

MINISTERSTVO ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SLOVENSKEJ REPUBLIKY

ŠTÁTNY GEOLOGICKÝ ÚSTAV DIONÝZA ŠTÚRA



Podsystem 05

Monitoring objemovej aktivity radónu v geologickom prostredí na území Slovenskej republiky

Správa za rok 2019

Názov geologickej úlohy: **Čiastkový monitorovací systém – Geologické faktory**

Číslo geologickej úlohy: **207**

Zodpovedný riešiteľ geologickej úlohy: **RNDr. Pavel Liščák, CSc.**

Zodpovedný riešiteľ geologickej úlohy: **RNDr. Augustín Gluch**

Spoluriešiteľ: **RNDr. Igor Zeman**

Zástupca zhotoviteľa: **RNDr. Pavel Liščák, CSc.**

Štatutárny zástupca: **RNDr. Igor Slaninka, PhD.**
generálny riaditeľ ŠGÚDŠ

Bratislava september 2020

OBSAH

Zoznam obrázkov a tabuliek

Obsah

1.	Úvod	5
2.	Metodika prác	6
3.	Prehľad a výsledky realizovaných prác	10
3.1	Pôdny radón na referenčných plochách	10
3.2	Pôdny radón na tektonike	23
3.3	Radón vo vodách	25
4.	Záver a odporúčania	42
5.	Literatúra	48

1. ÚVOD

Ludská populácia je dlhodobo vystavená účinkom rôznych druhov žiarení. Problematika prírodnej, ale aj umelej (vyvolanej) rádioaktivity však bola desaťročia prakticky „tabu“. Urán bol strategickou surovinou pre jadrový (zbrojný, energetický) priemysel a výsledky prieskumu i vedeckého výskumu z tejto oblasti sa (najmä v období tzv. „studenej vojny“) prísne utajovali. Zdravotné riziká a dopady na obyvateľstvo sa zväčša bagatelizovali a často sa usudzovalo, že radón a dcérske produkty jeho nukleárneho rozpadu bezprostredne ohrozujú len baníkov v uránových baniach.

Obavy a pozornosť verejnosti sú dlhodobo zamerané prevažne na umelé zdroje žiarenia (nukleárne zbrane, jadrová energetika, zdravotníctvo, atď.), pričom väčšina obyvateľstva ani netuší, že najvýznamnejšie ožiarenie (mimo období po jadrových pokusoch, haváriách a pod.) spôsobujú práve prírodné zdroje.

Vplyvmi expozície radónom sa v zahraničí zaoberajú viaceré renomované inštitúcie (napr. UNSCEAR – *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, ICRP – *International Commission on Radiological Protection*), ale aj ďalšie organizácie a vedecké pracoviská, z výskumov ktorých vyplýva, že prírodné zdroje rádioaktívneho žiarenia prispievajú takmer tromi štvrtinami (73 %) k celkovej radiačnej záťaži populácie.

Najvýznamnejším zdrojom prírodného žiarenia je radón (^{222}Rn) a rádionuklidy (^{218}Po , ^{214}Po , ^{210}Tl , ^{210}Po , ...) vznikajúce pri jeho nukleárnom rozpade. Tieto sú adsorbované v dýchacích cestách človeka, kde dochádza ku kontaktnému ožarovaniu buniek pľúcneho tkaniva, čo môže v konečnom dôsledku viesť až k vzniku zhubného karcinómu pľúc.

Rôznymi štúdiami bolo preukázané, že pravdepodobnosť vzniku karcinómu pľúc sa zväčšuje s narastajúcou koncentráciou radónu a jeho rozpadových produktov, ale aj dĺžkou expozície. Skutočnosť, že radón je po fajčení druhou najvýznamnejšou príčinou rakoviny pľúc, uznala aj Svetová zdravotnícka organizácia a v roku 2009 ho klasifikovala ako karcinogén triedy 1A.

Výsledky novších epidemiologických štúdií preukázali, že expozícia radónom má za následok aj ďalšie formy zdravotného poškodenia, ako sú choroby cievneho a tráviaceho ústrojenstva. Pravdepodobnosť zdravotného poškodenia je zrejme výrazne vyššia, ako sa pôvodne predpokladalo.

Tieto skutočnosti viedli Európsku komisiu (EC), Medzinárodnú komisiu pre radiačnú ochranu (ICRP) a Svetovú zdravotnícku organizáciu (WHO) k prehodnoteniu zdravotného rizika z expozície radónom.

Európska komisia zadefinovala aj nové požiadavky na zvýšenie ochrany obyvateľstva

pred nepriaznivými účinkami ionizujúceho žiarenia – spracovanie legislatívy zameranej na ochranu obyvateľstva a zavádzanie radónových programov, v ktorých informovanosť obyvateľstva patrí medzi priority.

Pri neustále sa zhoršujúcich environmentálnych podmienkach je dôležitá aj radiačná ochrana, a to hlavne pred vnútorným ožarovaním prírodnými rádionuklidmi, nakoľko radón a dcérske produkty jeho rozpadu sa na radiačnej expozícii podieľajú v najväčšom rozsahu. Pre objektívne prognózovanie jeho výskytu, šírenia, koncentrácií, krátkodobých i dlhodobých variácií atď., je ich monitorovanie v geologickom prostredí dôležité a opodstatnené.

Hlavným zdrojom prírodného radónu je geologické prostredie a preto je cieľom monitoringu zdokumentovať a komplexne zhodnotiť krátkodobé (sezónne), ale i dlhodobé (rádovo až desiatky rokov) variácie koncentrácií radónu v horninovom prostredí a v podzemných vodách.

Súbor geofyzikálnych prác a činností, realizovaných v podsystéme 05 (*Monitoring objemovej aktivity radónu v geologickom prostredí na území Slovenskej republiky*) v sezóne 2019, predstavoval opakované vzorkovania a merania objemovej aktivity radónu (OAR) v terénnych aj laboratórnych podmienkach na celkom 12-tich lokalitách: päť lokalít pre pôdny radón na referenčných plochách (RP), jeden objekt nad tektonikou a šesť objektov pre radón v podzemných vodách na území Slovenska, vrátane ich komplexného spracovania, vyhodnotenia, porovnania výsledkov s predchádzajúcimi obdobiami, vypracovania hodnotiacich ročných správ (textová, tabuľková a grafická časť), aktualizovania výsledných databáz, atď.

2. METODIKA PRÁC

Celý rad prírodných rádionuklidov a produktov ich jadrového rozpadu je permanentne prítomných vo všetkých zložkách životného prostredia, t.j. v horninách, vodách i v ovzduší. Radón ^{222}Rn (zdroj alfa žiarenia s polčasom rozpadu 3,825 dňa) je inertný prírodný rádioaktívny plyn, vznikajúci samovoľným rozpadom rádia ^{226}Ra (zdroj alfa a gama žiarenia) v rozpadovom rade uránu ^{238}U a patrí medzi tzv. vzácne plyny.

Radón má vyššiu hustotu než vzduch (je najťažším plynom v prírode), je dobre rozpustný vo vode (až 51 % svojho objemu) a ešte lepšie v organických kvapalinách (ropa, olej), je bez farby, chuti a zápachu.

Dobre sa adsorbuje na uhlie (ale aj na parafín a kaučuk) a v prírodnom prostredí napr. na íly. Rozpustnosť aj adsorpcia radónu rastie s poklesom teploty prostredia.

Radón pomerne ľahko preniká horninovým prostredím, pričom sa šíri difúznym a

konvekčným prúdením. Hlavným zdrojom prírodného radónu je geologické prostredie, t.j. niektoré minerály a horniny, ale aj podzemné vody, prechádzajúce horninami so zvýšeným obsahom uránu. Vzhľadom na polčas rozpadu materských prvkov (^{238}U ~ 4,5 mld. rokov, ^{226}Ra ~ 1600 rokov) je z geologického prostredia zaistený jeho trvalý prísun.

Radón má výrazné migračné vlastnosti a jeho obsahy v pôdnom vzduchu i vo vodách nie sú stabilné. Závisia nielen od koncentrácií rádia v hornine, ale aj od ďalších faktorov ovplyvňujúcich jeho šírenie (meteorologické podmienky – vlhkosť, teplota, tlak, rýchlosť vetra; plynopriepustnosť – porozita, tektonické porušenie hornín a pod.).

Cieľom monitorovacích prác v predmetnej časti projektu je sledovanie zmien koncentrácií radónu, ich celkové vyhodnotenie a posúdenie možných vplyvov.

Monitorovanie objemovej aktivity radónu (OAR) v pôdnom vzduchu a v zdrojoch podzemných vôd bolo zamerané do oblastí s potvrdeným výskytom zvýšeného (stredného a vysokého; tab. č. 1) radónového rizika. Pri výbere lokalít sa vychádzalo z výsledkov hodnotenia starších prieskumných prác, zaoberajúcich sa problematikou prírodnej rádioaktivity, s cieľom zadokumentovať zmeny resp. variácie obsahov radónu v rôznych geologických jednotkách.

Tab. č. 1 Stanovenie kategórie radónového rizika referenčnej plochy

KATEGÓRIA RADÓNOVÉHO RIZIKA	3. kvartil - OBJEMOVÁ AKTIVITA RADÓNU [kBq.m⁻³]		
	<i>Plynopriepustnosť zeminy</i>		
	<i>malá</i>	<i>stredná</i>	<i>dobrá</i>
nízke – I	< 30	< 20	< 10
stredné – II	30 – 100	20 – 70	10 – 30
vysoké – III	> 100	> 70	> 30

Radón v pôdnom vzduchu je na každej lokalite monitorovaný v rámci referenčnej plochy, ktorú tvoria jednotlivé body (sondy pre odber vzoriek pôdneho vzduchu) usporiadané v profiloch, resp. v nepravidelnej sieti, na ploche do cca 400 m². Základný počet bodov v rámci RP je 17 sond (16 sond základného merania plus jedna kontrolná sonda), t.j. minimálny štatistický súbor pre zhodnotenie radónového rizika RP pri každom monitorovaní. Pozícia jednotlivých bodov v rámci RP pri opakovaných monitorovacích prácach je porovnateľná.

Referenčné plochy (objekty) sú monitorované minimálne dvakrát ročne. Tri objekty sú monitorované s vyššou frekvenciou (4 až 7 monitorovaní) za účelom lepšieho posúdenia vplyvov meteorologických procesov v období apríl až október.

Pôdny vzduch pre stanovenie OAR sa odoberá cez ručne zatĺkané sondy, ktoré sa po

dosiahnutí hĺbky cca 0,8 m utesnia, zo sondy sa odsaje atmosférický vzduch a vzorka pôdneho vzduchu sa nasaje do deemanovanej a evakuovanej scintilačnej Lucasovej komory (LK) o objeme 125 ml.

Lucasova komora je kalibrovaný scintilačný detektor, ktorý sa po napustení pôdnym vzduchom transportuje na meranie a stanovenie OAR v laboratórnych podmienkach. Pri odbere pôdneho radónu sa do terénneho zápisníka (okrem údajov nevyhnutných pre výpočet OAR) zaznamenávajú aj ďalšie doplňujúce údaje: počasie, zrážky, atmosférický tlak, kvalitatívne posúdenie vlhkosti pokryvu RP, obtiažnosť hĺbenia sond a odberu pôdneho vzduchu, ...

Objemová aktivita radónu zdrojov podzemných vôd je sledovaná na známych a turisticky bežne dostupných prameňoch. Vzorky pre stanovenie objemovej aktivity ^{222}Rn vo vode sú odoberané do sklenených vzorkovníc so zabrušeným hrdlom, doplna (objem cca 300 ml), bez vzduchovej bubliny. Pri odbere vzorky vody je meraná okamžitá teplota vody a vzduchu, výdatnosť prameňa, atmosférický tlak, meteorologické podmienky pri odbere, vrátane ďalších údajov potrebných k výpočtu OAR.

V laboratórnych podmienkach je radón z každej vzorkovnice prebublaný cez premývačku do štyroch deemanovaných a evakuovaných LK o objeme 600 ml, ktoré sa následne merajú kalibrovaným meracím zariadením metodikou zhodnou s meraním objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu.

Za účelom vylúčenia náhodnej chyby sa odoberajú vždy štyri vzorky, pričom výsledným obsahom radónu pre daný odber je stredná hodnota z meraní prvých dvoch vzoriek. Tretia vzorka býva analyzovaná v prípade, ak rozdiel dvojice meraných vzoriek prekročí 10 %. Štvrtá vzorka slúži ako bezpečnostná rezerva pre nepredvídateľné situácie.

Na postup rádiometrických meraní a hodnotenie radónu v geologickom prostredí sa vzťahuje schválená metodika. Spôsob stanovenia objemovej aktivity radónu (OAR; c_A) v pôdnom vzduchu a plynopriepustnosti základových pôd je v súlade s ustanoveniami zákona č. 355/2007 Z.z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia a v zmysle vyhlášky Ministerstva zdravotníctva SR č. 528/2007, ktorou sa stanovujú podrobnosti o požiadavkách na obmedzenie ožiarenia z prírodného žiarenia.

Pri meraní OAR sa používa kalibrované a metrologicky overené meracie zariadenie typu LUK-4A, využívajúce princíp scintilačnej detekcie alfa častíc v Lucasových komorách.

Merania odobratých vzoriek zmesi plynov v LK sú realizované v laboratórnych

podmienkach najskôr 3,5 hod. (210 minút) po ich napustení, t.j. po dosiahnutí stavu rádioaktívnej rovnováhy medzi radónom a dcérskymi produktami jeho rozpadu.

Objemová aktivita radónu v pôdnom vzduchu c_A , sa počíta podľa vzťahu:

$$c_A = (N_v - N_p) / k \cdot V \cdot R(t_v, t_r) ; [\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}]$$

- kde : N_v - nameraný počet impulzov vzorky pôdneho vzduchu za čas t_v
 N_p - nameraný počet impulzov pozadia za čas t_v
 k - koeficient účinnosti merania stanovený pri kalibrácii aparatury
 V - objem vzorky pôdneho vzduchu v LK v litroch
 $R(t_v, t_r)$ - korekčný faktor zohľadňujúci rádioaktívnu premenu od odberu vzorky po koniec merania a zároveň aj stav posuvnej rádioaktívnej rovnováhy medzi ^{222}Rn a jeho dcérskymi produktmi rozpadu v LK. Pri meraní (3,5 hod. po napustení LK) je dosiahnutý stav rádioaktívnej rovnováhy medzi radónom a jeho dcérskymi produktmi. Zanedbaním poklesu aktivity radónu v priebehu merania (t_v), môžeme dostatočne presne pre $t_r \geq 210$ min a ľubovoľné t_v určiť $R(t_v, t_r)$ zo vzťahu: $R(t_v, t_r) = 3 \cdot t_v \cdot e^{-\lambda t_r}$ (sec)
 t_v - čas merania vzorky pôdneho vzduchu v LK v sekundách
 t_r - doba od napustenia vzorky pôdneho vzduchu do LK do začiatku merania v minútach
 λ - rozpadová konštanta ^{222}Rn ($0,0001258437 \text{ min}^{-1}$)

Radónové riziko referenčnej plochy je hodnotené v zmysle novelizovanej Smernice MŽP SR a podľa prílohy č. 6 k vyhláske MZ SR č. 528/2007, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o požiadavkách na obmedzenie ožiarenia z prírodného žiarenia, kde sú doporučené hranice pre stanovenie troch kategórií radónového rizika – nízke, stredné a vysoké – na základe kvantitatívneho posúdenia nameranej objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu a plynopriepustnosti zemín podľa tab. č. 1.

Plynopriepustnosť miestnych zemín a hornín sa pre každú referenčnú plochu určila skrátenou granulometrickou analýzou odobratej vzorky zeminy a to podľa percentuálneho podielu jemných častíc f (priemer častíc $< 0,06 \text{ mm}$) v zmysle tab. č. 2.

Tab. č. 2 Stanovenie plynopriepustnosti pôd

Priepustnosť	Podiel jemných častíc	Trieda podľa STN 73 1001
malá	$f > 65 \%$	F5, F6, F7, F8
stredná	$15 \% < f < 65 \%$	F1, F2, F3, F4, S4, S5, G4, G5
Dobrá	$f < 15 \%$	S1, S2, S3, G1, G2, G3

Objemová aktivita radónu vo vode c_A sa počíta podľa vzťahu:

$$c_A = (N_v - N_p) / k \cdot V_v \cdot R(t_v, t_r) \cdot e^{-\lambda t_F} ; [\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}]$$

- kde : V_v - objem vzorky vody v premývačke v litroch
 $e^{-\lambda t_F} = F(t_F)$ - koeficient, vyjadrujúci pokles aktivity ^{222}Rn za dobu t_F (doba od

času odberu vzorky v teréne po čas naplnenia LK)
ostatné položky sú vysvetlené pri vzťahu pre výpočet objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu.

