



**STANOVENIE KONCENTRÁCIE A DISTRIBÚCIE RÁDIOAKTÍVNEHO CÉZIA <sup>137</sup>Cs  
V POKRYVNÝCH ÚTVAROCH V OBLASTI VEĽKÝCH ÚĽAN, SLOVENSKO**

**DETERMINATION OF CONCENTRATION AND DISTRIBUTION OF RADIOACTIVE CESIUM  
<sup>137</sup>Cs IN EARTH COVERS IN VEĽKÉ ÚĽANY AREA, SLOVAKIA**

*Erik Andrásy<sup>1</sup>, Andrej Mojzeš<sup>1</sup>, Gabriela Wallová<sup>2</sup>*

**Abstrakt**

Cieľom výskumu je stanovenie a porovnanie plošnej aktivity umelého rádioaktívneho izotopu <sup>137</sup>Cs v pokryvných útvaroch v oblasti Veľkých Úľan na území Slovenska na základe terénnych a laboratórnych gamaspektrometrických meraní. Terénne gamaspektrometrické merania z roku 1995 poukázali na zvýšenú plošnú aktivitu rádioaktívneho izotopu <sup>137</sup>Cs, ktoré bolo pretransportované na skúmané územie v roku 1986 po jadrovej havárii Černobyľskej elektrárne V. I. Lenina na Ukrajine. Skúmaná lokalita na Podunajskej nížine vykazuje v priemere vyššiu plošnú aktivitu rádioaktívneho izotopu <sup>137</sup>Cs porovnaní s väčšinou miest Slovenskej republiky. Na základe doby polpremeny skúmaného izotopu (30.17 rokov) bol predpoklad, že namerané hodnoty budú v roku 2021 o 40 až 60% nižšie, čo by stále znamenalo, že aktivita rádioaktívneho izotopu <sup>137</sup>Cs je naďalej výrazná.

**Abstract**

The purpose of this research is to determine and compare the surface activity of an artificial radioactive isotope <sup>137</sup>Cs in the nearby area of Veľké Úľany, Jelka and Čierna Voda in Slovakia based on field and laboratory gamma spectrometric measurements. Field gamma spectrometric measurements from 1995 indicated elevated values of the surface activity of the radioactive isotope <sup>137</sup>Cs, which was transported to the studied area in 1986 after the nuclear accident of the V. I. Lenin Chernobyl Power Plant in Ukraine. The inspection location in the Danube Lowland distributes higher activities of the radioactive isotope <sup>137</sup>Cs compared to most places in the Slovakia. Based on the half-life of the studied isotope (30.17 years), it was assumed that the measured values would be in the year 2021 40 to 60 % lower. However, even with this reduction, the activity of the radioactive isotope <sup>137</sup>Cs would still remain significant.

## **Kľúčové slová**

Černobyl, cézium  $^{137}\text{Cs}$ , pôda, kontaminácia, gamaspektrometria

## **Keywords**

Chernobyl, cesium  $^{137}\text{Cs}$ , soil, contamination, gamma spectrometry

## **1. Úvod**

Gamaspektrometrické merania v roku 1995 v okrese Galanta, v blízkosti obcí Veľké Úľany, Jelka a Čierna Voda odhalili zvýšenú koncentráciu rádioaktívneho prvku  $^{137}\text{Cs}$  v tomto regióne (Gluch et al., 2005). Zvýšená koncentrácia rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$  je spôsobená prenosom tohto prvku vzdušnými prúdmi po havárii v jadrovej elektrárni V. I. Lenina v Černobyle v roku 1986 a v dôsledku atmosférických zrážok vznikla väčšia depozícia sa usadili väčšie koncentrácie rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$ .

Vplyv rádioaktívneho izotopu cézia  $^{137}\text{Cs}$  je stále prítomný v pôde, vodách a rastlinách. Doba polpremeny cézia  $^{137}\text{Cs}$  je 30.17 rokov (Lehotský & Stankoviansky, 1992). Z toho vyplýva, že už v menšej miere, ale rádioaktívny prvok na lokalite stále pretrváva a môže predstavovať potenciálnu objekt záujmu pre životné prostredie a zdravie ľudí. Preto je dôležité monitorovať a skúmať región s cieľom odhaliť vyššie koncentrácie.

