen model
- KS UTM WGS84 33N z referenčno slovensko nadmorsko višino.
- Zgornja meja je topografija terena, spodnja ploskev pa -5000 m
- Hidravlični in geotermični parametri

DVE IZOBRAŽEVANJI:

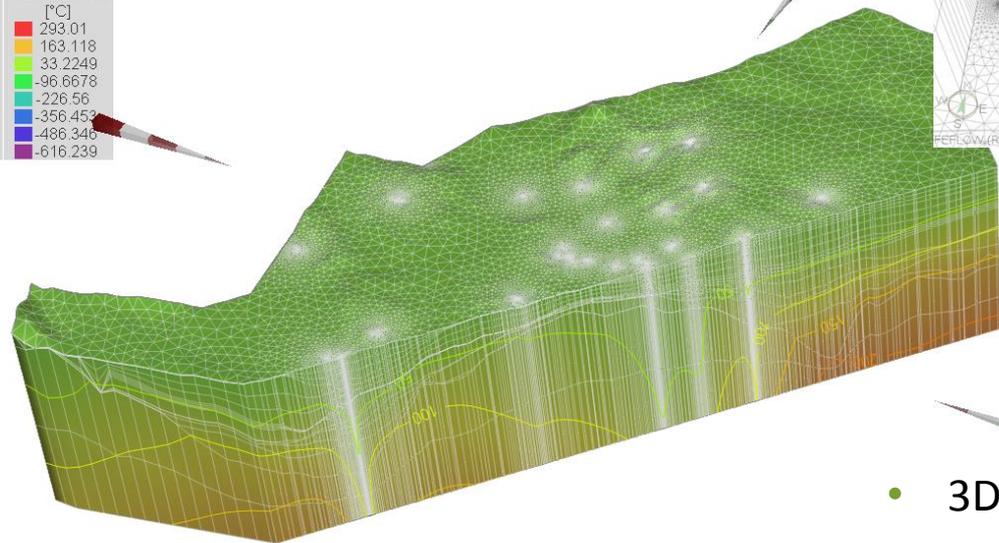
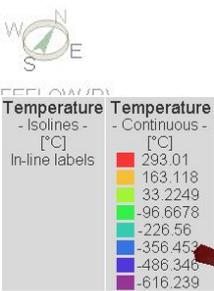
- 2-3.9.2014 Geothermal modeling v Budimpešti
- 16-20.2.2015 FEFLOW using PEST and FePEST v Berlinu