3. PREHLAD A VÝSLEDKY REALIZOVANÝCH PRÁC

Monitoring OAR v geologickom prostredí na území Slovenska bol v roku 2019 realizovaný (podobne ako v predchádzajúcich monitorovacích sezónach) v oblastiach:

- pôdny radón na referenčných plochách,
- pôdny radón na tektonike,
- radón vo vodách.

Geografická situácia monitorovaných objektov je schematicky znázornená na obr. č. 1.

3.1 Pôdny radón na referenčných plochách

Monitoring OAR v pôdnom vzduchu na referenčných plochách (RP) bol v roku 2019 vykonávaný s rôznou frekvenciou na piatich lokalitách v strednom až vysokom (na lokalite RP Hnilec až v extrémnom) radónovom riziku:

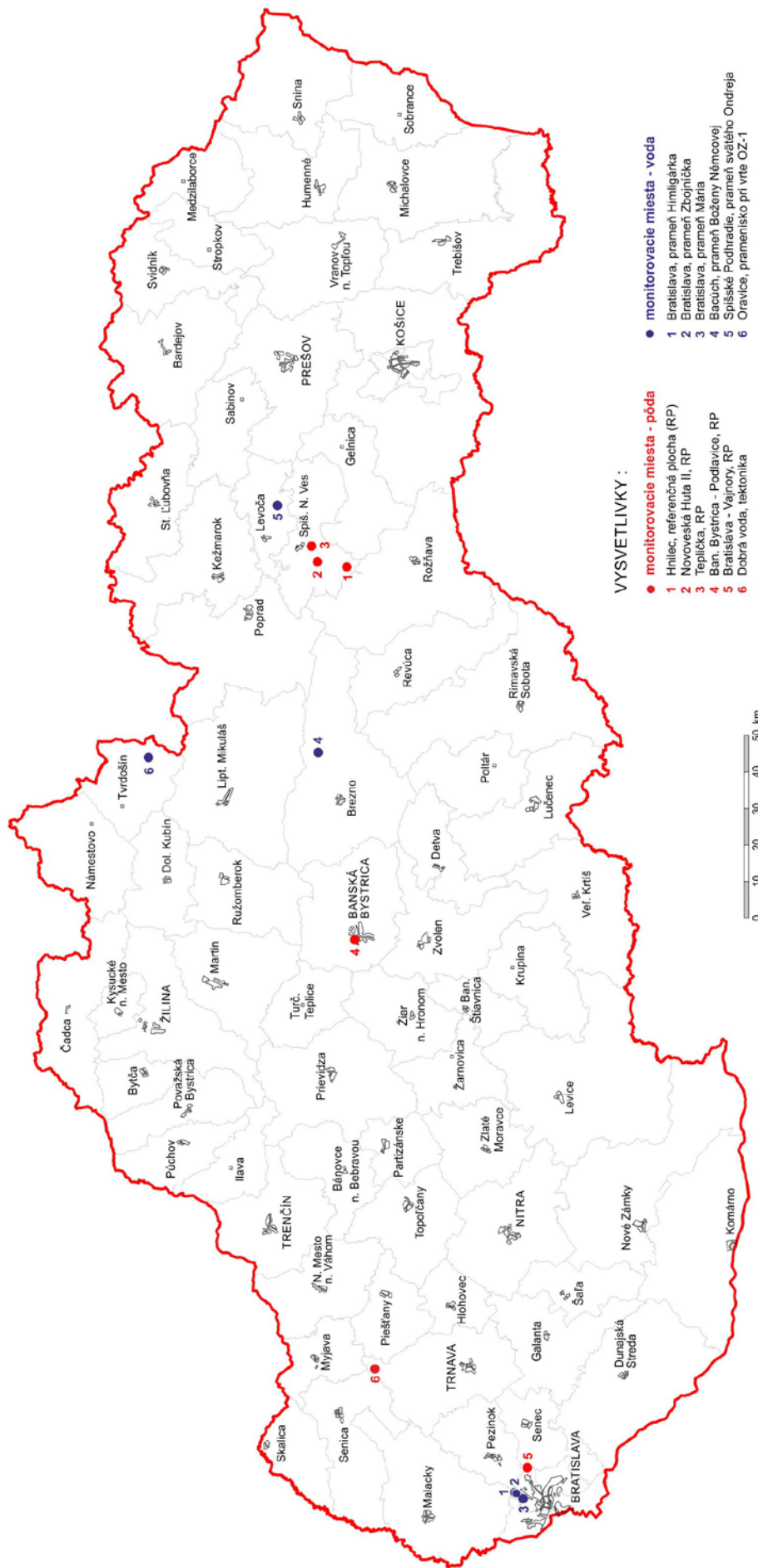
- RP Hnilec (4x ročne – apríl až október, každé dva mesiace)
- RP Novoveská Huta (7x ročne – apríl až október, každý mesiac)
- RP Teplička (7x ročne – apríl až október, každý mesiac)
- Bratislava – RP Vajnory (2x ročne – máj a september)
- Banská Bystrica – RP Podlavice (2x ročne – máj a september)

RP Hnilec, nachádzajúca sa cca 2,1 km JJZ od centra rovnomennej obce pri štátnej ceste č. 533 Spišská Nová Ves – Gemerská Poloma, je charakteristická až extrémnym radónovým rizikom. Zdrojom radónu je zvetraný stredno-hrubozrnný gemeridný (tzv. „hnilecký“) granit s anomálnymi obsahmi uránu (podľa terénnej spektrometrie gama ~ 20 ppm eU), ktorý tak radíme k horninám s najvyššou prírodnou rádioaktivitou v Západných Karpatoch.

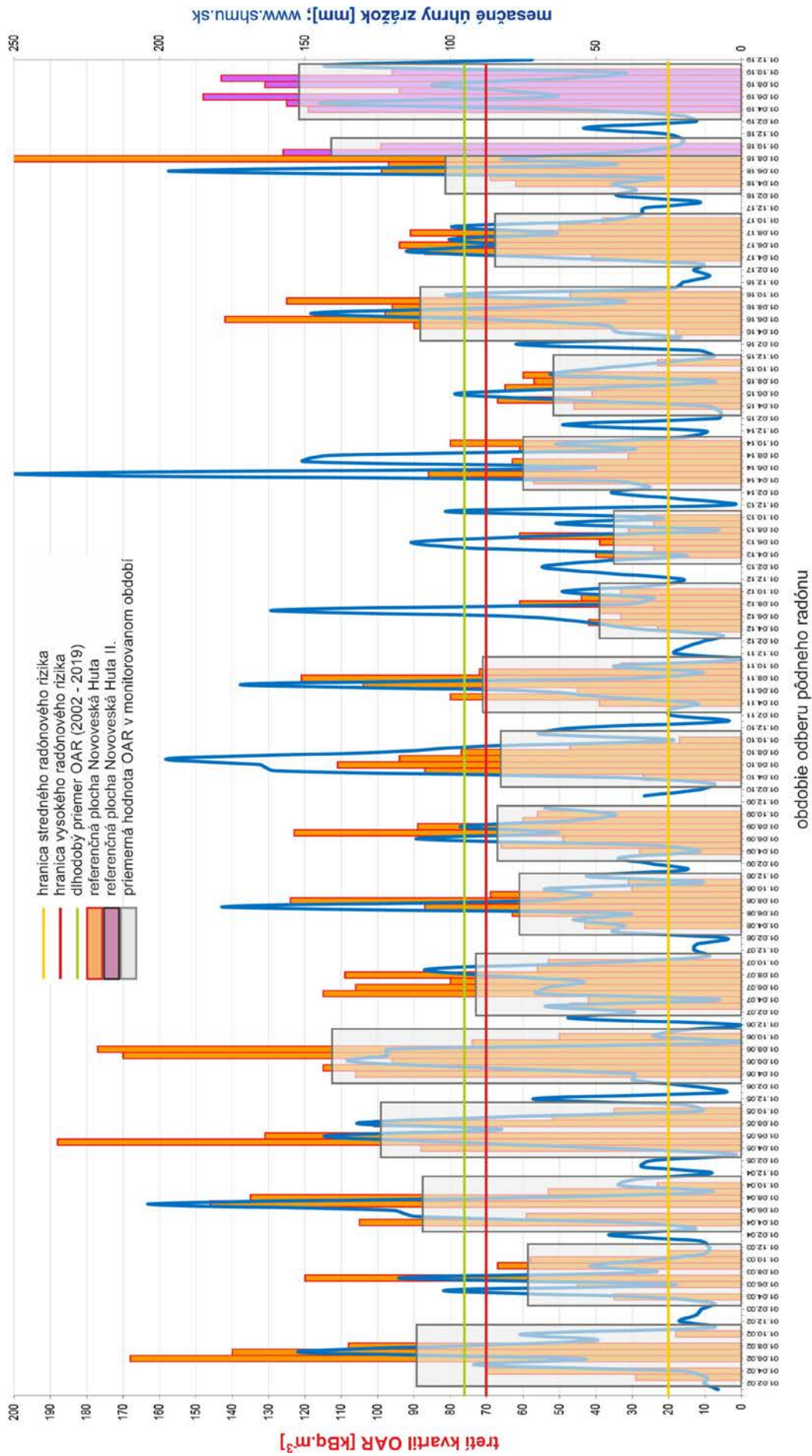
Monitoring OAR v sezóne 2019 tu bol zrealizovaný v období apríl až október (štyri monitorovania, spolu 68 odberov a meraní vzoriek pôdneho vzduchu).

Po doterajšom maxime z roku 2008 (712 kBq.m^{-3}) hodnoty $\text{OAR}_{3,Q}$ (3. kvartil OAR) v pôdnom vzduchu na RP Hnilec v sezónach 2009 až 2013 vykazovali výrazný a systematický pokles (až na 255 kBq.m^{-3}). V roku 2014 bol zaznamenaný nárast $\text{OAR}_{3,Q}$ na 359 kBq.m^{-3} , ale v sezóne 2015 opäť pokles na 334 kBq.m^{-3} . V období 2016 a 2017 stúpili úrovne $\text{OAR}_{3,Q}$ na 407 kBq.m^{-3} , resp. 411 kBq.m^{-3} , ale v roku 2018 tu došlo medziročne k výraznému poklesu pri strednej hodnote iba 282 kBq.m^{-3} (obr. č. 4).

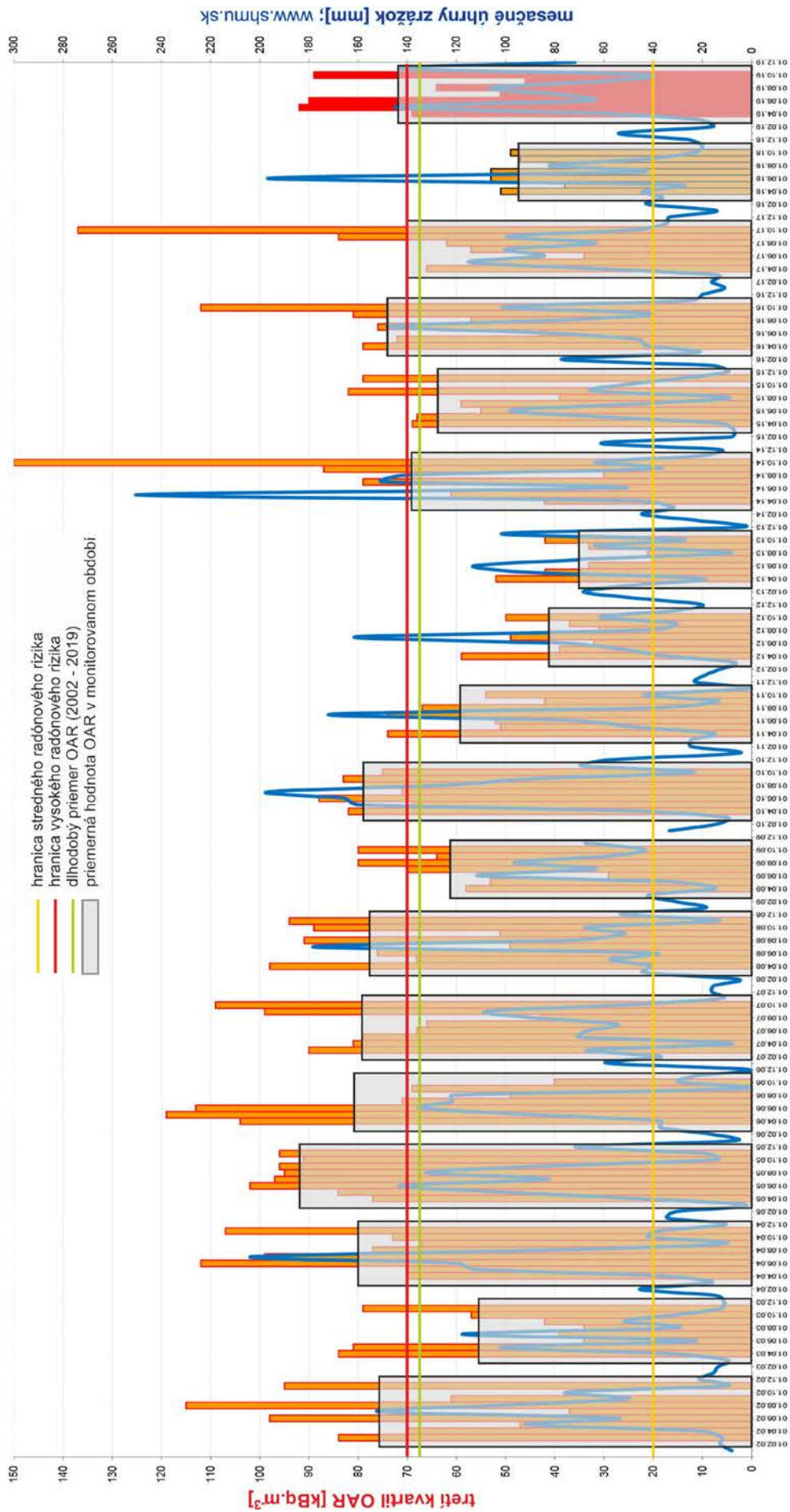
V sezóne 2019 došlo opäť k výraznému nárastu OAR v pôdnom vzduchu (trend $\text{OAR}_{2019/2018} = 1,48$). Stredná hodnota $\text{OAR}_{3,Q}$ v roku 2019 dosiahla 416 kBq.m^{-3} pri