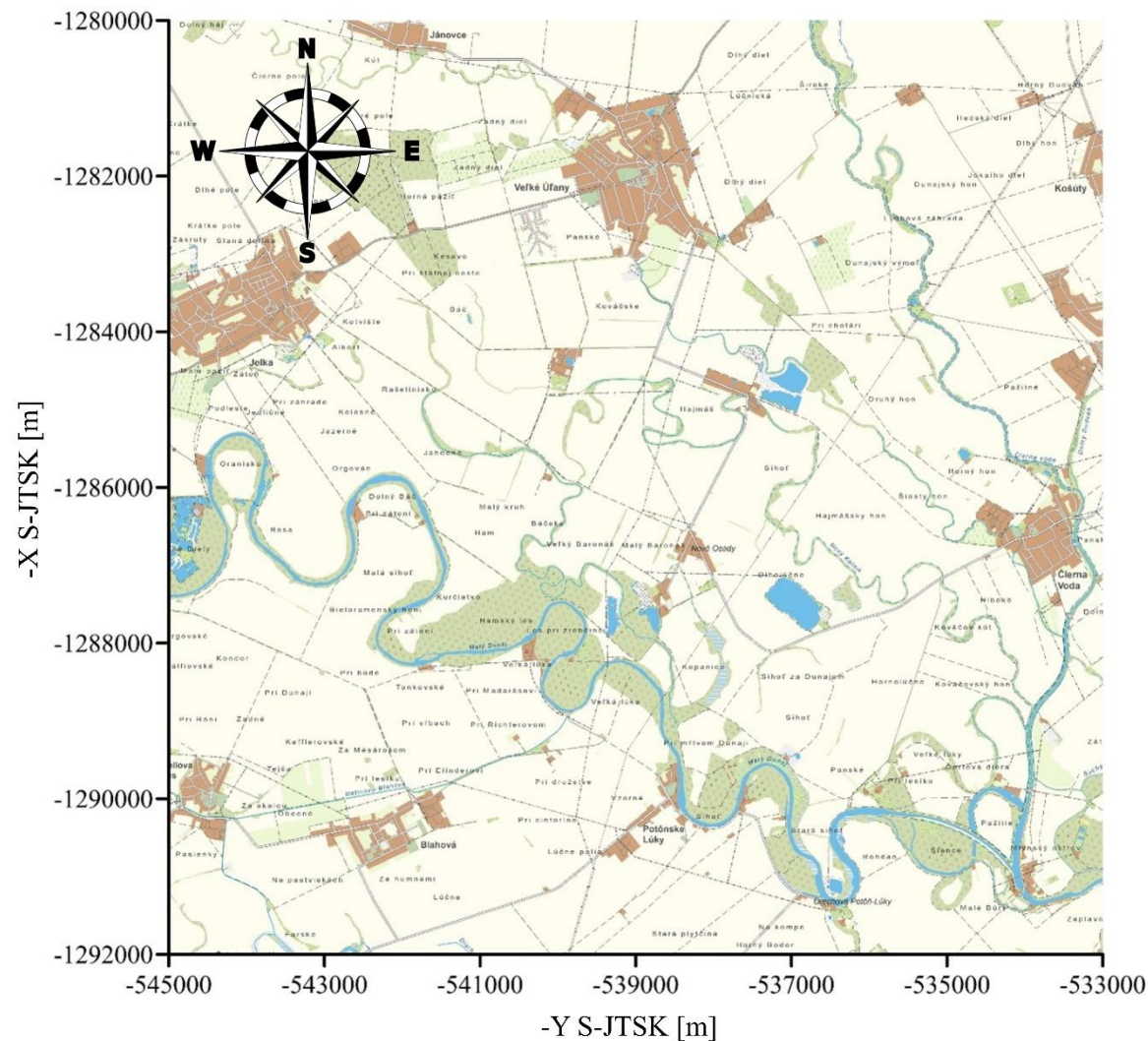
Pre určenie aktuálnej plošnej aktivity na povrchu pôdneho prostredia bol využívaný terénny gamaspektrometer PGIS-2, ktorý dokáže určiť koncentrácie prírodných rádioaktívnych izotopov draslík  $^{40}\text{K}$ , urán  $^{238}\text{U}$ , tórium  $^{232}\text{Th}$  a aktivitu umelého rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$ . Na polohách, kde bola začiatkom roka 2021 nameraná vyššia plošná aktivita rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$  boli v lete v roku 2021 odobrané vzorky pôd z viacerých hĺbkových úrovní a bola aplikovaná laboratórna gamaspektrometria v spolupráci s Výskumným ústavom vodného hospodárstva s oddelením rádiochémie. Toto oddelenie disponuje s gamaspektrometrickým meracím zariadením Canberra GC4018 v koaxiálnej geometrii. Tieto údaje poskytnú informácie o vertikálnej distribúcii  $^{137}\text{Cs}$ .