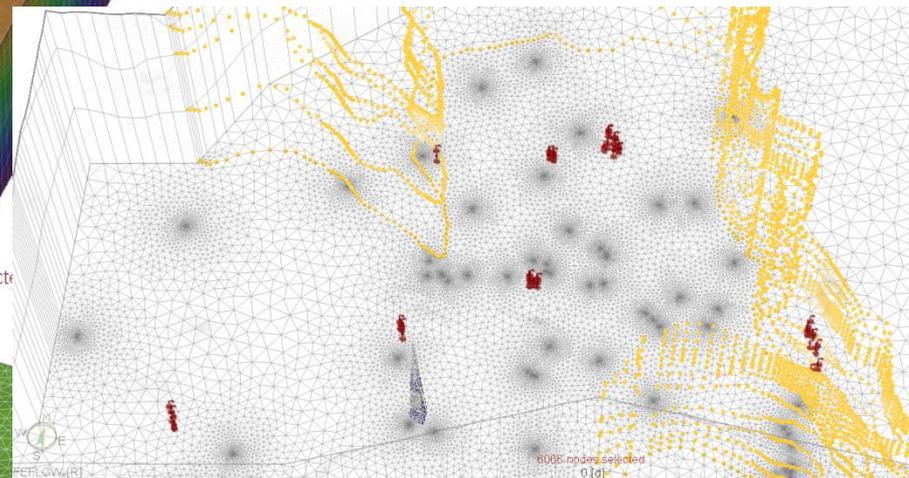
IZGLED 3D MODELA



- 3D geološke plasti



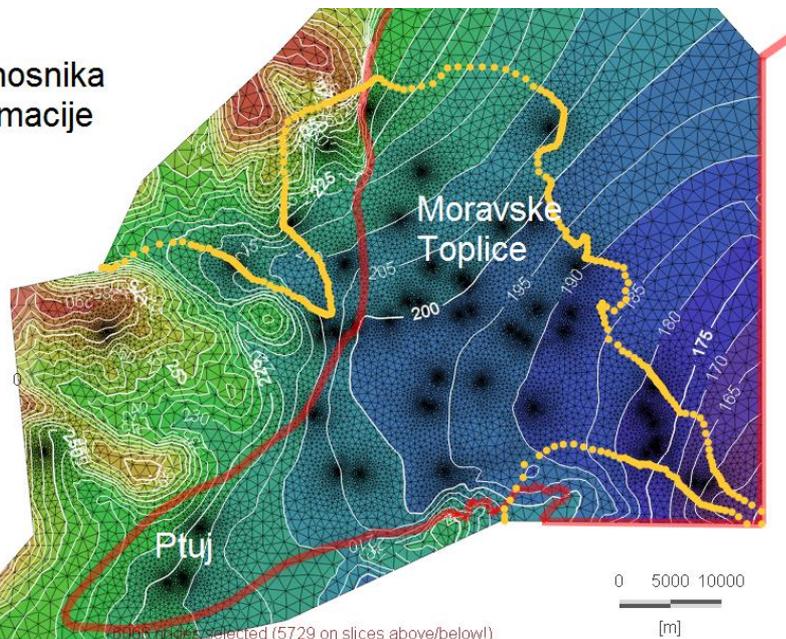
- 2D črpalne vrtine



- 3D porazdelitev temperature

SIMULACIJA GEOTERMALNIH VODONOSNIKOV

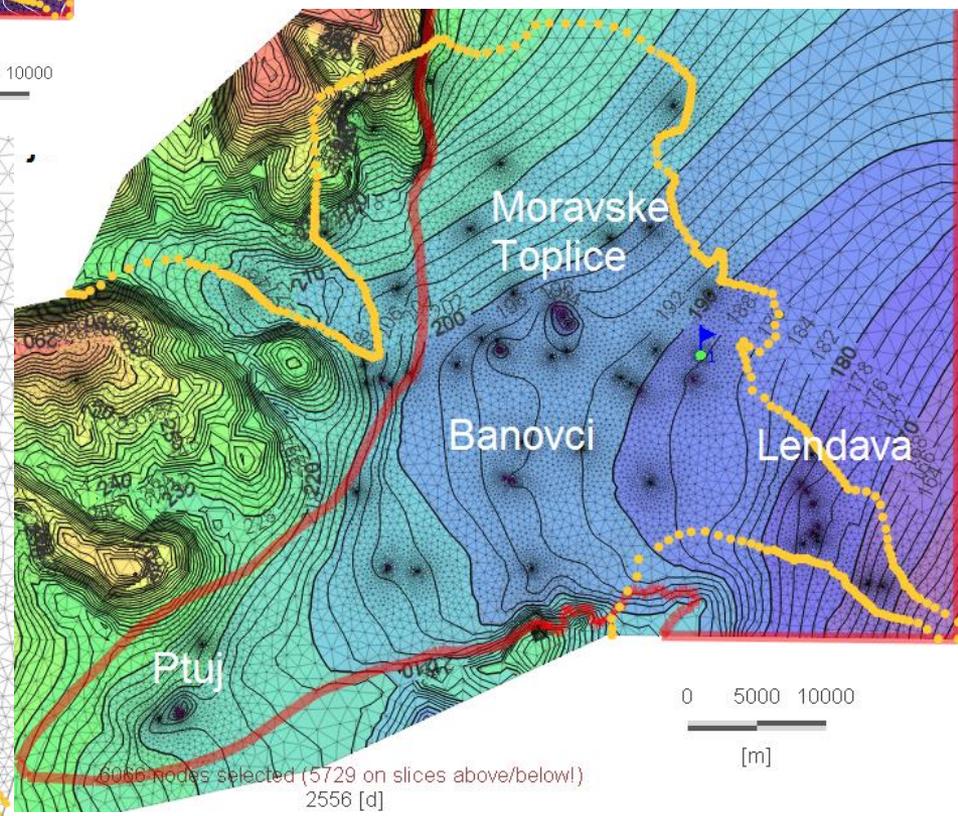
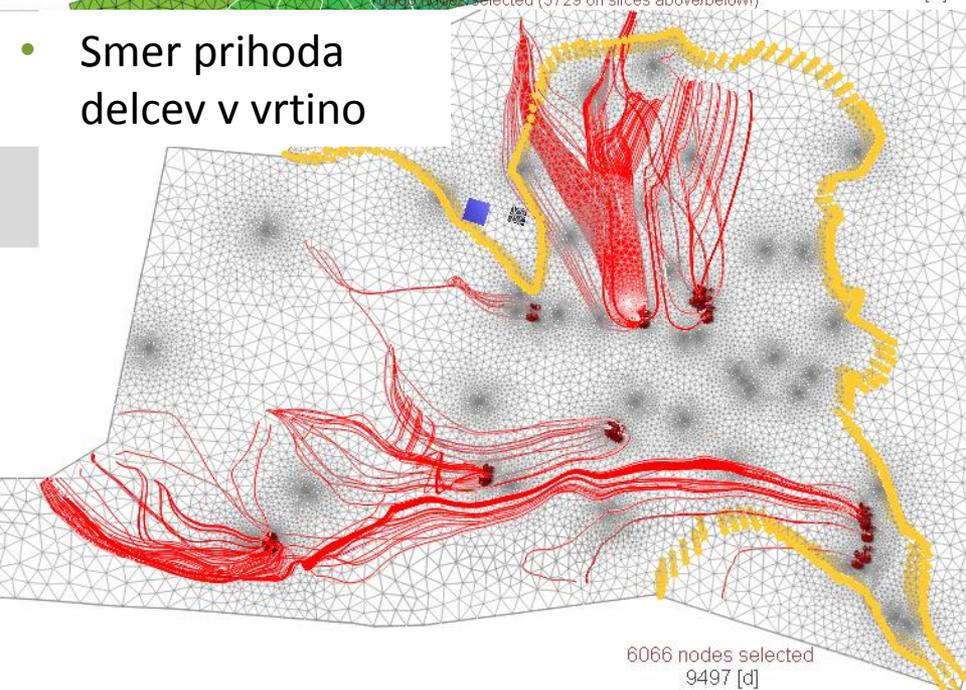
— Območje
geot. vodonosnika
Murske formacije