Obr. č. 1 Situačná schéma objektov monitorovaných v roku 2019

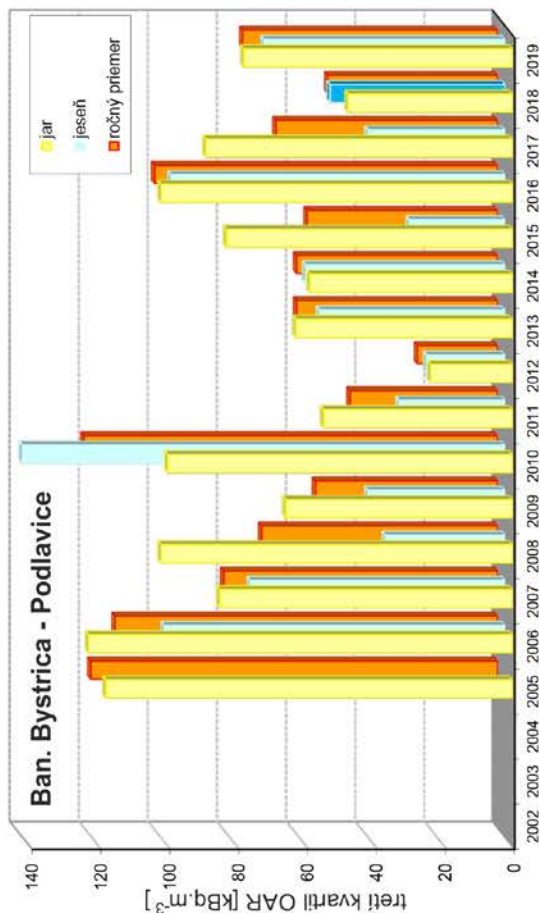
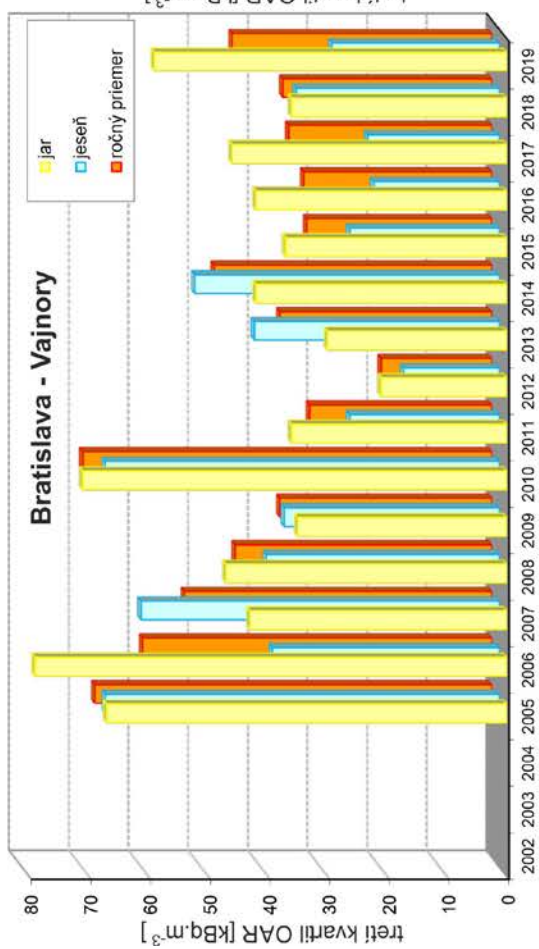
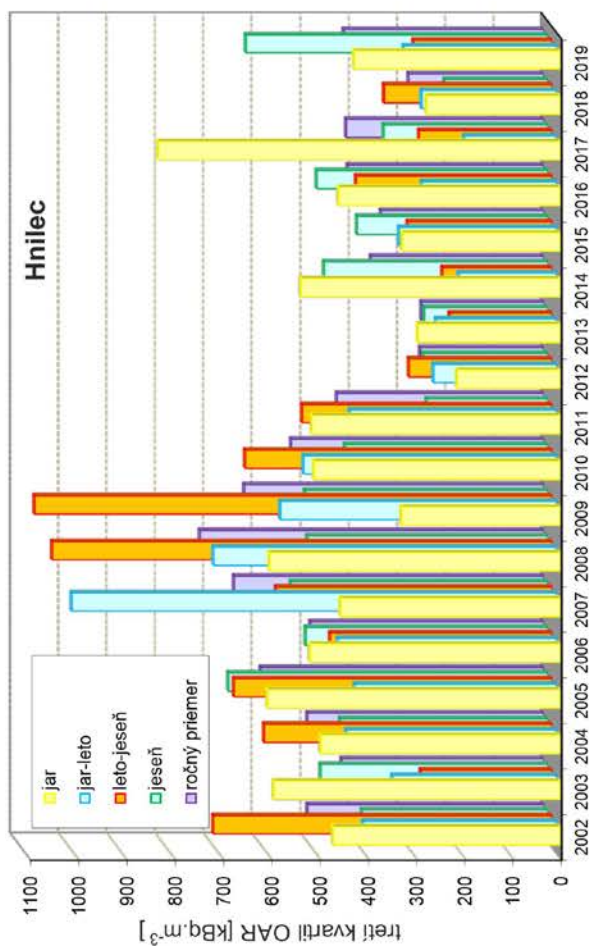


Obr. č. 2 Pôdny radón: monitorovanie objemovej aktivity radónu (OAR) v rokoch 2002 - 2019
 Lokalita: Novoveská Huta a Novoveská Huta II.



obdobie odberu pôdneho radónu

Obr. č. 3 Pôdny radón: monitorovanie objemovej aktivity radónu (OAR) v rokoch 2002 - 2019
Lokalita: Teplička



Obr. č. 4 Pôdny radón: monitorovanie objemovej aktivity radónu (OAR) v rokoch 2002 - 2019
 Lokality: Hnilec, Bratislava - Vajnory, Banská Bystrica - Podlavice

dlhodobom priemere $OAR_{2002-2019} = 451 \text{ kBq.m}^{-3}$. V jednotlivej sonde bola v októbri 2019 nameraná $OAR_{MAX} = 1417 \text{ kBq.m}^{-3}$.

Výsledky monitoringu na RP Hnilec v období 2002 – 2019 graficky prezentujeme na obr. č. 4 a prehľadne v tab. č. 6. Podrobnejšie štatistické údaje za uplynulý rok a porovnanie výsledkov monitorovania s predchádzajúcimi sezónami dokladujeme v tab. č. 3.

RP Novoveská Huta II je situovaná v priestore medzi miestnou komunikáciou približne V–Z smeru a cca 25 m sz. od päty veže miestneho kostola sv. Cyrila a Metoda. Tvorená je tromi plynometrickými profilmi (sieť 5 x 5 m). Založená je – obdobne, ako pôvodná RP Novoveská Huta – v prostredí budovanom pestrofarebnými pieskovecami a bridlicami strážanských vrstiev novoveského súvrstvia (perm) strednej plynopriepustnosti s väzbou na dislokácie SSV – JJZ smeru.

Monitoring OAR v pôdnom vzduchu tu bol v sezóne 2019 zrealizovaný v období apríl až október (sedem monitorovaní, spolu 118 odberov a meraní vzoriek pôdného vzduchu).

V roku 2019 tu došlo medziročne k miernemu nárastu – trend $OAR_{3,Q} 2019/2018 = 1,08$; dlhodobý priemer $OAR_{3,Q} 20018-2019 = 76 \text{ kBq.m}^{-3}$. Najvyššia priemerná mesačná úroveň $OAR_{3,Q} = 121 \text{ kBq.m}^{-3}$ (september 2019) a v jednotlivej sonde $OAR_{MAX} = 298 \text{ kBq.m}^{-3}$ (apríl 2019).

Grafické znázornenie hodnôt $OAR_{3,Q}$ v pôdnom vzduchu v jednotlivých sezónach na monitorovaných objektoch v Nov. Hute, ich vývoj v priebehu sezóny 2019 a porovnanie s predchádzajúcimi obdobiami (2002 – 2019) dokumentujeme na obr. č. 2. Pre možnosť kvalitatívneho posúdenia úrovni OAR a mesačných zrážkových úhrnov (zdroj: *shmu.sk*) je do obrázku zapracovaná aj príslušná grafická závislosť.

Výsledky štatistického spracovania výsledkov meraní sú prehľadne spracované v tab. č. 3 a sumárne v tab. č. 6.

RP Teplička je lokalizovaná približne 2,8 km južne od centra Spišskej Novej Vsi v lokalite Šulerloch (podľa rovnomennej kóty 646 m).

Podložie RP budujú sedimenty paleogénu (bridlice, pieskovce) strednej plynopriepustnosti s vyšším podielom ílovitej frakcie. Ílovité vrstvičky s malou priepustnosťou síce tvoria pomerne účinnú bariéru pri prenikaní radónu k povrchu, ale tento jav sa prejavuje iba pri zvýšenej vlhkosti horninového prostredia. Opačnú závislosť je – do určitej miery – možné očakávať v obdobiach s nízkymi zrážkovými úhrnmi, kedy plynopriepustnosť miestnych sedimentov (v dôsledku poklesu vlhkosti pokryvných útvarov) významne vzrastie.

V areáli tejto RP od maxima $OAR_{3,Q}$ z roku 2005 (92 kBq.m^{-3}) dochádzalo postupne k

výraznému poklesu koncentrácií pôdneho radónu (okrem sezóny 2010 s vysokými úhrnmi zrážok) až na $35 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (rok 2013). V nasledujúcich štyroch sezónach boli priemerné hodnoty $\text{OAR}_{3,Q}$ pomerne vyrovnané a varírovali v rozmedzí 64 až $74 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. V sezóne 2018 tu došlo opäť k výraznému poklesu na $\text{OAR}_{3,Q} = 47 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Monitoring v sezóne 2019 bol zrealizovaný v období apríl až október (sedem monitorovaní, 119 odberov a meraní vzoriek pôdneho vzduchu). Maximálna úroveň bola zaznamenaná v máji $\text{OAR}_{3,Q} = 92 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Najvyššia koncentrácia pôdneho radónu v jednotlivej sonde bola zaznamenaná v auguste ($\text{OAR}_{\text{MAX}} = 249 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$). Medziročne tu došlo k výraznému nárastu obsahov pôdneho radónu: trend $\text{OAR}_{3,Q} 2019/2018 = 1,53$ pri dlhodobom priemere $\text{OAR}_{3,Q} 2002-2019 = 67 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Priebeh variácií OAR v pôdnom vzduchu dokladujeme na obr. č. 3, kde formou stĺpcového diagramu prezentujeme výsledky monitorovania od roku 2002, vrátane grafu mesačných zrážkových úhrnov (zdroj: *shmu.sk*). Výsledky komplexného štatistického spracovania meraní sú v tab. č. 3 a sumárne v tab. č. 6.

RP Bratislava – Vajnory je založená na **sv.** okraji rovnomennej mestskej časti Bratislavy, neďaleko Vajnorskej cesty, pozdĺž melioračného kanála približne S-J smeru.

Podložie monitorovaného objektu tvoria fluviálne holocénne sedimenty (piesčité až štrkovité hliny) so strednou až dobrou plynopriepustnosťou.

Na RP Bratislava – Vajnory sa v období 2005 až 2012 (s výnimkou mimoriadne vlhkej sezóny 2010) postupne znižovali priemerné ročné úrovne $\text{OAR}_{3,Q}$. V období 2013 – 2014 tu došlo k ich zreteľnému nárastu, a po poklese v roku 2015 zaznamenávame postupný nárast na úroveň $\text{OAR}_{3,Q} = 44 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Monitoring OAR v pôdnom vzduchu tu bol v roku 2019 zrealizovaný v mesiacoch máj a september (dve monitorovania, 34 odberov a meraní vzoriek pôdneho vzduchu).

Na RP Bratislava – Vajnory došlo medziročne k pomerne výraznému nárastu obsahov pôdneho radónu (trend $\text{OAR}_{3,Q} 2019/2018 = 1,26$), pri strednej hodnote $\text{OAR}_{3,Q} = 44 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ a dlhodobom priemere $\text{OAR}_{3,Q} 2005-2019 = 42 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Najvyššie koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu v jednotlivej sonde sa zistili pri jar-nom monitoringu ($80 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$). Hodnoty $\text{OAR}_{3,Q}$ tu boli v sezóne 2019 značne rozdielne a dosiahli $59 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (jar), resp. $28 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (jeseň) a súvisia s významne vyššou vlhkosťou pokrývných sedimentov v jarných mesiacoch.

Podrobné informácie a výsledky štatistického spracovania nameraných hodnôt OAR v pôdnom vzduchu po jednotlivých monitorovacích obdobiach dokladujeme v tab. č. 3 a 6 a graficky na obr. č. 4.

RP Banská Bystrica – Podlavice je lokalizovaná na sz. okraji Banskej Bystrice (časť Podlavice), po oboch stranách poľnej cesty neďaleko od záhradkárskej (chatovej) kolónie.

Podložie referenčnej plochy je budované ramsauskými dolomitmi (stredný až vrchný trias) s anomálnymi koncentraciami uránu (tzv. „uránové dolomity“).

Na tomto objekte bol od roku 2005 (okrem sezóny 2010, charakterizovanej mimoriadne vysokými zrážkovými úhrnmi) sledovaný postupný a výrazný pokles až na $OAR_{3,Q} 2012 = 24 \text{ kBq.m}^{-3}$. V nasledujúcich troch sezónach (2013 – 2015) tu boli zaznamenané vyššie a úrovňou stabilnejšie hodnoty ($56 - 59 \text{ kBq.m}^{-3}$), ale $OAR_{3,Q}$ v roku 2016 dosiahla úroveň až 100 kBq.m^{-3} . V rokoch 2017 a 2018 sme tu však zaznamenali pomerne rýchly a výrazný pokles OAR v pôdnom vzduchu až na hodnotu 50 kBq.m^{-3} .

Monitorovanie OAR v pôdnom vzduchu sa v sezóne 2019 uskutočnilo v máji a septembri (dve monitorovania, spolu 34 odberov a meraní vzoriek pôdneho vzduchu). Medziročne tu bol zaznamenaný výrazný nárast koncentrácií pôdneho radónu $OAR_{3,Q} = 74 \text{ kBq.m}^{-3}$, pri trende $OAR_{3,Q} 2019/2018 = 1,48$ a dlhodobom priemere $OAR_{3,Q} 2005-2019 = 72 \text{ kBq.m}^{-3}$.

Maximálny obsah pôdneho radónu v jednotlivej sonde dosiahol 283 kBq.m^{-3} (jar), s priemernými hodnotami $OAR_{3,Q}$ na úrovni 78 kBq.m^{-3} (jar), resp. 70 kBq.m^{-3} (jeseň).

Vyhodnotené výsledky monitorovania sú prehľadne spracované v tab. č. 3 a tab. č. 6. Výsledky monitoringu OAR v pôdnom vzduchu na RP Banská Bystrica – Podlavice v sezónach 2005 až 2018 graficky dokumentujeme na obr. č. 4.

Tab. č. 3 Štatistické spracovanie meraní objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu na referenčných plochách

Radón v pôdnom vzduchu - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019													
p.č.	Lokalita	Dátum	c_A - objemová aktivita radónu v pôdnom vzduchu [$\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$]							$\phi + \sigma$	3. kvartil c_A	Rn riziko	Poznámka
			N	min c_A	max c_A	ϕ c_A	σ c_A	ϕ c_A	σ c_A				
1		18.04.19	17	48	970	347	288	635	429	III	sucho		
2		26.06.19	17	117	458	266	97	363	318	III	sucho		
3		20.08.19	17	20	612	254	170	424	289	III	sucho		
4		17.10.19	17	10	1417	468	396	864	626	III	vlhko		
		rok 2019	68	10	1417	334	238	572	416	III			
		rok 2018	68	10	584	214	148	361	282	III			
		rok 2017	68	6	1869	310	241	550	411	III			
		rok 2016	68	36	1327	321	268	589	407	III			
		rok 2015	68	20	878	255	160	415	334	III			
		rok 2014	68	47	969	296	217	513	359	III			
		rok 2013	68	12	734	202	159	361	255	III			
		rok 2012	68	3	712	209	147	355	258	III			
		rok 2011	68	36	1375	384	272	656	430	III			
		rok 2010	67	29	1496	452	312	765	524	III			
		rok 2009	68	32	1735	476	381	857	620	III			
		rok 2008	68	13	1685	550	356	906	712	III			
		rok 2007	68	123	1742	568	331	899	642	III			
		rok 2006	68	150	1262	433	249	682	485	III			
		rok 2005	68	115	1861	509	286	795	587	III			
		rok 2004	68	227	1300	454	211	665	491	III			
		rok 2003	68	87	968	333	156	489	420	III			
		rok 2002	67	84	1157	415	210	625	491	III			

Tab. č. 3 Štatistické spracovanie meraní objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu na referenčných plochách

Radón v pôdnom vzduchu - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019													
p.č.	Lokalita	Dátum	c_A - objemová aktivita radónu v pôdnom vzduchu [$\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$]							$\phi + \sigma$	3. kvartil c_A	Rn riziko	Poznámka
			N	min c_A	max c_A	ϕ c_A	σ c_A	ϕ c_A	σ c_A				
1	Novoveská Huta II	11.04.19	16	22	298	90	68	158	119	III	vlhko - mokro (sneženie)		
2		06.05.19	17	38	196	108	49	157	125	III	vlhko		
3		26.06.19	17	12	282	107	80	187	148	III	sucho		
4		25.07.19	17	13	133	63	37	100	94	III	sucho		
5		20.08.19	17	7	172	94	47	141	132	III	sucho		
6		24.09.19	17	25	225	121	51	172	143	III	sucho		
7		17.10.19	17	30	163	74	38	112	96	III	vlhko		
		rok 2019	118	7	298	94	53	147	122	III			
	Novoveská Huta	rok 2018	68	9	417	76	73	148	82	III			
	Novoveská Huta II		34	27	231	84	51	134	113	III			
	Novoveská Huta	rok 2017	117	3	666	69	81	150	68	II-III			
		rok 2016	119	10	430	80	75	155	88	III			
		rok 2015	119	3	370	46	46	91	51	II			
		rok 2014	119	5	173	45	35	80	60	II			
		rok 2013	119	4	181	26	20	47	35	II			
		rok 2012	119	5	240	32	26	58	39	II			
		rok 2011	119	7	396	56	55	111	71	III			
		rok 2010	119	4	387	56	55	111	66	II-III			
		rok 2009	119	4	486	55	60	115	67	II-III			
		rok 2008	136	8	198	47	33	80	61	II-III			
		rok 2007	153	7	577	66	59	125	73	III			
		rok 2006	119	4	670	93	75	168	113	III			
		rok 2005	102	2	668	85	88	173	99	III			
	rok 2004	102	1	439	69	60	129	87	III				
	rok 2003	102	2	379	48	40	88	58	II				
	rok 2002	102	1	515	73	65	138	89	III				