## **2. Oblasť štúdia a jej geomorfologická a geologická charakteristika**

Záujmová oblasť sa rozprestiera medzi obcami Veľké Úľany, Jelka a Čierna Voda v okrese Galanta v Trnavskom samosprávnom kraji na území Slovenskej republiky. Zo severu je ohraničená obcou Veľké Úľany, zo severozápadu obcou Jelka, zo západnej až juhozápadnej strany tvorí hranicu rieka Malý Dunaj, južná až juhovýchodná hranica je tvorená riekou Čierna Voda, ktorá preteká v bezprostrednej blízkosti obce Čierna Voda. Celková plocha sa rozprestiera na cca 58 km<sup>2</sup>. Obrázok 1 zobrazuje mapu skúmaného územia. Prevažná časť územia pozostáva z poľnohospodárskych pôd, lesov, štrkovísk a zastavaných plôch a obcí.

Na základe regionálneho geomorfologického členenia (Mazúr & Lukniš, 1978) patrí záujmové územie do oblasti Podunajskej nížiny, celku Podunajská rovina. Ráz tohto územia je rovinatý, reliéf vznikol pod vplyvom poklesového neotektonického vývoja a riekou Dunaj. V minulosti Dunaj nebol regulovaný do jedného hlavného koryta. Sústavne sa tu tvorila ramenná sústava a hlavné koryto bolo prenášané. Na území sa vyskytujú riečna niva, agradačné valy, meandre a mŕtve ramená. Nadmorská výška terénu sa pohybuje medzi 119 až 122 m. n. m. V malej miere sa tu vyskytuje aj reliéf vzniknutý previatím jemných nánosov – pieskové duny (eolické sedimenty) (Tomana et al., 2014).

V skúmanej oblasti sa vyskytujú najmladšie a plošne najrozšírenejšie fluviálne sedimenty, vystupujúce v podobe dolinných nív riek a potokov. Postglaciálne náplavy nivných sedimentov tvoria podstatnú časť jemnozrnného sedimentačného povrchového krytu piesčito-štrkového súvrstvia dnovej akumulácie riek, alebo len samostatnú výplň dno dolín v celom priečnom profile u všetkých potokov. Typickým znakom pre nivné sedimenty väčších tokov je výskyt karbonátov, ktoré sa nachádzajú hlavne vo forme mikrokonkrécií, nodúl a úlomkov. Sfarbenie sedimentov vrchného horizontu je najčastejšie sivé, tmavosivé a hnedosivé. U menších tokov sú sedimenty tvorené vrstvenými, ílovitými sivohnedými nevápnitými nivnými hlinami, alebo piesčitými hlinami i pieskami, v spodnej časti s obsahom valúnov, alebo úlomkov hornín. Celková hrúbka nivných sedimentov hlavných tokov nie je totožná, pohybuje sa od 1.5 do 4.5 m (Fordinál et al., 2012). Obrázok 2 znázorňuje geologickú stavbu územia spolu s legendou.