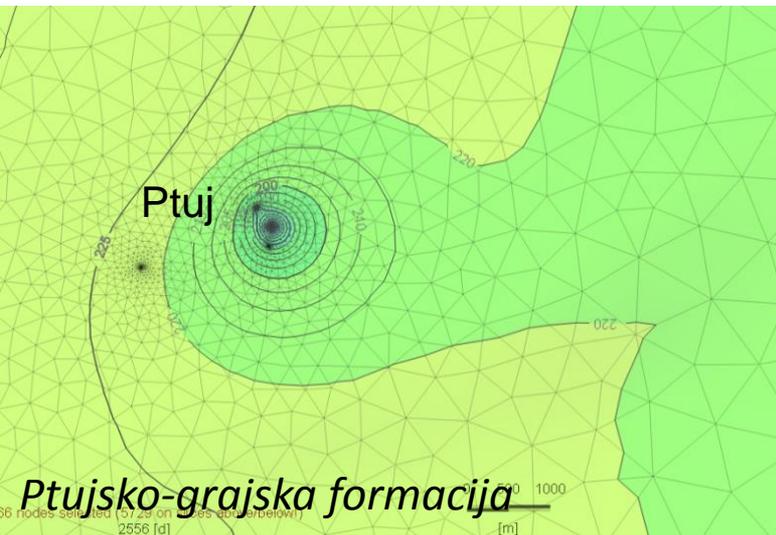
- Gladina pred črpanjem
- $\frac{dh}{dx} = 0,0008$
- $Q_{\text{out deltno čelo}} = 74 \text{ l/s}$

- Radij vpliva zaradi črpanja $\Sigma 85,4 \text{ l/s}$
- Povečan dotok v Mursko formacijo