Tab. č. 3 Štatistické spracovanie meraní objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu na referenčných plochách

Radón v pôdnom vzduchu - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019												
p.č.	Lokalita	Dátum	c_A - objemová aktivita radónu v pôdnom vzduchu [$\text{KBq}\cdot\text{m}^{-3}$]							Rn riziko	Poznámka	
			N	min c_A	max c_A	ϕ c_A	σ c_A	$\phi + \sigma$	3. kvartil c_A			
1	Teplička	11.04.19	17	16	108	60	20	80	69	II	vlhko (mrholenie)	
2		06.05.19	17	18	118	70	27	97	92	III	vlhko (mrholenie)	
3		26.06.19	17	6	119	66	38	104	90	III	vlhko (rosa)	
4		25.07.19	17	20	72	41	16	57	51	II	sucho	
5		20.08.19	17	26	249	66	53	119	64	II	sucho	
6		24.09.19	17	6	114	45	25	70	46	II	vlhko (rosa)	
7		17.10.19	17	36	169	75	34	109	89	III	vlhkp (rosa)	
		rok 2019	119	6	249	60	30	91	72	II-III		
		rok 2018	119	4	83	38	16	53	47	II		
		rok 2017	109	4	324	54	34	88	71	II-III		
		rok 2016	117	1	154	56	26	82	74	III		
		rok 2015	119	5	101	49	21	70	64	II-III		
		rok 2014	119	1	188	47	30	77	68	II-III		
		rok 2013	119	2	70	27	12	39	35	II		
	rok 2012	119	3	93	32	16	48	42	II			
	rok 2011	119	4	110	44	22	66	59	II			
	rok 2010	119	4	150	59	29	88	78	III			
	rok 2009	119	4	127	49	27	77	62	II-III			
	rok 2008	136	3	118	57	27	84	77	III			
	rok 2007	136	3	137	57	28	85	79	III			
	rok 2006	119	3	157	61	26	87	81	III			
	rok 2005	136	2	196	70	33	103	92	III			
	rok 2004	136	6	120	62	23	85	80	III			
	rok 2003	135	5	144	50	19	69	56	II			
	rok 2002	136	3	143	60	23	83	76	III			

Tab. č. 3 Štatistické spracovanie meraní objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu na referenčných plochách

Radón v pôdnom vzduchu - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019														
p.č.	Lokalita	Dátum	c_A - objemová aktivita radónu v pôdnom vzduchu [$\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$]										Rn riziko	Poznámka
			N	min c_A	max c_A	ϕ c_A	σ c_A	$\phi + \sigma$	3. kvartil c_A	c_A				
1	Bratislava - Vajnory	25.05.19	17	1	80	43	21	64	59	II	vlhko po dažďoch			
2		26.09.19	17	8	34	24	7	31	28	II	sucho			
		rok 2019	34	1	80	34	14	48	44	II				
		rok 2018	33	7	46	28	10	38	35	II				
		rok 2017	34	4	99	27	15	41	34	II				
		rok 2016	34	3	69	26	12	38	32	II				
		rok 2015	34	8	44	23	9	32	31	II				
		rok 2014	34	8	61	37	14	51	47	II				
		rok 2013	34	2	75	29	14	43	36	II				
		rok 2012	34	4	56	17	8	25	19	I-II				
		rok 2011	34	6	49	25	10	35	31	II				
		rok 2010	34	4	100	50	27	76	69	II-III				
		rok 2009	34	13	52	28	11	39	36	II				
		rok 2008	34	2	61	34	13	47	43	II				
		rok 2007	34	4	64	41	13	54	52	II				
		rok 2006	34	10	98	41	20	61	59	II				
		rok 2005	34	20	122	50	22	72	67	II-III				
	rok 2004													
	rok 2003													
	rok 2002													

objekt nebol monitorovaný

Tab. č. 3 Štatistické spracovanie meraní objemovej aktivity radónu v pôdnom vzduchu na referenčných plochách

Radón v pôdnom vzduchu - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019												
p.č.	Lokalita	Dátum	c_A - objemová aktivita radónu v pôdnom vzduchu [kBq.m ⁻³]						Rn riziko	Poznámka		
			N	min c_A	max c_A	ϕ c_A	σ c_A	$\phi + \sigma$			3. kvartil c_A	
1	Banská Bystrica - Podlavice	13.05.19	17	6	283	78	79	157	78	III	mokra po dažďoch	
2		17.09.19	17	11	120	56	32	88	70	III		sucho
		rok 2019	34	6	283	67	56	123	74	III		
		rok 2018	17	13	124	43	32	75	50	II		
		rok 2017	34	4	215	50	45	95	65	II-III		
		rok 2016	34	6	262	75	71	145	100	III		
		rok 2015	34	14	248	54	44	98	56	II		
		rok 2014	34	1	167	49	45	93	59	II		
		rok 2013	34	9	121	44	27	71	59	II		
		rok 2012	34	4	79	19	18	37	24	II		
		rok 2011	34	5	129	33	26	58	43	II		
		rok 2010	34	13	265	102	61	163	120	III		
		rok 2009	34	6	157	38	33	71	53	II		
		rok 2008	34	0	154	50	28	78	69	II-III		
		rok 2007	34	13	219	64	38	102	80	III		
	rok 2006	34	18	272	90	53	143	111	III			
	rok 2005	18	30	193	98	44	142	118	III			
	rok 2004											
	rok 2003											
	rok 2002											

objekt nebol monitorovaný

Vysvetlivky:

c_A objemová aktivita radónu (OAR) v pôdnom vzduchu [kBq.m⁻³]

N počet meraných sond na referenčnej ploche (RP)

min c_A minimálna hodnota OAR z N

max c_A maximálna hodnota OAR z N

ϕ c_A stredná hodnota OAR z N meraných hodnôt c_A

σ a_v štandardná odchýlka OAR z N meraných hodnôt c_A

3. kvartil c_A tretí kvartil z N hodnôt c_A

Rn riziko I – nízke, II – stredné, III – vysoké

Atm. tlak [hPa]

3.2 Pôdny radón na tektonike

Prvé orientačné emanačné merania na lokalite **Dobrá Voda** boli zrealizované v sezóne 2012 na profile DV-1, založenom cca 1,1 km SSZ od centra rovnomennej obce. Profil mal smer približne SV–JZ, dĺžku 80 m a krok odberu vzoriek pôdneho radónu 5 m.

Poruchová zóna, vysledovaná vo wettersteinských dolomitoch (stredný trias) a prekrytá fluviálnymi nivnými sedimentmi, sa prejavila výrazným nárastom koncentrácií pôdneho radónu s $OAR_{MAX} = 24 \text{ kBq.m}^{-3}$ v normálnom poli o úrovni pod 2 kBq.m^{-3} .

V sezóne 2013 boli merania OAR v pôdnom vzduchu vykonané na geofyzikálnom profile DV-2, situovanom cca 80 m SZ od profilu DV-1. Plynometria bola zrealizovaná zároveň s geoelektrickým prieskumom metódou odporovej tomografie (ERT – multikábel) s krokom merania 5,5 m (obr. č. 5 v ročnej správe za rok 2013).

Sledovaná poruchová zóna bola aj na tomto profile indikovaná výrazným nárastom koncentrácií pôdneho radónu s $OAR_{MAX} = 20 \text{ kBq.m}^{-3}$ v normálnom poli cca 1 kBq.m^{-3} a taktiež výrazným poklesom merných odporov z úrovne presahujúcej 3.000 ohm.m v slabo porušených, zvetraných (?) wettersteinských dolomitoch až k hodnote pod 300 ohm.m nad samotnou tektonickou dislokáciou.

V sezónach 2014 a 2015 sa urobili detailné merania koncentrácií pôdneho radónu na plochách P1, resp. P2 (zhodne po 6 emanometrických profilov, sieť 5 x 10 m), založených v okolí, resp. južne od emanačnej anomálie vysledovanej v roku 2012 na profile DV-1.

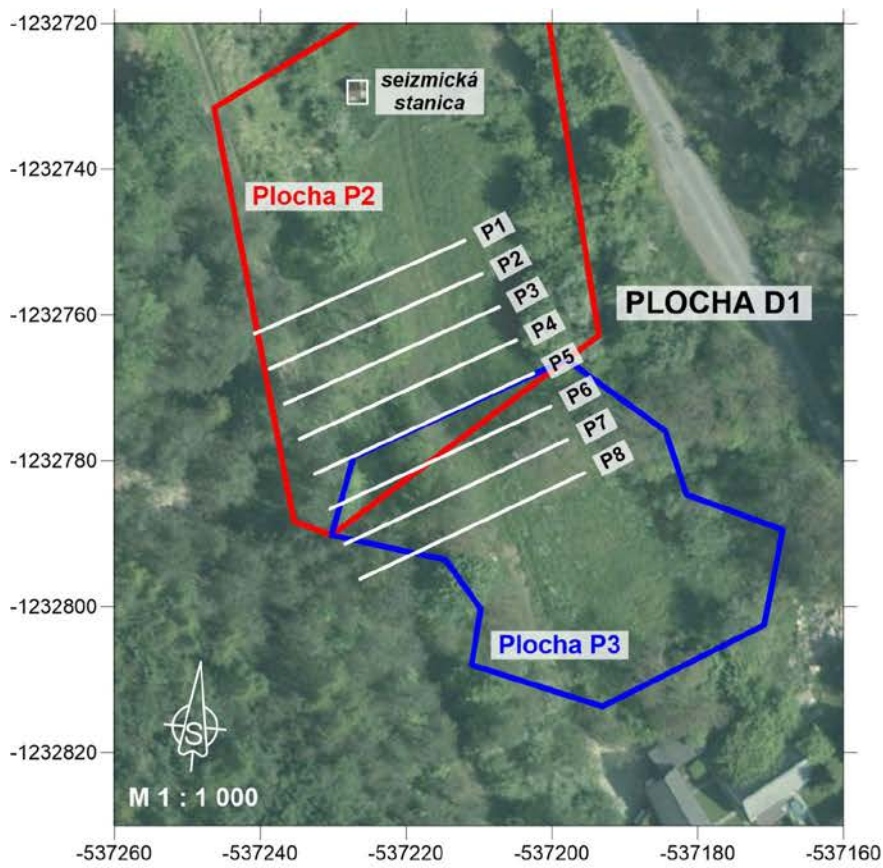
Poruchová zóna sa aj v sezóne 2015 na ploche P2 výrazne prejavila anomálnym zvýšením koncentrácií pôdneho radónu $OAR_{MAX} = 48 \text{ kBq.m}^{-3}$, v normálnom poli cca 7 kBq.m^{-3} .

V sezóne 2016 sa detailným radónovým prieskumom pokračovalo jjv. smerom na ploche P3 (obr. č. 5) – päť emanometrických profilov v sieti 2-5 x 5-10 m (podľa priechodnosti terénom). Poruchová zóna tu bola indikovaná doposiaľ najvyššími koncentraciami pôdneho radónu: $OAR_{MAX} = 62 \text{ kBq.m}^{-3}$, v normálnom poli pod 10 kBq.m^{-3} .

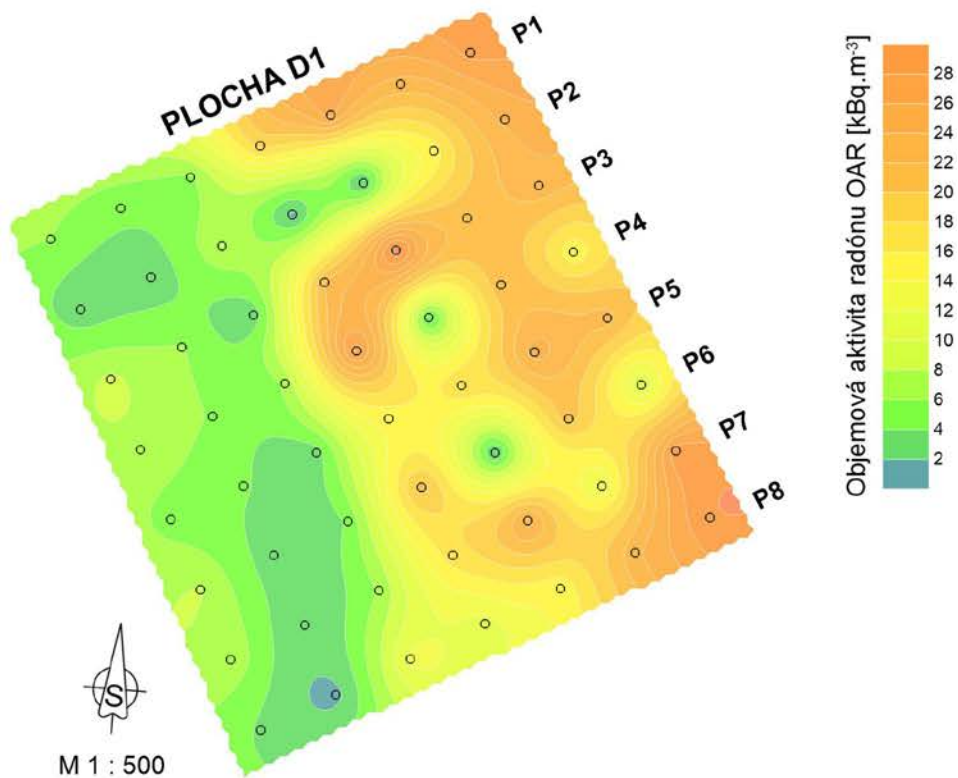
Pokračovanie tektonickej dislokácie južným smerom v areáli plochy P4 (3 profily, sieť 5x5 m; spolu 60 sond) v sezóne 2017 nebolo zaznamenané ($OAR_{MAX} = 28 \text{ kBq.m}^{-3}$, v normálnom poli $\sim 5 \text{ kBq.m}^{-3}$).

V sezóne 2018 boli detailné merania OAR nad tektonikou zrealizované na ploche P5 (sieť cca 5x5 m), ale pokračovanie sledovanej štruktúry južným smerom nebolo indikované ($OAR_{MAX} = 34 \text{ kBq.m}^{-3}$, normálne pole $\sim 6 \text{ kBq.m}^{-3}$).

V sezóne 2019 bola na ploche D1 overovaná a detailizovaná výrazná anomália obsahov pôdneho radónu v mieste prieniku plôch P2 a P3 (obr. 5), preskúmaných v



Situácia prieskumných prác



Obr. č. 5 Pôdny radón nad zlomom - detailizácia anomálie OAR
Lokalita: Dobrá Voda, plocha D1, profily P1 až P8

predošlých monitorovacích obdobiach.

Zrealizovaný tu bol súbor meraní OAR (sieť 5x5 m) pri $OAR_{MAX} = 32 \text{ kBq.m}^{-3}$, v normálnom poli $\sim 4 \text{ kBq.m}^{-3}$. Obdobie s pomerne nízkymi zrážkami sa tu prejavilo na poklese OAR, čím sa aj na tejto lokalite potvrdila závislosť medzi vlhkosťou pokryvných útvarov a koncentraciami pôdneho radónu. Areál plochy D1 navrhujeme v ďalších rokoch pravidelne monitorovať aj v obdobiach po významnejších zrážkach.

Po získaní nevyhnutného prístrojového vybavenia na kontinuálne meranie OAR a vybudovaní monitorovacieho objektu (pozorovací vrt) tu do budúcnosti predpokladáme prepojenie podsystémov 05 a 02 (*Tektonická a seizmická aktivita územia*).