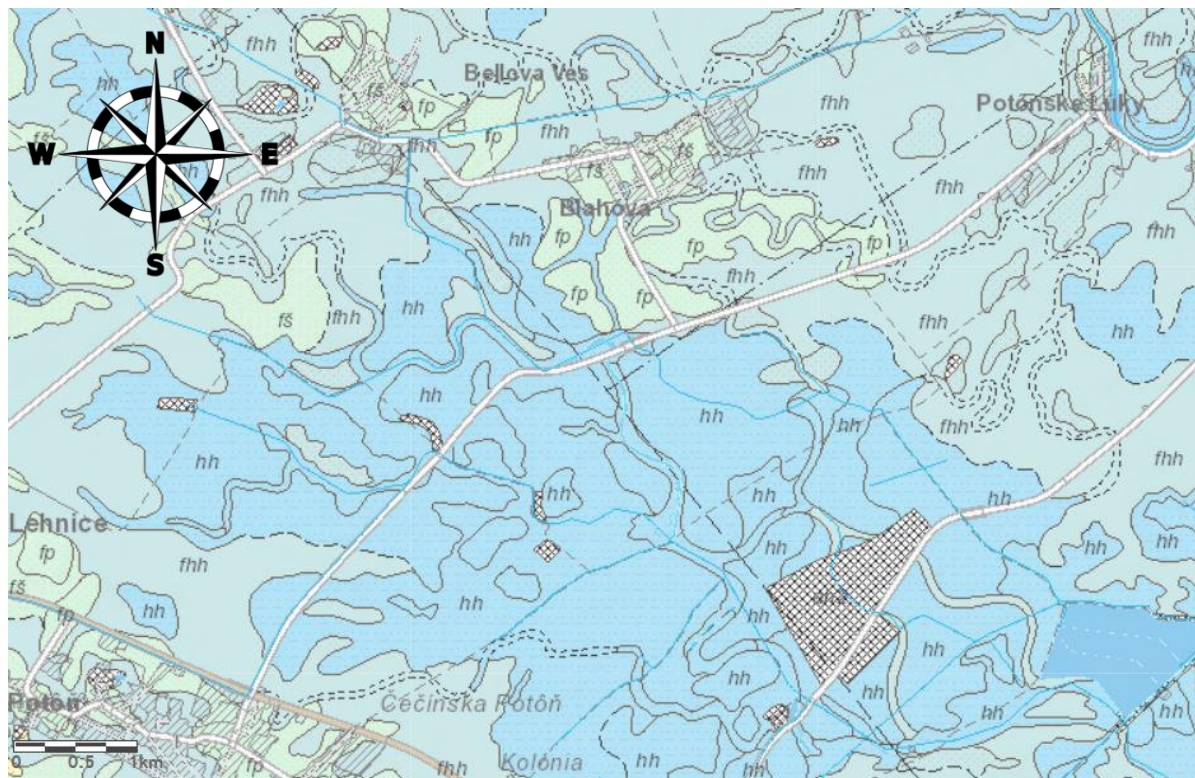
**Obr. 1** Mapa skúmaného územia (GKÚ Bratislava)

### 3. Gamaspektrometrická preskúmanosť

Na študovanej lokalite bolo realizovaných celkovo 54 gamaspektrometrických bodových meraní, ktoré popisujú stav kontaminácie územia umelým rádioaktívnym izotopom  $^{137}\text{Cs}$  v roku 1995. V tabuľke č. 1 je zoznam nameraných bodov na študovanom území. Obrázok 3 znázorňuje záujmové územie s anomálnymi hodnotami izotopu  $^{137}\text{Cs}$ . Mapa plošnej aktivity izotopu  $^{137}\text{Cs}$  je výsledným gridom hodnôt, ktoré boli namerané v roku 1995. Najvyššie hodnoty boli namerané pri obci Košúty (23 054 Bq.m<sup>-2</sup>), medzi Novými Osadami a Sedínom (8346 Bq.m<sup>-2</sup>) a južne od Sedínu (16 164 Bq.m<sup>-2</sup>). Na bode 4513H18, ktorý je situovaný v lese, medzi korytami Malého Dunaja bola taktiež nameraná vysoká hodnota (10 902 Bq.m<sup>-2</sup>). Anomálna plocha so zvýšenými hodnotami plošnej aktivity izotopu  $^{137}\text{Cs}$  je situovaná medzi riekami Čierna Voda (S – SV hranica polohy anomálie) a Malým Dunajom (J – JV hranica polohy anomálie). Samotný tvar anomálie je predĺžený v JZ-SV smerom, pričom sa zvýšené hodnoty aktivity izotopu  $^{137}\text{Cs}$  zachovávajú, jedine medzi obcou Košúty a riekou Čiernou Vodou nie sú namerané ďalšie anomálne koncentrácie.

### 4. Metodika terénnej a laboratórnej gamaspektrometrie

Gamaspektrometrické meranie sa zaraďuje do kategórie rádionuklidových metód, ktoré predstavujú skupinu metód využívaných najmä v geologickom výskume. Tieto metódy slúžia na meranie súvisiace s výskumom rádioaktívnych prvkov. Výsledky meraní získané pomocou terénneho gamaspektrometra sa najčastejšie udávajú v jednotkách vyjadrujúcich hmotnostnú koncentráciu rádioaktívnych prvkov v ppm (parts per million, 1 ppm = 1 g/t, čo je ekvivalent 10<sup>-4</sup> %), expozičný príkon (pA/kg), dávkový príkon (nGy/h) a príkon dávkového ekvivalentu (nSv/h).