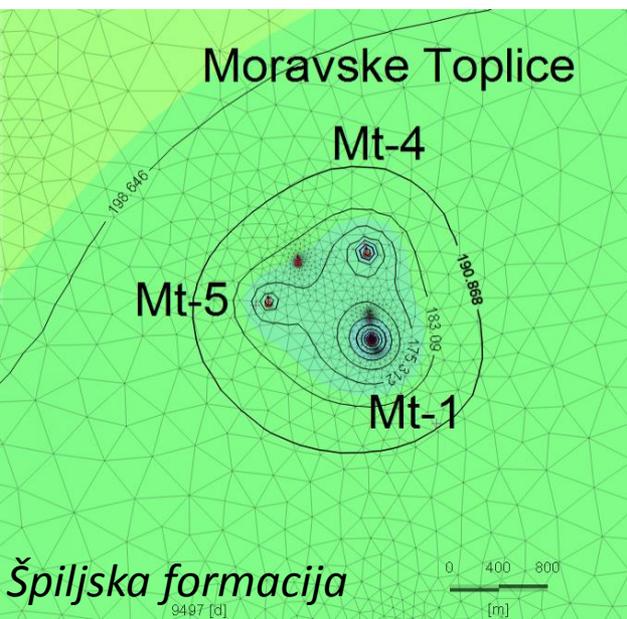
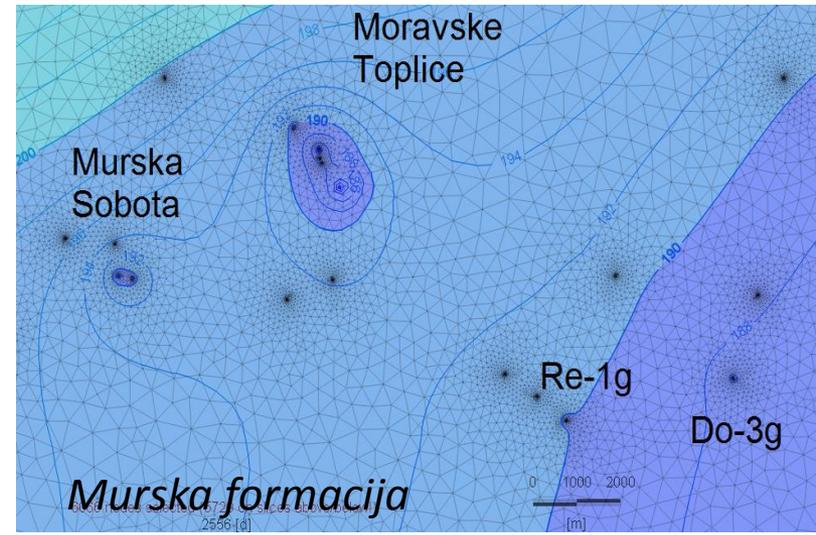
• Smer prihoda
delcev v vrtno



VPLIVNI RADIJI VRTIN



do ~1,2 km W
do ~3 km E



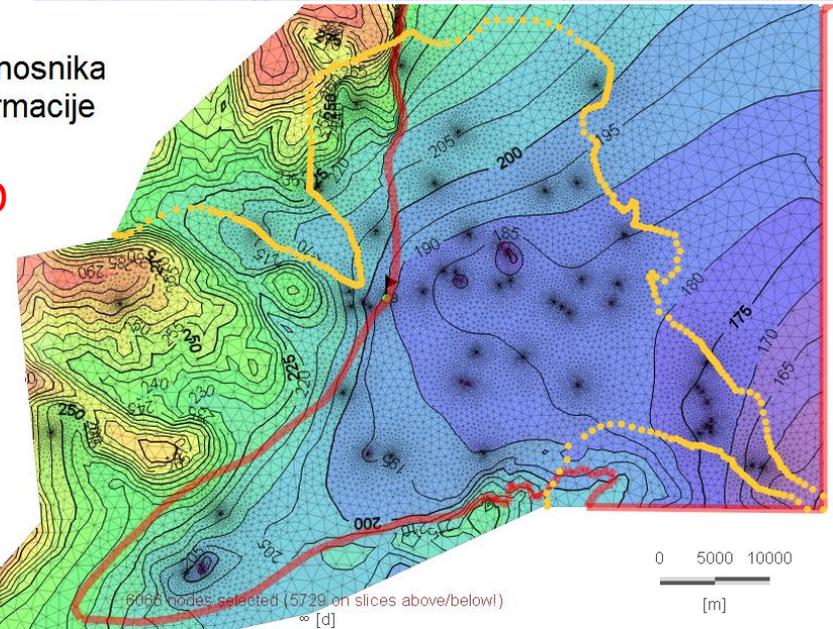
— Območje
geot. vodnosnika
Murske formacije