Oblasť poruchovej zóny v areáli lokality Dobrá Voda sa jednoznačne prejavuje zvýšením koncentrácií pôdneho radónu. Vysledovaná tektonická dislokácia pozitívne ovplyvňuje transport radónu do pripovrchových častí aj z väčších hĺbok, takže obsahy radónu v pôdnom vzduchu tu dosahujú anomálne hodnoty, rádovo prevyšujúce pozadie.

3.3 Radón vo vodách

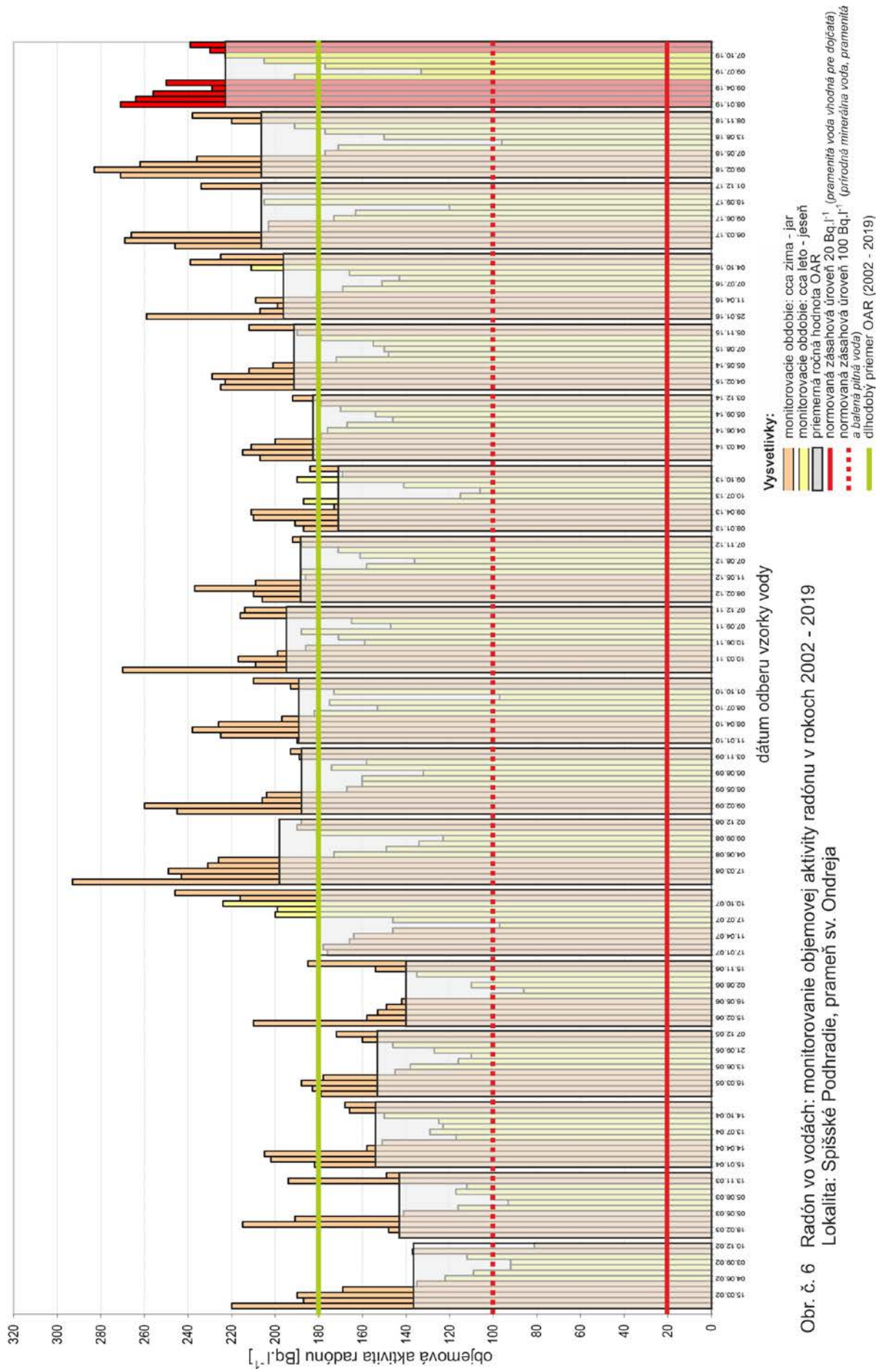
Práce a činnosti, vykonávané pri monitorovaní OAR v zdrojoch podzemných vôd, boli v roku 2019 zrealizované s rôznou frekvenciou na šiestich objektoch:

- Malé Karpaty, prameň Mária (2x ročne – jar a jeseň)
- Malé Karpaty, prameň Zbojnička (2x ročne – jar a jeseň)
- Malé Karpaty, prameň Himligárka (2x ročne – jar a jeseň)
- Bacúch, prameň Boženy Němcovej (8x ročne – interval 1 až 2 mesiace)
- Spišské Podhradie, prameň sv. Ondreja (12x ročne – každý mesiac)
- Oravice, pramenisko pri vrte OZ-1 (2x ročne – jar a jeseň)

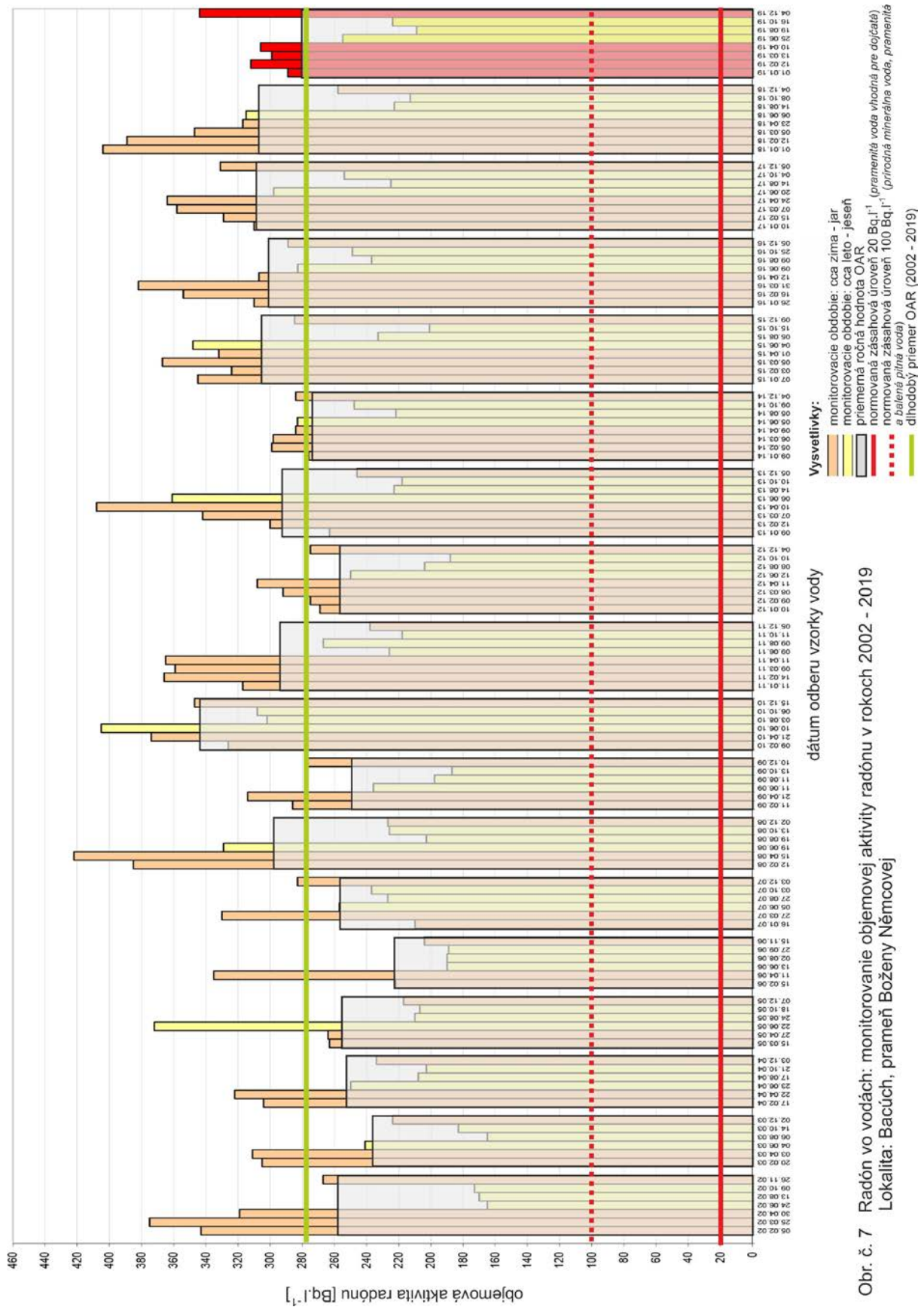
Výstupy meraní OAR v podzemných vodách boli štatisticky spracované a dokladujeme ich formou tabuľkových výstupov (tab. č. 4, 5 a 6). Výsledky meraní na uvedených lokalitách za obdobie 2002 (2006) až 2019 graficky prezentujeme formou prehľadných stĺpcových grafov na obr. 6, 7 a 8.

V tab. č. 4 uvádzame základné výsledky monitoringu OAR vo vodách za obdobie sezóny 2019, vrátane doplňujúcich údajov (teplota vzduchu a vody, výdatnosť zdroja). V tabuľke sú uvedené aj vybrané údaje monitoringu OAR vo vodách z predošlých období. Výsledky štatistického spracovania nameraných koncentrácií radónu a výdatností sledovaných vodných zdrojov za obdobie 2002 (2006) až 2019 uvádzame v tab. č. 5. Prehľadný súhrn výsledkov monitorovania za uplynulé sezóny je v tab. č. 6.

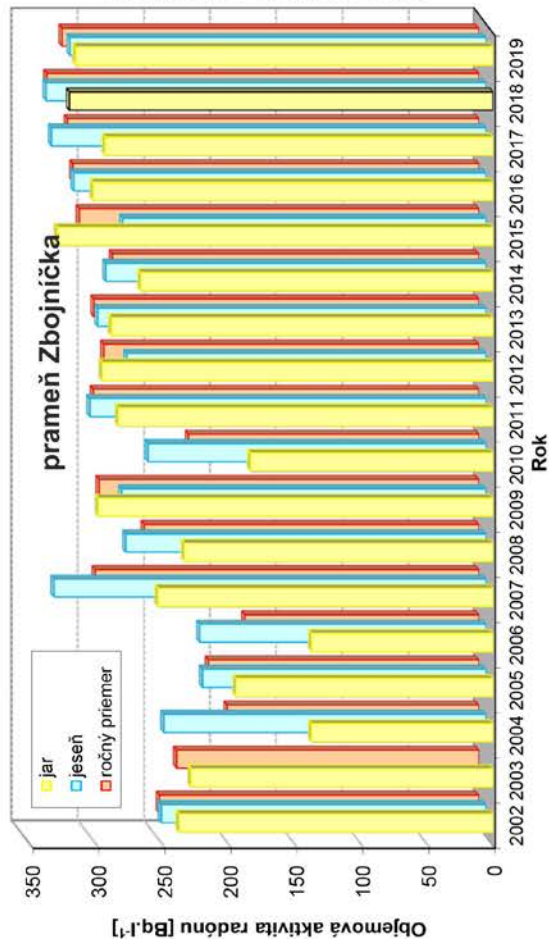
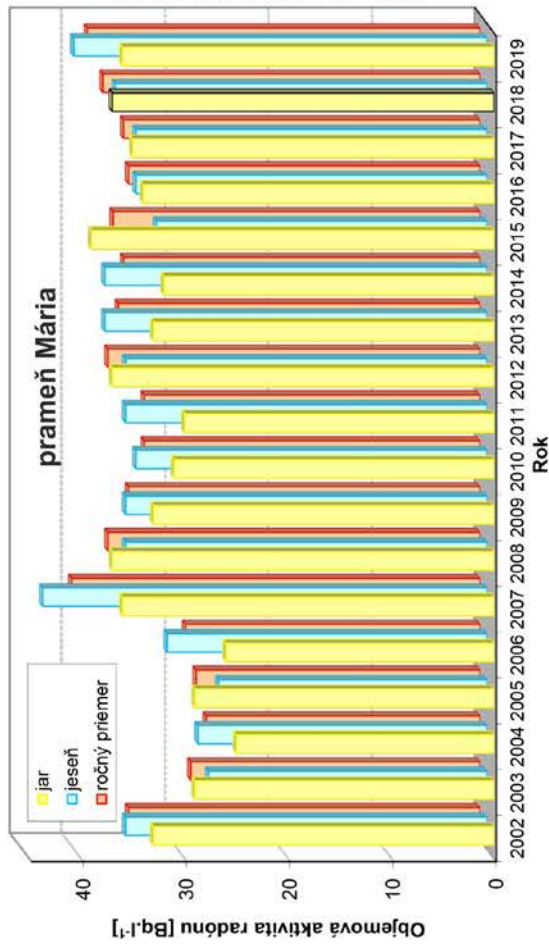
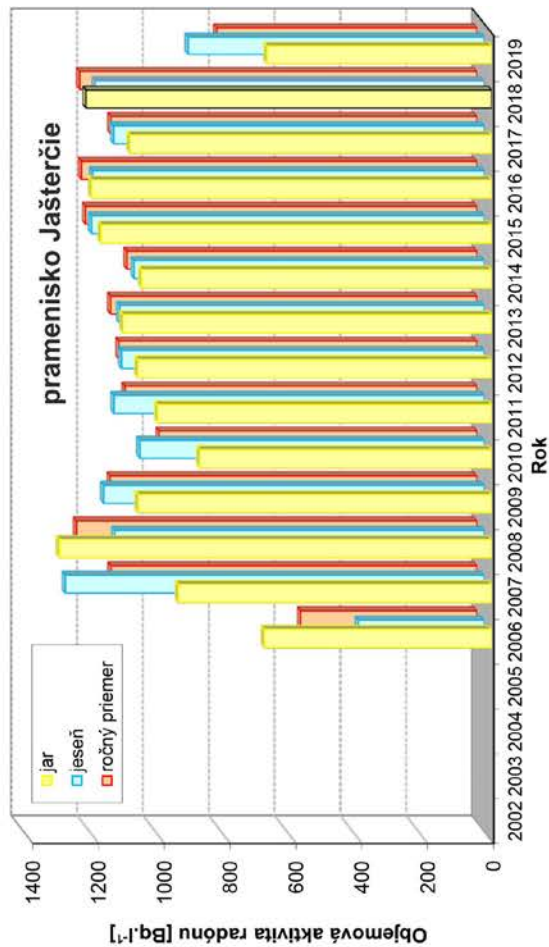
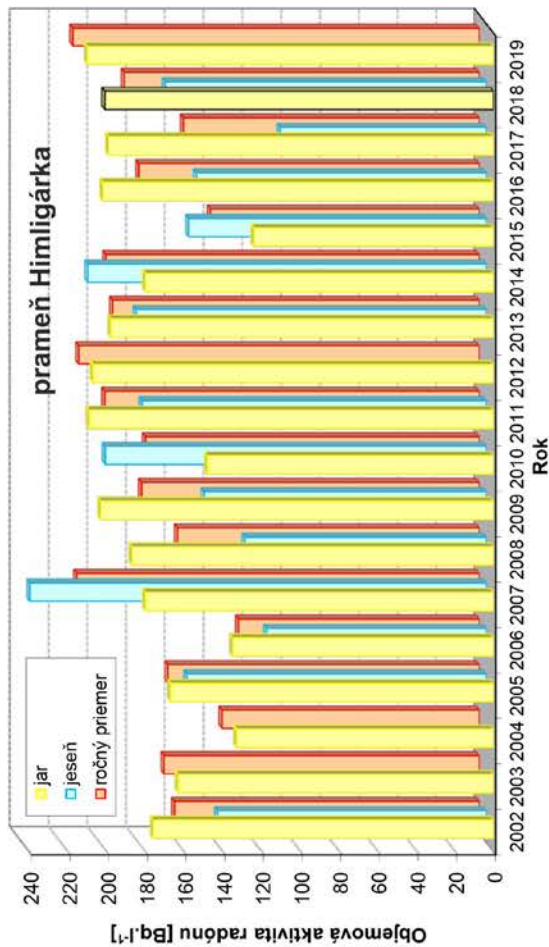
V oblasti **Malých Karpát** (severne od centra Bratislavy) boli v máji a septembri 2019 monitorované pramene **Mária** (Máriin prameň), **Zbojnička** a **Himligárka**. Zachytené a stavebne upravené pramene sú viazané na kyslé prostredie kryštalinika Malých Karpát



Obr. č. 6 Radón vo vodách: monitorovanie objemovej aktivity radónu v rokoch 2002 - 2019
Lokalita: Spišské Podhradie, prameň sv. Ondreja



(leukokrátne muskovitické a dvojsľudné granity, granodiority; bratislavský typ) a na porušené zóny s podmienkami vhodnými na akumuláciu a transport radónu.