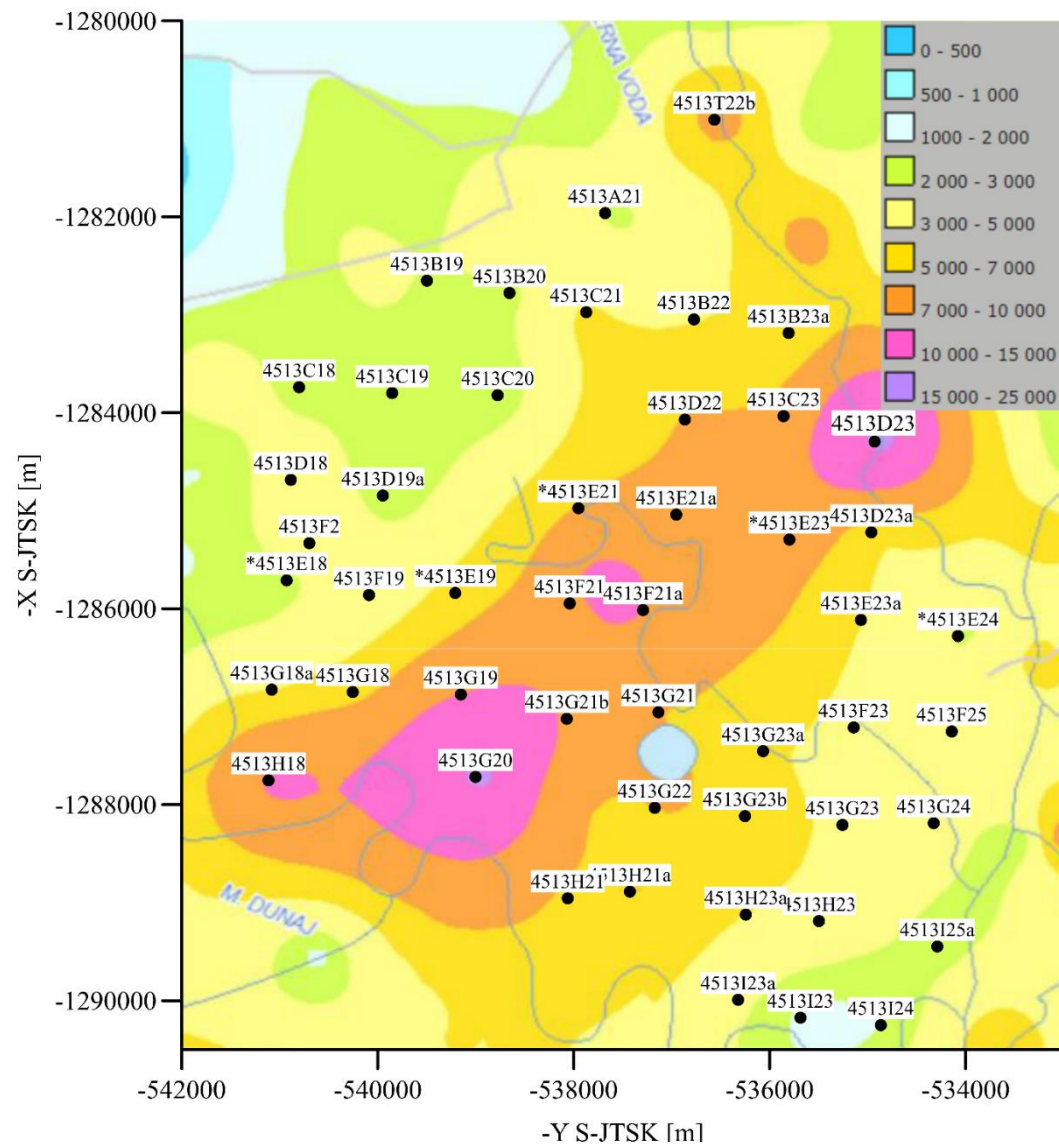


**Obr. 2 Geologická mapa skúmaného územia  
(Geologická mapa Slovenska M 1:50 000)**

*Vysvetlivky: fhh – najmladšie fluviálne sedimenty  
hh – piesčité hliny, hliny až íly  
fp – fluviálne a čiastočne až fluviálno-eolické vápnité piesky  
fs – štrkopiesčité fluviálne sedimenty*