**SIMULIRANO
STANJE OB
POVEČANJU
ČRPANJA**

$s > 17 \text{ m}$
 $Q_{HU} = -20\%$



FEFLOW (R)



DOSEŽEN MEJNIK 3

Določitev vodne bilance vodonosnikov ter
simuliran vplivni radij vrtin.



OPTIMIZACIJA RABE ZA SAVA TURIZEM d.d.

SPLOŠNE SMERNICE

- Preureditev sistema inštalacij, da med izrabo za različne namene ne pride do mešanja vod.
- Zmanjšanje rabe termalne vode za bazene, ker je 35% geotermalnega odpada premalo za vzdrževanje količinskega stanja vodonosnika.
- Povečanje izkoristka odvzema toplote.

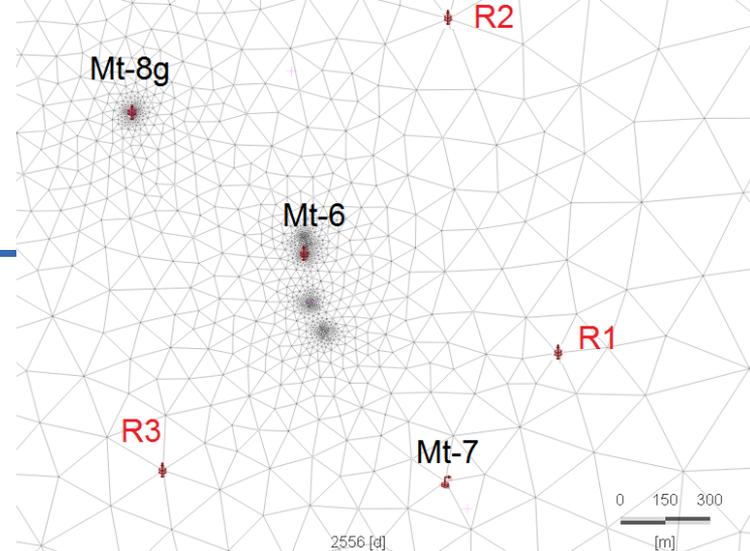


ŠPILJSKA FORMACIJA

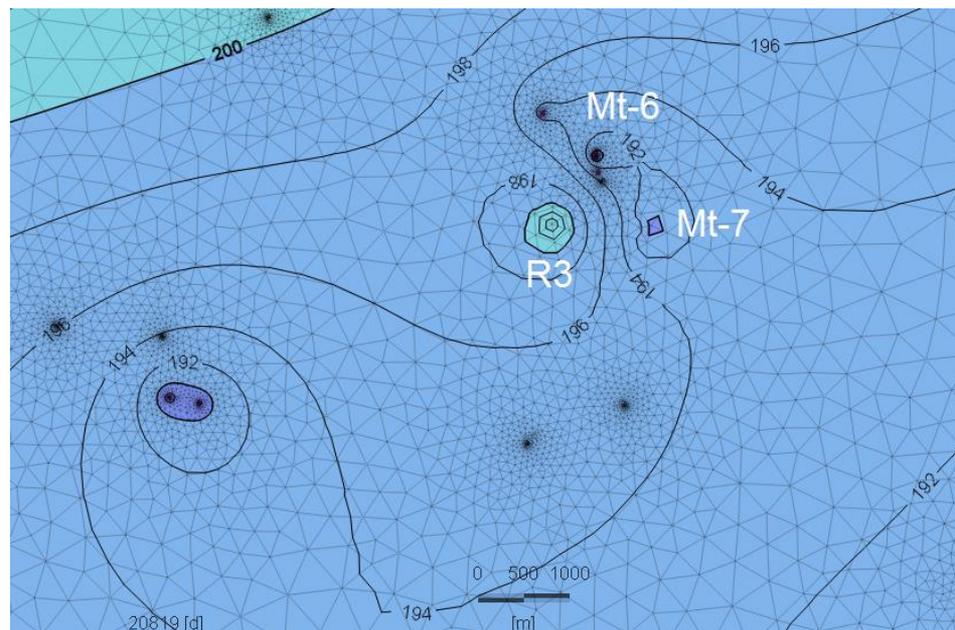
- Vračanje v Špiljsko formacijo (Mt-4) bi bilo tehnično izvedljivo, a ekonomsko vprašljivo.
- Izvedba meritev tehničnega in hidravličnega stanja (tlak in temperatura vodonosnika) po vrčinah.
- Znižanje odvzema termomineralne vode na najnižji možni minimum.
- Ta voda je naravno zdravilno sredstvo, zato naj se jo uporablja samo za ta namen.