Obr. č. 8 Radón vo vodách: monitorovanie objemovej aktivity radónu v rokoch 2002 - 2019
 Lokality: Bratislava - prameň Mária, Himligárka, Zbojnička; Oravice - pramenisko Jašterčie

Na prameni Mária bol medziročne vysledovaný malý nárast koncentrácií radónu: trend $OAR_{2019/2018} = 1,03$; priemerná ročná hodnota $OAR_{2019} = 38 \text{ Bq.l}^{-1}$; dlhodobý priemer $OAR_{2002-2019} = 34 \text{ Bq.l}^{-1}$.

Mierny pokles obsahov radónu v zdrojoch podzemných vôd bol medziročne zaznamenaný na prameni Zbojníčka (trend $OAR_{2019/2018} = 0,97$), pri strednej ročnej úrovni $OAR_{2019} = 316 \text{ Bq.l}^{-1}$ a dlhodobom priemere $OAR_{2002-2019} = 267 \text{ Bq.l}^{-1}$.

Najvyšší nárast OAR v podzemných vodách bol v roku 2019 medziročne zaznamenaný v prameni Himligárka (trend $OAR_{2019/2018} = 1,14$) pri priemernej ročnej hodnote $OAR_{2019} = 210 \text{ Bq.l}^{-1}$ (najvyššie hodnota od roku 2002) a dlhodobom priemere $OAR_{2002-2019} = 172 \text{ Bq.l}^{-1}$.

Koeficienty variácií OAR (V_{Rn}) v sezóne 2019 sú nízke a dosiahli max. 7 % (tab. 4).

Priemerné výdatnosti monitorovaných prameňov v sezóne 2019 dosiahli: $Q_{Mária} = 0,124 \text{ l.s}^{-1}$, $Q_{Zbojníčka} = 0,286 \text{ l.s}^{-1}$ a $Q_{Himligárka} = 0,286 \text{ l.s}^{-1}$. Pri jesennom monitoringu nebolo možné na prameni Himligárka korektne odobrať vzorku vody.

Korelačná závislosť medzi OAR a výdatnosťou zdrojov podzemných vôd nebola zistená. Podrobnejšie informácie sú v tab. č. 4 a 5 a na obr. č. 8.

Prameň Boženy Němcovej, lokalizovaný severne od obce Bacúch, bol v uplynulej sezóne monitorovaný 8x (v období január až apríl každý mesiac, zvyšok sezóny každý druhý mesiac). Zachytený a stavebne upravený prameň vyviera na povrch v prostredí granáticko-muskoviticko-biotitických pararúl, svorových rúl až svorov. Zdrojom radónu sú pravdepodobne porušené, emanačne schopné zóny kryštalinika Nízkyh Tatier.

Maximum objemovej aktivity radónu (344 Bq.l^{-1}) bolo zaznamenané v decembri a minimum (209 Bq.l^{-1}) v auguste 2019 (tab. č. 4, obr. č. 7); trend $OAR_{2019/2018} = 0,91$; stredná hodnota $OAR_{2019} = 280 \text{ Bq.l}^{-1}$ a dlhodobý priemer $OAR_{2002-2019} = 278 \text{ Bq.l}^{-1}$ (tab. č. 6).

Priemerná výdatnosť prameňa v roku 2019 dosiahla $0,022 \text{ l.s}^{-1}$, pri pomerne nízkom koeficiente variácie ($V_Q = 11 \%$) (tab. č. 5). Aj v porovnaní s predošlými monitorovacími sezónami sa jedná o dlhodobo relatívne stabilnú úroveň: v sezónach 2002 až 2019 sa výdatnosti pohybovali v rozmedzí iba $0,020 - 0,027 \text{ l.s}^{-1}$, pri pomerne nízkej variabilite ($V_Q = 7 - 17 \%$). Ani na tomto prameni nebola zistená korelačná závislosť medzi OAR a výdatnosťou zdroja.

Prameň sv. Ondreja pri Spišskom Podhradí, je situovaný v areáli lokality Sivá Brada pri štátnej ceste č. 18 (E 50) Poprad – Prešov. Zachytený a stavebne upravený prameň, vyvierajúci z travertínovej kopy v oblasti budovanej hlinito-kamenitými deluviálnymi

sedimentmi, sa monitoruje 12x ročne v mesačných intervaloch.

Priemerný obsah radónu v podzemnej vode dosiahol úroveň $OAR_{2019} = 222 \text{ Bq.l}^{-1}$ (trend $OAR_{2019/2018} = 1,08$); čo je najvyššia hodnota od roku 2002; dlhodobý priemer $OAR_{2002-2019} = 180 \text{ Bq.l}^{-1}$. Najvyššia hodnota $OAR = 271 \text{ Bq.l}^{-1}$ bola nameraná v januári a najnižšia (133 Bq.l^{-1}) v júli 2019 (obr. č. 6, tab. č. 4, 5 a 6).

Výdatnosti prameňa sa v roku 2019 pohybovali v rozmedzí $0,038 - 0,057 \text{ l.s}^{-1}$, so strednou hodnotou $0,047 \text{ l.s}^{-1}$ a koeficiente variácie $V_Q = 13 \%$. Priemerná výdatnosť prameňa aj v predošlých monitorovacích sezónach varírovala v relatívne malom rozmedzí $0,033$ až $0,047 \text{ l.s}^{-1}$ ($V_Q = 7 - 30 \%$), bez korelácie na koncentrácie radónu vo vode (tab. č. 5).

Pramenisko Jašterčie, situované cca 1,8 km južne od obce Oravice (neďaleko vrtu OZ-1), bolo monitorované v apríli a októbri 2019.

Vody tohto zdroja majú hlboký obeh, viazaný na predterciérne útvary a zóny hlbinných tektonických dislokácií. Zdroj radónu je nielen emanačný (získavaný z prostredia emanujúcich hornín), ale aj autogénny (vznikajúci rozpadom rádia obsiahnutého vo vode).

V tomto prírodnom termálnom vývere podzemných vôd (na povrch vyvierajú v prostredí glacifluviálnych sedimentov) sú dlhodobo zaznamenávané doposiaľ najvyššie známe objemové aktivity radónu v prírodných podzemných vodách v rámci územia Slovenska.

Potvrdzujú to aj výsledky meraní v roku 2019, kedy boli namerané hodnoty $OAR = 682 \text{ Bq.l}^{-1}$ na jar a 899 Bq.l^{-1} na jeseň (trend $OAR_{2019/2018} = 0,66$), pri strednej ročnej úrovni $OAR_{2019} = 791 \text{ Bq.l}^{-1}$ a dlhodobom priemere $OAR_{2006-2019} = 1056 \text{ Bq.l}^{-1}$.

Vzhľadom na charakter zdroja – pramenisko so starým poškodeným zberným objektom – nie je možné (bez pomerne náročných technických prác) určiť jeho výdatnosť.

Získané údaje prezentujeme v tab. č. 4, 5, 6 a na obr. č. 8.

tab. č. 4 Objemová aktivita radónu v podzemných vodách

Radón v podzemných vodách - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019											
p.č.	Lokalita	Dátum	²²² Rn	Q	t-voda	t-vzduch	Rn _{min}	Rn _{max}	φ Rn	v Rn	
		Rok	[Bq.l ⁻¹]	[l.s ⁻¹]	[°C]	[°C]	[Bq.l ⁻¹]	[Bq.l ⁻¹]	[Bq.l ⁻¹]	[%]	
1	Bratislava - prameň Mária	10.05.19	36	0.204	8	14					
2		17.09.19	40	0.044	11	15					
		2019					36	40	38	7	
		2018					36	37	37	2	
		2017					34	35	35	8	
		2016					34	34	34	0	
		2015					32	39	36	14	
		2014					32	37	35	10	
		2013					33	37	35	8	
		2012					35	37	36	4	
		2011					30	35	33	11	
		2010					31	34	33	7	
		2009					33	35	34	4	
		2008					35	37	36	4	
		2007					36	43	40	12	
		2006					26	31	29	9	
	2005					26	30	28	7		
	2004					25	28	27	6		
	2003					27	29	28	5		
	2002					33	35	34	4		

tab. č. 4 Objemová aktivita radónu v podzemných vodách

Radón v podzemných vodách - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019												
p.č.	Lokalita	Dátum		²²² Rn [Bq.l ⁻¹]	Q [l.s ⁻¹]	t-voda [°C]	t-vzdľuch [°C]	Rn _{min} [Bq.l ⁻¹]	Rn _{max} [Bq.l ⁻¹]	φ Rn [Bq.l ⁻¹]	v Rn [%]	
		Rok	Rok									
1		10.05.19		316	0.294	8	11					
2		17.09.19		315	0.055	10	14					
		2019						315	316	316	0	
		2018						321	333	327	3	
		2017						294	329	312	8	
		2016						303	312	308	2	
		2015						275	330	303	13	
		2014						267	288	278	5	
		2013						289	294	292	1	
		2012						272	296	284	6	
		2011						287	300	294	3	
		2010						184	256	220	23	
		2009						276	299	288	6	
		2008						234	273	254	11	
		2007						254	327	291	18	
		2006						138	217	178	22	
		2005						195	215	205	5	
		2004						138	244	191	28	
		2003						229	230	230	0	
		2002						238	246	242	2	

Bratislava - prameň Zbojníčka

tab. č. 4 Objemová aktivita radónu v podzemných vodách

Radón v podzemných vodách - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019												
p.č.	Lokalita	Dátum		^{222}Rn [Bq.l ⁻¹]	Q [l.s ⁻¹]	t-voda [°C]	t-vzduch [°C]	Rn _{min} [Bq.l ⁻¹]	Rn _{max} [Bq.l ⁻¹]	φ Rn [Bq.l ⁻¹]	v Rn [%]	
		Rok	Rok									
1		10.05.19		210	0.286	8	10					
2		17.09.20		<i>nebolo možné korektne odobrať vzorku vody</i>								
		2019						-	-	210	-	
		2018						166	201	184	13	
		2017						107	199	153	43	
		2016						150	202	176	21	
		2015						124	154	139	15	
		2014						180	206	193	10	
		2013						181	198	190	6	
		2012						-	-	207	-	
	Bratislava - prameň Himligárka	2011						178	209	194	11	
		2010						148	197	173	20	
		2009						146	203	175	23	
		2008						125	187	156	28	
		2007						180	236	208	19	
		2006						114	135	125	8	
		2005						155	167	161	4	
		2004						133	133	133	-	
		2003						163	-	-	-	
		2002						139	176	158	17	

tab. č. 4 Objemová aktivita radónu v podzemných vodách

Radón v podzemných vodách - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019												
p.č.	Lokalita	Dátum		²²² Rn [Bq.l ⁻¹]	Q [l.s ⁻¹]	t-voda [°C]	t-vzdľuch [°C]	Rn _{min} [Bq.l ⁻¹]	Rn _{max} [Bq.l ⁻¹]	φ Rn [Bq.l ⁻¹]	v Rn [%]	
		Rok	Rok									
1	Bacúch - prameň Boženy Němcovej	09.01.19		289	0.023	6	-5					
2		12.02.19		312	0.022	5	0					
3		13.03.19		299	0.025	5	0					
4		10.04.19		306	0.024	7	16					
5		25.06.19		255	0.021	10	27					
6		19.08.19		209	0.018	11	25					
7		16.10.19		224	0.019	9	14					
8		04.12.19		344	0.024	8	-2					
			2019						209	344	280	17
			2018						213	404	308	23
			2017						225	364	309	16
			2016						118	382	280	29
			2015						201	367	305	20
			2014						222	299	274	10
			2013						218	408	295	24
			2012						188	308	258	16
		2011						218	366	295	22	
		2010						302	405	344	12	
		2009						187	314	250	20	
		2008						203	422	299	31	
		2007						210	330	257	17	
		2006						189	335	222	23	
		2005						207	372	256	22	
		2004						203	322	254	18	
		2003						165	311	238	26	
		2002						165	375	259	35	

tab. č. 4 Objemová aktivita radónu v podzemných vodách

Radón v podzemných vodách - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019												
p.č.	Lokalita	Dátum Rok	²²² Rn [Bq.l ⁻¹]	Q [l.s ⁻¹]	t-voda [°C]	t-vzduch [°C]	Rn _{min} [Bq.l ⁻¹]	Rn _{max} [Bq.l ⁻¹]	φ Rn [Bq.l ⁻¹]	v Rn [%]		
1		08.01.19	271	0.038	6	-7						
2		11.02.19	264	0.048	6	2						
3		08.03.19	256	0.045	6	5						
4		09.04.19	229	0.045	8	5						
5		10.05.19	250	0.048	9	8						
6		07.06.19	191	0.044	11	15						
7		09.07.19	133	0.038	13	12						
8		07.08.19	177	0.044	14	16						
9		11.09.19	205	0.053	14	8						
10		07.10.19	223	0.057	12	-2						
11		08.11.19	230	0.055	11	2						
12		03.12.19	239	0.046	9	-6						
		2019					133	271	222	18		
		2018					96	283	206	27		
		2017					120	269	206	21		
		2016					143	259	197	18		
		2015					148	229	191	16		
		2014					146	215	183	12		
		2013					106	211	172	20		
		2012					136	237	187	15		
		2011					147	270	195	17		
		2010					97	238	188	20		
		2009					132	260	187	20		
		2008					123	293	198	26		
		2007					97	246	180	22		
		2006					86	210	140	25		
		2005					110	188	154	17		
		2004					117	205	156	18		
		2003					93	215	143	27		
		2002					81	220	137	33		
	Spišské Podhradie - prameň sv. Ondreja											

tab. č. 4 Objemová aktivita radónu v podzemných vodách

Radón v podzemných vodách - monitoring 2019, porovnanie 2002 - 2019												
p.č.	Lokalita	Dátum		^{222}Rn [Bq.l ⁻¹]	Q [l.s ⁻¹]	t-voda [°C]	t-vzduch [°C]		Rn _{min} [Bq.l ⁻¹]	Rn _{max} [Bq.l ⁻¹]	φ Rn [Bq.l ⁻¹]	v Rn [%]
		Rok										
1	Oravice: pramenisko Jašterčie - pri vrte OZ-1	10.04.19		682	nemerateľná	18	12					
2		16.10.19		899	nemerateľná	18	15					
		2019			899				682	899	791	19
		2018							1182	1232	1207	3
		2017							1098	1126	1112	2
		2016							1190	1214	1202	1
		2015							1186	1193	1190	0
		2014							1063	1064	1064	0
		2013							1107	1119	1113	1
		2012							1074	1102	1088	2
		2011							1014	1125	1070	7
		2010							886	1046	966	12
	2009							1073	1156	1115	5	
	2008							1122	1312	1217	11	
	2007							951	1273	1112	20	
	2006							382	690	536	29	
	2005											
	2004											
	2003											
	2002											
objekt nebol monitorovaný												

Kde: ^{222}Rn objemová aktivita radónu (OAR) vo vode c_A [Bq.l⁻¹]

Q výdatnosť vodného zdroja [l.s⁻¹]

t-voda teplota vody [°C]

t-vzduch teplota vzduchu [°C]

Rn_{min} minimálna hodnota OAR za hodnotené obdobie [Bq.l⁻¹]

Rn_{max} maximálna hodnota OAR za hodnotené obdobie [Bq.l⁻¹]