**Tab. 1 Zoznam nameraných bodov a výsledky stanovaení  $^{137}\text{Cs}$  na skúmanom území v roku 1995 (Gluch et al., 2005)**

Názov bodu	-Y S-JTSK [m]	-X S-JTSK [m]	Plošná aktivita $^{137}\text{Cs}$ [Bq/m <sup>2</sup> ]
4513A21a	-1282059	-536885	3 107
4513A21	-1281962	-537679	2 855
4513C21	-1282974	-537871	5 778
4513B23a	-1283186	-535807	5 205
4513C23	-1284035	-535858	7 624
4513D23	-1284295	-534928	16 875
4513E21a	-1285040	-536953	7 406
4513E21	-1284975	-537951	7 119
4513F21	-1285946	-538039	8 346
4513G21b	-1287123	-538070	9 595
4513G19	-1286875	-539152	9 939
4513E19	-1285840	-539209	5 778
4513F19	-1285861	-540090	3 474
4513F2	-1285330	-540698	4 957
4513E18	-1285710	-540930	2 728
4513G18a	-1286826	-541081	4 758
4513H18	-1287752	-541114	10 902
4513G20	-1287717	-539002	16 164
4513G18	-1286850	-540255	6 191
4513T22b	-1281009	-536564	1 422
4513I24	-1290249	-534864	2 018
4513I23	-1290175	-535685	1 525
4513I23a	-1289992	-536321	3 256
4513I25a	-1289448	-534289	2 591



**Obr. 3 Plošné zobrazenie nameraných gamaspektrometrických bodov v roku 1995 (Gluch et al., 2005)**

Farebná škála v pravom hornom rohu mapy popisuje plošnú aktivitu umelého rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$  v jednotkách Bq/m<sup>2</sup>.

Názov bodu	-Y S-JTSK [m]	-X S-JTSK [m]	Plošná aktivita <sup>137</sup> Cs [Bq/m <sup>2</sup> ]
4513H23	-1289188	-535496	4 494
4513H23a	-1289121	-536243	4 964
4513H21a	-1288888	-537427	7 199
4513H21	-1288956	-538060	6 489
4513G24	-1288189	-534326	3 840
4513F25	-1287252	-534141	3 485
4513G23	-1288206	-535256	4 861
4513G23b	-1288116	-536252	5 468
4513F23	-1287212	-535141	4 425
4513E23	-1285295	-535797	8 380
4513F21a	-1286014	-537292	9 974
4513G22	-1288033	-537173	8 082
4513E24	-1286279	-534078	2 740
4513D22	-1284069	-536865	7 142
4513G23a	-1287455	-536067	5 124
4513G21	-1287057	-537136	6 936
4513E23a	-1286114	-535067	4 930
4513D23a	-1285220	-534961	5 273
4513B22	-1283048	-536773	4 872
4513B20	-1282778	-538656	2 797
4513C20	-1283821	-538776	2 144
4513B19	-1282651	-539499	2 923
4513C18	-1283739	-540802	2 683
4513C19	-1283799	-539853	2 992
4513D18	-1284685	-540887	3 741
4513D19a	-1284845	-539948	2 224

Pri stanovaní prítomnosti rádioaktívneho cézia na zemskom povrchu sa používa jednotka plošnej aktivity Bq/m<sup>2</sup>, ktorá vyjadruje počet premien rádionuklidu na ploche 1 m<sup>2</sup> za sekundu (Andrássy, 2022).