MURSKA FORMACIJA

- Načrtovanje 1-2 reinjekcijskih vrtin v Moravskih Toplicah in 1 na Ptuj
- Vračanje 70 in 100% vode, torej vseh 35% geotermalnega odpada in dodatnih količin, ki se ne bodo rabile kot bazenska voda. Zato rabijo povečanje toplotnega izkoristka.
- Tveganja ob vzpostavitvi vračanja
- Vrtina 600-1000 m od območja črpanja
- Vsaj 700 m zahodno, južno ali vzhodno od filtrskega odseka v Mt-7
- **Zahodna lokacija podpre tudi drugega uporabnika v Moravskih Toplicah**



- 3 možna mesta za vračanje



DOSEŽEN MEJNIK 4

Optimizacija sistema rabe geotermalnih
vrtin Save Turizma d.d., tudi z vidika
reinjekcije.

POMEMBNEJŠE OBJAVE

- **5 znanstvenih člankov, 12 strokovnih in poljudnih prispevkov, 13 prispevkov na konferencah, 3 vabljen predavanja, 30 poljudnih delavnic, nekaj intervjujev**
- Mitigating depletion of a porous geothermal aquifer in the Pannonian sedimentary basin. Environmental earth sciences, 2016, 20 str.
- Hydrogeochemical and isotopic tracers for identification of seasonal and long-term over-exploitation of the Pleistocene thermal waters. Environmental monitoring and assessment, 2016, 188/4, 242-262.
- 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, 2016, 422, 60-70.
- The three-dimensional regional geological model of the Mura-Zala Basin, northeastern Slovenia = Tridimenzionalni regionalni geološki model Mursko-zalskega bazena, severovzhodna Slovenija. Geologija, 2015, 58/2, 139-154.
- Potentials of transboundary thermal water resources in the western part of the Pannonian basin, Geothermics, 2015, 55, 88-98.
- Long-term impact of transboundary cooperation on groundwater management. European geologist, 2015, 40, 29-33.
- *Odgovor na pisno poslansko vprašanje poslanca dr. Franca Trčka v zvezi s strategijo izkoriščanja geotermalnega potenciala Slovenije z dne 24. 3. 2015.*
- *Odgovor na ustno poslansko vprašanje poslanca Jožefa Horvata v zvezi z relevantnostjo geoloških raziskav, ki narekujejo drastično zmanjšanje izkoriščanja geotermalnega potenciala Pomurja z dne 13.11.2015.*

ZAKLJUČEK

Izvedba projekta je omogočila:

- Vpeljavo nove metodologije raziskav v delo GeoZS
- Dvig kompetenčnosti in mednarodnega vpliva raziskovalke in GeoZS
- Odgovore na nekaj temeljnih odprtih vprašanj o izvoru podzemne vode, vodni bilanci, regionalnih hidrodinamičnih povezavah med vodonosniki in razpoložljivi količini termalne vode v SV Sloveniji

Projekt ima veliko aplikativno vrednost zaradi odgovorov na potrebe:

- Uporabnikov termalne vode po optimizaciji rabe termalne vode
- Upravljavcev termalne vode, ki podeljujejo koncesije za rabo vode za zdravilišča in rabo toplote (Ministrstva za okolje in prostor)
- Nadzornikov rabe in raziskovalcev termalne vode (ARSO, NLZOH...)



HVALA