φ Rn stredná hodnota OAR za hodnotené obdobie [Bq.l⁻¹]

v Rn variačný koeficient OAR za hodnotené obdobie [%]

tab. č. 5 Štatistické spracovanie meraní objemovej aktivity radónu v podzemných vodách za obdobie 2002 - 2019

p.č.	Lokalita	Obdobie	^{222}Rn [Bq.l ⁻¹]			Výdatnosť Q [l.s ⁻¹]		
			ϕ Rn	σ Rn	v Rn [%]	ϕ Q	σ Q	v Q [%]
1	Bratislava - prameň Mária	2019	38	2.8	2	0.124	0.113	91
		2018	37	0.7	2	0.069	0.064	91
		2017	35	0.7	2	0.203	0.247	122
		2016	34	0.0	0	0.178	0.173	98
		2015	36	4.9	14	0.134	0.143	107
		2014	35	3.5	10	1.044	1.097	105
		2013	35	2.8	8	0.227	0.100	63
		2012	36	1.4	4	0.171	0.165	97
		2011	33	3.5	11	0.362	0.069	20
		2010	33	2.1	7	0.926	0.178	19
		2009	34	1.4	4	0.127	0.074	59
		2008	36	1.4	4	0.118	0.024	20
		2007	40	4.9	12	0.183	0.019	10
		2006	29	2.5	9	0.613	0.498	81
2	Bratislava - prameň Zbojnička	2005	28	2.0	7	0.396	0.271	68
		2004	27	1.5	6	0.536	0.465	87
		2003	28	1.4	5	0.128	0.139	109
		2002	34	1.4	4	0.299	0.158	53
		2019	316	0.7	0	0.175	0.169	97
		2018	327	8.5	3	0.264	0.171	65
		2017	312	24.7	8	0.389	0.467	120
		2016	308	6.4	2	0.261	0.296	113
		2015	303	38.9	13	0.162	0.166	103
		2014	278	14.8	5	1.026	1.095	107
		2013	292	3.5	1	0.248	0.199	80
		2012	284	17.0	6	0.207	0.233	113
		2011	294	9.2	3	0.303	0.044	14
		2010	220	50.9	23	2.073	1.782	86
2009	288	16.3	6	0.114	0.092	81		
2008	254	27.6	11	0.243	0.233	96		
2007	291	51.6	18	0.265	0.068	26		
2006	178	39.5	22	1.431	1.425	100		
2005	205	10.0	5.0	0.463	0.338	73		
2004	191	53.0	28	0.577	0.535	93		
2003	230	0.7	0.3	0.096	0.121	127		
2002	242	5.7	2	0.276	0.050	18		

tab. č. 5 Štatistické spracovanie meraní objemovej aktivity radónu v podzemných vodách za obdobie 2002 - 2019

p.č.	Lokalita	Obdobie	^{222}Rn [Bq.l^{-1}]		v Rn [%]		Výdatnosť Q [l.s^{-1}]		
			ϕ Rn	σ Rn	v Rn [%]	ϕ Q	σ Q	v Q [%]	
3	Bratislava - prameň Himligárka	2019	210	-	-	0.286	-	-	
		2018	184	24.7	13	0.108	0.115	106	
		2017	153	65.1	43	0.235	0.326	139	
		2016	176	36.8	21	0.154	0.187	121	
		2015	139	21.2	15	0.147	0.187	128	
		2014	193	18.4	10	0.979	1.246	127	
		2013	190	12.0	6	0.171	0.200	117	
		2012	207	-	-	0.168	-	-	
		2011	194	21.9	11	0.193	0.047	25	
		2010	173	34.6	20	1.203	0.870	72	
		2009	175	40.3	23	0.056	0.056	101	
		2008	156	43.8	28	0.130	0.146	113	
		2007	208	39.6	19	0.093	0.031	33	
		2006	125	10.5	8	0.719	0.709	100	
		2005	161	6.0	4	0.259	0.229	88	
		2004	133	-	-	0.263	0.263	100	
		2003	163	-	-	0.091	0.128	141	
2002	158	26.2	17	0.311	0.001	0.2			
4	Bacúch - prameň Boženy Němcovej	2019	280	46.4	17	0.022	0.003	11	
		2018	308	71.9	23	0.024	0.003	11	
		2017	309	48.6	16	0.022	0.002	7	
		2016	301	48.9	16	0.021	0.002	7	
		2015	305	60.1	20	0.020	0.002	9	
		2014	274	26.4	10	0.022	0.003	13	
		2013	295	69.6	24	0.022	0.002	7	
		2012	258	41.8	16	0.022	0.003	12	
		2011	295	64.6	22	0.027	0.003	11	
		2010	344	40.0	12	0.027	0.003	11	
		2009	250	51.0	20	0.024	0.002	8	
		2008	299	92.9	31	0.021	0.002	9	
		2007	257	43.6	17	0.024	0.003	13	
		2006	222	52.0	23	0.027	0.003	9	
		2005	256	57.0	22	0.026	0.004	17	
		2004	254	45.2	18	0.020	0.002	10	
		2003	238	60.6	25	0.021	0.002	9	
2002	259	89.7	35	0.026	0.004	16			

tab. č. 5 Štatistické spracovanie meraní objemovej aktivity radónu v podzemných vodách za obdobie 2002 - 2019

p.č.	Lokalita	Obdobie	²²² Rn [Bq.l ⁻¹]			Výdatnosť Q [l.s ⁻¹]		
			φ Rn	σ Rn	v Rn [%]	φ Q	σ Q	v Q [%]
5	Spišské Podhradie - prameň sv. Ondreja	2019	222	40.1	18	0.047	0.006	13
		2018	206	55.4	27	0.038	0.006	14
		2017	206	43.7	21	0.036	0.005	13
		2016	197	35.5	18	0.040	0.004	11
		2015	191	30.1	16	0.040	0.003	7
		2014	183	22.5	12	0.037	0.003	9
		2013	172	34.1	20	0.037	0.007	18
		2012	187	27.4	15	0.041	0.005	11
		2011	195	33.5	17	0.036	0.006	17
		2010	188	38.0	20	0.038	0.005	13
		2009	187	37.3	20	0.039	0.004	11
		2008	198	51.1	26	0.042	0.005	12
		2007	180	40.4	22	0.040	0.008	20
		2006	140	35.0	25	0.041	0.006	14
		2005	154	26.0	17	0.044	0.006	13
		2004	156	28.6	18	0.039	0.006	14
		2003	143	39.1	27	0.033	0.006	19
2002	137	44.8	33	0.034	0.010	30		
6	Oravice - pramenisko Jašterčie OZ-1	2019	791	153.4	19			
		2018	1207	35.4	3			
		2017	1112	19.8	2			
		2016	1202	17.0	1			
		2015	1190	4.9	0			
		2014	1066	4.2	0			
		2013	1113	8.5	1			
		2012	1088	19.8	2			
		2011	1070	78.5	7			
		2010	966	113.1	12			
		2009	1115	58.7	5			
		2008	1217	134.4	11			
		2007	1112	227.7	20			
2006	536	155.4	29					
2005								
2004								
2003								
2002								

nemerateľná

Kde: ^{222}Rn - objemová aktivita radónu (OAR) vo vode c_A [Bq.l^{-1}]
 ϕ Rn - stredná hodnota OAR za hodnotené obdobie [Bq.l^{-1}]
 σ Rn - štandardná odchýlka OAR za hodnotené obdobie [Bq.l^{-1}]
 v Rn - variačný koeficient OAR za hodnotené obdobie [%]

Q výdatnosť vodného zdroja [l.s^{-1}]
 ϕ Q priemerná výdatnosť Q za hodnotené obdobie [l.s^{-1}]
 σ Q smerodatná odchýlka Q za hodnotené obdobie [l.s^{-1}]
 v Q variačný koeficient Q za hodnotené obdobie [%]

Tab. č. 6 Vývoj hodnôt objemovej aktivity radónu (OAR) v pôdnom vzduchu a v podzemných vodách za obdobie 2002 – 2019

p.č.	LOKALITA	Rok																	Dlhodobý priemer	N	σ	Podiel c _A 2019/2018	Trend 2019/2018		
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018						2019	
		3.Q c _A [kBq.m ⁻³]																							
Pôdny radón na referenčných plochách																									
1	Hnilec	491	420	491	587	485	642	712	620	524	430	258	255	359	334	407	411	282	416	451	1222	290	1.48	↗	
2	Novoveská Huta	89	58	87	99	113	73	61	67	66	71	39	35	60	51	88	68	82	122	118	152	69	1.08	↗	
3	Novoveská Huta II																								
3	Teplička	76	56	80	92	81	79	77	62	78	59	42	35	68	64	74	70	47	72	67	2719	31	1.53	↗	
4	Bratislava - Vajnory				67	59	52	43	36	69	31	19	36	47	31	32	34	35	44	42	509	19	1.26	↗	
5	Banská Bystrica - Podlavice				118	111	80	69	53	120	43	24	59	59	56	100	65	50	74	72	493	51	1.48	↗	
Pôdny radón na tektonike																									
1	Grainár	18	10	13	24	20	16	20	16												17	1022	17		
2	Grainár II.											15									15	70	16		
3	Dobrá Voda, profil DV-1											6									6	18	7		
4	Dobrá Voda, profil DV-2											3									3	60	4		
5	Dobrá Voda, plocha P1																				10	60	7		
6	Dobrá Voda, plocha P2											10									19	60	14		
7	Dobrá Voda, plocha P3																				36	37	15		
8	Dobrá Voda, plocha P4																10				10	60	6		
9	Dobrá Voda, plocha P5																	11			11	54	5		
10	Dobrá Voda, plocha D1																		22		22	60	9		
		861	573	851	938	776	894	860	890	1255	656	747	864	957	719	924	768	673	848						
		106	75	112	125	101	122	112	122	157	80	98	122	119	98	124	108	90	111						
		c _A [Bq.l ⁻¹]																							
Radón vo vodách																									
1	Bratislava - prameň Mária	34	28	27	28	29	40	36	34	33	33	36	35	35	36	34	35	37	38	34	72	4	1.03	↗	
2	Bratislava - prameň Zbojnica	242	230	191	205	178	291	254	288	220	294	284	292	278	303	308	312	327	316	267	71	51	0.97	↘	
3	Bratislava - prameň Himligarka	158	163	133	161	125	208	156	175	173	194	207	190	193	176	153	184	210	210	172	64	33	1.14	↗	
4	Bacúch - prameň Boženy Němcovej	259	238	254	256	222	257	299	250	344	295	258	295	274	305	301	309	308	280	278	253	63	0.91	↘	
5	Spíšské Podhradie - prameň sv. Ondreja	137	143	156	154	140	180	198	187	188	195	187	172	183	191	197	206	206	222	180	437	44	1.08	↗	
6	Oravice - pramenisko Jaštercie						536	1112	1217	1115	966	1070	1088	1113	1064	1190	1202	1112	1207	791	1056	57	200	0.66	↘
7	Zemplín - vrt Ladmorce						12	17	15	15	15									15	18	2			

Kde: 3.Q c_A - stredná hodnota treťieho kvartilu OAR v pôdnom vzduchu za hodnotený rok

c_A - stredná hodnota OAR v podzemnej vode za hodnotený rok

N - celkový počet meraní OAR na lokalite za obdobie monitorovania

σ - štandardná odchýlka OAR z N

↗ ↘ - v danom roku nebol objekt monitorovaný

* - monitorovanie na objekte dočasne prerušené

** - monitorovanie objektu ukončené

4. ZÁVERY A ODPORÚČANIA

Riešenie projektu „*Monitoring objemovej aktivity radónu v geologickom prostredí na území Slovenskej republiky*“, ktorý je jedným z podsystémov významnej úlohy „**Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia Slovenskej republiky**“, pokračovalo v roku 2019 v rozsahu porovnateľnom s predchádzajúcimi sezónami.

Súbor geofyzikálnych prác a činností, realizovaných v tomto podsystéme v sezóne 2019, predstavoval opakované vzorkovania a merania OAR v terénnych aj laboratórnych podmienkach na celkom 12-tich lokalitách (päť lokalít pre pôdny radón na RP, jeden objekt nad tektonikou a šesť objektov pre radón v podzemných vodách) v rámci územia Slovenska (obr. č. 1), vrátane ich komplexného spracovania, vyhodnotenia, porovnania výsledkov s predchádzajúcimi obdobiami, vypracovania jednotlivých ročných správ (textová, tabuľková a grafická časť), aktualizovania výsledných databáz, atď.

Monitorovanie OAR v pôdnom vzduchu na RP sa v sezóne 2019 vykonávalo s rôznou frekvenciou v období apríl až október na lokalitách v strednom a vysokom radónovom riziku: Bratislava – RP Vajnory, Banská Bystrica – RP Podlavice, Spišská Nová Ves – RP Novoveská Huta a RP Teplička, resp. až v extrémnom radónovom riziku na RP Hnilec.

Najrozsiahlejšie monitorovanie OAR v pôdnom vzduchu (v čo možno najširšom spektre meteorologických podmienok), prebehlo na objektoch RP Novoveská Huta II a RP Teplička (po 7x za rok), resp. na lokalite RP Hnilec (4x v roku). Ostatné lokality boli monitorované dvakrát ročne a to v jarnom a jesennom termíne.

Merania OAR nad tektonickou dislokáciou na lokalite Dobrá Voda (plocha D1) boli zrealizované v prvej dekáde októbra 2019.

Objemová aktivita radónu v zdrojoch podzemných vôd bola sledovaná v troch prameňoch v oblasti Malých Karpát v extraviláne Bratislavy (pramene Mária, Zbojníčka a Himligárka – každý 2x v roku), v prameni sv. Ondreja na Sivej Brade pri Spišskom Podhradí (12x ročne), v prameni Boženy Němcovej pri Bacúchu (8x za rok) a na pramenisku Jašterčie pri Oraviciach (2x v priebehu roka).

Získané výsledky boli vyhodnotené, štatisticky spracované a v predkladanej ročnej správe ich prezentujeme formou prehľadných tabuliek, grafov a sprievodného textu. Priebežne sú aktualizované databázy (dátové súbory) v schválenej štruktúre a fyzickej náplni.

Výsledky monitorovania dlhodobo potvrdzujú skutočnosť, že priebeh sezónnych variácií OAR v pôdnom vzduchu významne závisí od meteorologických a klimatických

faktorov, vlhkosti a plynopriepustnosti miestnych zemín a hornín, ale v nezanedbateľnom rozsahu aj na samotnej štruktúrno-geologickej stavbe a litologickej charakteristike geologického prostredia v areáli konkrétnej lokality.

Klimatické a meteorologické podmienky boli v uplynulých monitorovacích sezónach pre akumuláciu a možnosti šírenia radónu v geologickom prostredí značne odlišné.

V rokoch 2004 – 2006 boli dlhšie zimy a častejšie a výdatnejšie zrážky na jar pozitívne ovplyvňovali vlhkosť pôdy a teda aj podmienky pre akumuláciu radónu v horninách.

O niečo iná situácia nastala v sezónach 2007 – 2009, keď zima i jar boli zrážkovo podpriemerné a menej zrážok bolo aj v letnom období (prevažne iba lokálne zrážky a búrky).

Veľmi vysoké priemery atmosférických zrážok boli zaznamenané v roku 2010, kedy napršalo až 1255 mm (najviac od roku 1937 = 1015 mm).

V sezóne 2011 došlo naopak k výraznému poklesu množstva zrážok, ktoré dosiahli iba 656 mm (doposiaľ najnižšie úhrny zrážok pri monitoringu OAR v pôdnom vzduchu na RP, boli zaznamenané v roku 2003 = 573 mm). Záver roka 2011 sa dokonca stal jedným z najsuchších období za ostatných viac ako 100 rokov.

Atmosférické zrážky na území Slovenska v sezóne 2012 boli prakticky na úrovni dlhodobého priemeru a dosiahli 747 mm, v roku 2013 potom 864 mm a v roku 2014 až 957 mm. Sezóna 2014 bola zároveň najteplejšou od roka 1881, kedy sa začalo so systematickými meraniami teplôt ovzdušia na našom území. Uvedené údaje sú pre potreby riešenia projektu iba orientačné. Do budúcnosti predpokladáme získať podklady o zrážkach, teplotách a atmosférickom tlaku z najbližšej stanice SHMÚ.

V roku 2015 došlo k pomerne výraznému poklesu zrážkových úhrnov, ktoré dosiahli 719 mm (98 % dlhodobého priemeru), ale v sezóne 2016 naopak k značnému nárastu až na 924 mm (124 % dlhodobého priemeru). Podľa hodnotenia SHMÚ bol rok 2016 „mimoriadne teplý a veľmi bohatý na atmosférické zrážky“.

V úvode a závere roka 2017 boli atmosférické zrážky nízke, čo bolo vykompenzované v letnom a jesennom období. Táto sezóna bola síce zrážkovo výrazne pod úrovňou predošlého roka, v priemere však bolo dosiahnutých 768 mm (108 % dlhodobého priemeru).

Aj v sezóne 2018 boli zrážky v úvode a závere roka nízke, ale počas neskorej jari až skorej jesene došlo k ich nárastu na ročný úhrn 673 mm, odpovedajúci 90 % dlhodobého priemeru.