### Terénny gamaspektrometer PGIS-2

Povrchové terénne merania boli realizované pomocou prenosného gamaspektrometra PGIS-2 (výrobca PicoEnvirotec, Ltd, Kanada). Tento prístroj využíva pokročilé mikroprocesorové a mobilné technológie a namerané hodnoty sú ukladané do pamäte pridruženého smartfónu Samsung Galaxy S III. Prístroj je zložený z riadiacej jednotky, detektorovej jednotky a GPS zariadenia. Gamaspektrometer PGIS-2 môže byť pripojený ku smartfónu, tabletu alebo notebooku prostredníctvom bluetooth zariadenia, ktoré obsahuje príslušný softvér pre tento prístroj. Gamaspektrometer je vybavený scintilačným detektorom s kryštálom jodidu sodného aktivovaného táliom NaI(Tl), pričom samotný kryštál má objem 0.347 l. Systém a používateľské rozhranie sú založené na operačnom systéme Android od firmy Google Inc. Namerané údaje sa automaticky synchronizujú s polohou GPS a časom, tablet alebo mobilný telefón vybavený s operačným systémom Android dokáže zobrazovať namerané dáta priamo v teréne počas merania.

Zámerom terénnych geofyzikálnych výskumov je meranie gama žiarenia emitovaného hlavne z troch prírodných rádioaktívnych prvkov – draslíka, uránu a tória a umelého rádioaktívneho prvku – cézia. Násobná tvorba elektrónov vznikajúcich pri interakcii gama žiarenia so scintilačným kryštálom umožňuje zmeranie gama žiarenia a na základe veľkosti energie gama kvanta dokáže priradiť ku prvku, od ktorého gama kvantum pochádza. V detektore sa premieňa gama žiarenie na elektrické impulzy. Gama žiarenie pri prechode hmotou v dôsledku Comptonovho rozptylu vytvára spojité spektrum energie žiarenia, na ktorom sa superponujú píky primárneho žiarenia zdroje rádionuklidov, podľa ktorých sú zdroje rádionuklidov identifikovateľné (Čangel, 2019).

Kalibrácia terénneho gamaspektrometra PGIS-2 bola realizovaná výrobcom dňa 1. októbra 2015. Z opakovaných meraní v roku 2021 bola zistená presnosť stanovenia plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  na úrovni 9 %.

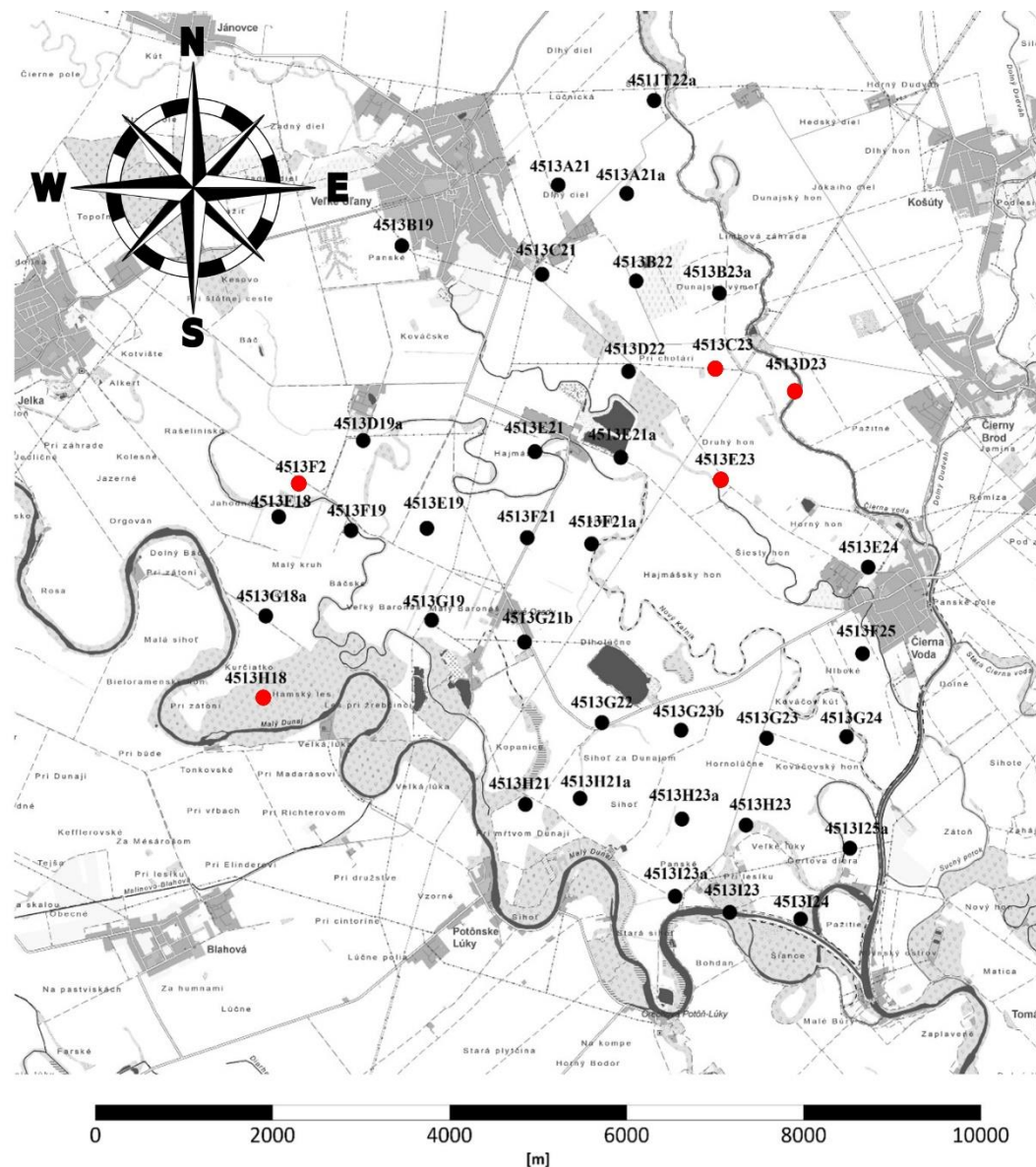
### Zber gamaspektrometrických dát v teréne