V sezóne 2019 boli zrážky pomerne výrazne časovo aj miestne variabilné, pričom najvyššie zrážkové úhrny boli zaregistrované v máji 2019 (150 mm, 197 % dlhodobého

priemeru) a najnižšie v marci a októbri (36 mm).

Prehľad priemerných ročných zrážkových úhrnov pre územie SR za obdobie 2002 – 2019 uvádzame v tab. č. 6 (zdroj: www.shmu.sk).

Všeobecne sa predpokladá, že pôdna vlhkosť „pozitívnym“ spôsobom ovplyvňuje koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu, pretože vyššia vlhkosť pokryvných útvarov v oblasti monitorovaného objektu viac alebo menej účinne spomaľuje prenikanie radónu k povrchu a ďalej do ovzdušia. To vedie k nárastu jeho obsahov v pôdnom vzduchu a naopak – pri poklese pôdnej vlhkosti spravidla klesajú aj hodnoty OAR.

Táto interakcia medzi OAR v pôdnom vzduchu a plynopriepustnosťou (vlhkosťou) sa v sezóne 2019 prejavila na všetkých monitorovaných lokalitách (trendy $OAR_{3,Q 2019/2018} = 1,08$ na RP Novoveská Huta II až 1,53 na RP Teplička; tab. č. 6).

Aj keď sa doterajšie zistenia nedajú v plnom rozsahu zovšeobecňovať, v sezónach (resp. dlhších obdobiach) s nízkymi atmosférickými zrážkami je možné očakávať viac alebo menej výrazný pokles obsahov pôdneho radónu.

Nejednoznačnou sa doposiaľ javí závislosť medzi zvýšením úrovne OAR v pôdnom vzduchu v sezónach s vysokými zrážkovými priemermi, ktorá bude vyžadovať dlhodobejšie sledovanie.

Sezónne variácie OAR v pôdnom vzduchu závisia nielen od vlhkosti (plynopriepustnosti) miestnych zemín a hornín, ale v nezanedbateľnom rozsahu aj od samotnej geologickej stavby a litologickej charakteristiky konkrétnej lokality. Z toho vyplýva, že aj pri rovnakých meteorologických podmienkach, ale v rôznom geologickom prostredí, nemusí byť charakter variácií zhodný. Tento poznatok je jedným z významných zistení pri sledovaní variácií OAR v pôdnom vzduchu v rámci predmetného projektu.

Príkladom toho sú výsledky monitoringu OAR v pôdnom vzduchu na objektoch v Novoveskej Hute (homogénne permské sedimenty strednej plynopriepustnosti) a RP Teplička (paleogénne sedimenty so strednou až nízkou plynopriepustnosťou, so zvýšeným podielom ílovitej frakcie). Lokality sú relatívne blízko seba (cca 5 km), približne v rovnakej klimatickej oblasti, ale s odlišným geologickým profilom, v ktorom je akumulácia a šírenie radónu sledované.

Obe tieto lokality boli v sezóne 2019 monitorované v ten istý deň (t.j. v zrovnateľných meteorologických podmienkach), ale výsledky meraní OAR v pôdnom vzduchu vykazujú odlišný priebeh. Dlhodobo sledovaný charakter variačných závislostí je tu však pozorovateľný aj v uplynulej sezóne. Sú však pomerne výrazne skreslené variabilitou atmosférických zrážok.

Po zhodnotení výsledkov monitorovania OAR v pôdnom vzduchu za uplynulé sezóny (tab. č. 6) môžeme konštatovať, že na:

- **RP Hnilec** po doterajšom maxime $OAR_{3,Q 2008} = 712 \text{ kBq.m}^{-3}$ obsahy radónu v pôdnom vzduchu do roku 2013 vykazovali veľmi výrazný a systematický pokles až na úroveň $OAR_{3,Q 2013} = 255 \text{ kBq.m}^{-3}$. V období 2016 a 2017 došlo k výraznému nárastu $OAR_{3,Q}$ na 407 kBq.m^{-3} (rok 2016) resp. 411 kBq.m^{-3} (rok 2017). V sezóne 2018 nastal výrazný pokles na 282 kBq.m^{-3} , ale v roku 2019 opäť nárast na 416 kBq.m^{-3} , čo je pomerne výrazne pod úrovňou dlhodobého priemeru ($OAR_{3,Q 2002-2019} = 451 \text{ kBq.m}^{-3}$).
- **RP Novoveská Huta / RP Novoveská Huta II.** Od maxima $OAR_{3,Q 2006} = 113 \text{ kBq.m}^{-3}$ došlo postupne k poklesu obsahov pôdneho radónu až na $OAR_{3,Q 2013} = 35 \text{ kBq.m}^{-3}$. V nasledujúcich troch rokoch obsahy pôdneho radónu vzrástli až na 88 kBq.m^{-3} , (rok 2016), ale v sezóne 2017 opäť poklesli na 68 kBq.m^{-3} . V sezóne 2018 opäť stúpili na 82 kBq.m^{-3} (RP Nov. Huta), resp. 113 kBq.m^{-3} (RP Nov. Huta II – iba dva monitoringy). V areáli **RP Novoveská Huta II** došlo v sezóne 2019 k nárastu $OAR_{3,Q 2019} = 122 \text{ kBq.m}^{-3}$, čo je najvyššia úroveň od roku 2002 v tejto oblasti.
- **RP Teplička** od maxima $OAR_{3,Q 2005} = 92 \text{ kBq.m}^{-3}$ (okrem mimoriadne daždivého roka 2010) pozorujeme pokles koncentrácií radónu v pôde až na $OAR_{3,Q 2013} = 35 \text{ kBq.m}^{-3}$. V sezónach 2014 až 2016 došlo k nárastu koncentrácií radónu v pôdnom vzduchu na 74 kBq.m^{-3} (2016), v roku 2017 ale poklesli na 70 kBq.m^{-3} . Ešte výraznejší pokles nastal v sezóne 2018 (47 kBq.m^{-3}), ale v roku 2019 na RP Nov. Huta II k nárastu na 72 kBq.m^{-3} , pri dlhodobom priemere $OAR_{3,Q 2002-2019} = 67 \text{ kBq.m}^{-3}$.
- **RP Bratislava – Vajnory** z úrovne $OAR_{3,Q 2005} = 67 \text{ kBq.m}^{-3}$ (okrem roka 2010) došlo postupne k poklesu iba na $OAR_{3,Q 2012} = 19 \text{ kBq.m}^{-3}$. V sezónach 2015 – 2018 boli úrovne OAR pomerne vyrovnané ($31 - 35 \text{ kBq.m}^{-3}$), ale v roku 2019 stúpili na 44 kBq.m^{-3} pri dlhodobom priemere $OAR_{3,Q 2005-2019} = 42 \text{ kBq.m}^{-3}$.
- **RP Banská Bystrica – Podlavice** z hodnoty $OAR_{3,Q 2005} = 118 \text{ kBq.m}^{-3}$ (s výnimkou sezóny 2010) došlo k poklesu až na $OAR_{3,Q 2012} = 24 \text{ kBq.m}^{-3}$. V nasledujúcich troch monitorovacích obdobiach boli koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu dosť stabilné a pohybovali sa v rozmedzí $56 - 59 \text{ kBq.m}^{-3}$. V sezóne 2016 hodnoty OAR výrazne stúpili až na 100 kBq.m^{-3} , ale v rokoch 2017 – 2018 poklesli na 65 kBq.m^{-3} (2017), resp. iba 48 kBq.m^{-3} (2018). V sezóne 2019 naopak výrazne narástli na 74 kBq.m^{-3} pri dlhodobom priemere $OAR_{3,Q 2005-2019} = 72 \text{ kBq.m}^{-3}$.
- hodnoty $OAR_{3,Q}$ v pôdnom vzduchu, zaznamenané v roku 2019, sú v porovnaní s

dlhodobým priemerom prevažne zvýšené a pohybujú sa v rozmedzí od 92 % (Hnilec) po 103 – 107 % (zvyšné štyri lokality).

Výsledky monitorovania OAR v pôdnom vzduchu dlhodobo dokumentujú variabilitu jeho obsahov v pripovrchových častiach horninového prostredia v priebehu roka, ale aj v období viacerých monitorovaných sezón. Potvrďuje sa pomerne významná závislosť úrovni OAR na meteorologických, resp. klimatických podmienkach, ale s nejednoznačným efektom na jednotlivých lokalitách, čo je zrejme aj dôsledkom ich odlišných štruktúrno-geologických a litologických charakteristík.

Merania OAR v pôdnom vzduchu nad tektonickou dislokáciou na lokalite **Dobrá Voda** jednoznačne potvrdzujú výskyt porušenej zóny, pozitívne ovplyvňujúcej transport radónu k povrchu z väčších hĺbok. Obsahy pôdneho radónu tu dosahujú anomálne hodnoty, rádovo prevyšujúce pozadie.

Po analýze výsledkov monitorovania OAR v podzemných vodách za uplynulé sezóny je možné konštatovať, že:

- **prameň Mária** (Malé Karpaty): priemerné obsahy radónu sa tu dlhodobo pohybujú v pomerne úzkom rozmedzí (variabilita $OAR_{2002-2019} = 27 - 40 \text{ Bq.l}^{-1}$), s dlhodobým priemerom 34 Bq.l^{-1} .
- **prameň Zbojnička** (Malé Karpaty) dosiahol priemernú ročnú úroveň $OAR_{2019} = 316 \text{ Bq.l}^{-1}$, stredné hodnoty $OAR_{2002-2019} = 178 - 327 \text{ Bq.l}^{-1}$, dlhodobý priemer za hodnotené obdobie dosiahol 267 Bq.l^{-1} .
- **prameň Himligárka** (Malé Karpaty): v uplynulej sezóne dosiahol priemernú ročnú úroveň $OAR_{2019} = 210 \text{ Bq.l}^{-1}$ (najvyššia hodnota od roku 2002), pri variabilite $OAR_{2002-2019} = 125 - 210 \text{ Bq.l}^{-1}$, dlhodobý priemer je na úrovni 172 Bq.l^{-1} .
- **prameň Boženy Němcovej** (Bacúch): v roku 2019 došlo k poklesu na 280 Bq.l^{-1} , priemerné ročné úrovne $OAR_{2002-2019}$ varírujú v pomerne širokom rozmedzí $222 - 344 \text{ Bq.l}^{-1}$, dlhodobý priemer $OAR_{2002-2019} = 278 \text{ Bq.l}^{-1}$.
- **prameň sv. Ondreja** (Spišské Podhradie): v roku 2019 tu dosiahla OAR úroveň 222 Bq.l^{-1} (najvyššia hodnota od sezóny 2002), variabilita $OAR_{2002-2019} = 137 - 222 \text{ Bq.l}^{-1}$, dlhodobý priemer 180 Bq.l^{-1} .
- **pramenisko Jašterčie** (Oravice): objekt vykazuje najvyššiu variabilitu OAR z monitorovaných zdrojov podzemných vôd (štandardná odchýlka $\sigma_{2006-2019} = 200 \text{ Bq.l}^{-1}$); dosahované sú tu najvyššie známe OAR v prírodných podzemných vodách, priemerné ročné úrovne $OAR_{2006-2019} = 536 - 1217 \text{ Bq.l}^{-1}$, dlhodobý priemer 1056

Bq.l⁻¹.

- na žiadnom z monitorovaných objektov nebola zistená korelačná závislosť medzi objemovou aktivitou radónu vo vode a výdatnosťou prameňa.
- obsahy radónu v podzemných vodách, zaznamenané v sezóne 2019, sú prevažne zvýšené a pohybujú sa v rozmedzí 75 % (Oravice), resp. 101 % (Bacúch) až 123 % (Sp. Podhradie) dlhodobého priemeru.

Variácie objemovej aktivity radónu v sledovaných zdrojoch podzemných vôd majú skôr sezónny charakter a v priebehu monitorovania počas viacerých sezón vykazujú určitú vlnovú, resp. „sinusoidálnu“ pravidelnosť (obr. č. 6 a 7). Na rozdiel od pôdneho radónu nie sú natoľko ovplyvňované náhodnými javmi resp. zmenami v atmosfére a nie sú tak „citlivé“ na rôzne krátkodobé zmeny počasia (teplota, atmosférický tlak). Maximálne úrovne OAR v podzemných vodách sú zaznamenávané spravidla v zime, resp. na jar a minimálne hodnoty v letných a jesenných mesiacoch.

Z praktického hľadiska majú doposiaľ získané poznatky nezanedbateľný význam, pretože poukazujú napr. na možnosť podhodnotenia, resp. nadhodnotenia radónového rizika stavebného pozemku pri meraniach realizovaných za nevhodných meteorologických podmienok (obdobia s nízkymi alebo vysokými zrážkovými úhrnmi, výrazné teplotné rozdiely medzi atmosférou a pokryvnými sedimentmi – hlavne skoro na jar, neskoro na jeseň, prípadne v zime). Nevyhnutným sa javí aj dôkladné posúdenie geologického prostredia (hlavne vo zvrstvených sedimentoch so zvýšeným / vysokým podielom ílovitej frakcie, prítomnosť tektonických dislokácií a pod.) pri vyhodnocovaní výsledkov týchto meraní.

Zhodnotenie výsledkov monitorovania OAR v geologickom prostredí z roku 2019, ale aj z predchádzajúcich sezón, dokumentujú skutočnosť, že zmeny (variácie) jeho koncentrácií sú jednak pravidelné (sezónne), ale aj náhodné (miestne, časové, ...). Postupne získavané a zhromažďované poznatky o variabilite obsahov radónu v horninovom prostredí a podzemných vodách, ich vyhodnotenie, spracovanie a sprístupnenie výsledkov monitoringu prostredníctvom sofistikovaných informačných systémov ŠGÚDŠ, sú jednoznačne prínosom pre možnosť objektívnejšieho hodnotenia radónového rizika z geologického prostredia.

Hodnovernejšie výsledky je možné získať zhodnotením dlhodobo realizovaných monitorovacích systémov, výstupy ktorých môžu dávať relevantné podklady pre prijímanie obecnějších záverov v danej oblasti. Tento zámer sleduje aj realizácia predmetného projektu.

5. LITERATÚRA

- Barnet, I., Kulajta, V., Neznal, M., Matolín, M., Prokop, P., 1992: Hodnocení základových pŕd z hlediska vnikání radonu do bytŕ, Geologický prŕzkum 4, str. 114-115
- Cabáneková, H., Nikodemová, D., 2013: Usmerňovanie ožiarenie obyvateľstva radónom v pobytových priestoroch, Slovenská zdravotnícka univerzita, Bratislava
- Čížek, P., Gluch, A., Smolárová, H., 2001: Atlas geofyzikálnych máp a profilov; textová príloha D 3 – prírodná rádioaktivita, Geofond Bratislava
- Smolárová, H., 2001: Monitoring objemovej aktivity radónu v geologickom prostredí na území SR, záverečná správa za obdobie 1993 – 2000, archív ŠGÚDŠ
- Smolárová, H., 2002: Monitorovanie radónu v geologickom prostredí. In: Geologické práce, správy 106, ŠGÚDŠ Bratislava, str. 139-145, archív ŠGÚDŠ
- Klukanová, A., Iglárová, L., Wagner, P., Hrašna, M., Cipciar, A., Frankovská, J., Mikita, S., Bajtoš, P., Smolárová, H., Gluch, A., Vlčko, J., Bodiš, D., Ondrášik, M., Ondrejka, P., Liščák, P., Pauditš, P., Petro, L., Dananaj, I., Hagara, R., Moczo, P., Labák, P., Kristeková, M., Ferianc, D., Vanko, J., Kováčiková, M., Záhorová, L., Matys, M., Gajdoš, V., Masarovičová, M., Slávik, I., Vybíral, V., Rapant, S., Greif, V., Brček, M., Kordík, J., Slaninka, I., 2011: Čiastkový monitorovací systém – geologické faktory, správa za obdobie 2002 – 2009, čiastková záverečná správa. MŽP SR, ŠGÚDŠ, Bratislava
- Vyhláška Ministerstva zdravotníctva SR č. 528/2007 o podrobnostiach a požiadavkách na obmedzenie ožiarenia z prírodného žiarenia, archív ŠGÚDŠ
- Zákon NR SR č. 355/2007 Z.z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia a o zmene a doplnení niektorých zákonov, archív ŠGÚDŠ