Prístroj PGIS-2 je schopný zberať dáta dvojakým spôsobom, a to kontinuálne a bodovo. Pri kontinuálnom zbere dát sú operátor a prístroj neustále v pohybe, pričom pri bodovom meraní sa meria na mieste bez zmeny polohy. Gamaspektrometer PGIS-2 disponuje schopnosťou vykonať jedno meranie za každú sekundu. Na jednotlivých bodoch bolo realizovaných celkovo 300 meraní v priebehu 300 sekúnd (5 minút). Následne sa z týchto hodnôt vypočítal aritmetický priemer.

Dňa 11. marca 2021 prebehlo meranie na 18 bodoch, následne dňa 3. augusta 2021 sa meranie realizovalo na 12 bodoch a 2. septembra sa meranie vykonalo na 8 bodoch. Celkový počet nameraných bodov bolo 38. Tieto body sú popísané v tabuľke 2 a interpretované v nasledujúcej kapitole. Polohy bodov sa stanovili podľa zadaných súradníc v mapovej aplikácii Geologického ústavu Dionýza Štúra v Bratislave (Gluch et al., 2005) a sú zobrazené na obrázku č. 4. Súradnice novo zmeraných bodov sa zhodujú vo veľkej miere so súradnicami bodov zmeraných v roku 1995.

### Metodika laboratórnych gamaspektrometrických meraní

Informácie o laboratórnom prístrojovom vybavení boli poskytnuté pracoviskom Výskumného ústavu vodného hospodárstva (VÚVH), oddelením rádiochémie. Samotné laboratórne gamaspektrometrické merania boli realizované na



**Obr. 4** Mapa znázorňujúca polohy bodov gamaspektrometrických meraní 2021 (GKÚ Bratislava, upravené)

Vysvetlivky:

čierne body – in situ meranie plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  bez odoberania pôdnych vzoriek  
 červené body – meranie plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  na odobratých pôdnych vzorkách



***Obr. 5 Vykopaná sonda na odber pôdnych vzoriek (foto: autor)***

Vzorky boli odoberané na základe nameraných vyšších hodnôt koncentrácie rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$  in situ gamaspektrometrickou metódou zo dňa 11.03.2021. Ako kontrolný bod bol určený bod 4513F2, kde sa namerali nízke hodnoty koncentrácie rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$  na povrchu.

Pri odbere vzoriek bola prvá fáza vykopanie a vyčistenie jamy o potrebnej hĺbke, napríklad pri odoberaní z hĺbok 20 až 40 cm bola vykopaná jama o hĺbke 40 cm zobrazená na obrázku 5, dôkladne bola vyčistená a zo stien jamy boli odškrabávané vzorky pôd, ktoré boli vyberané lopatkou a následne boli vkladané do špeciálnych sáčkov (obr. 6), každý sáčok sa označil, popísala sa hĺbka odberu vzorky, poloha a čas.

základe spolupráce s týmto výskumným ústavom, pričom odbery vzoriek pôd boli realizované autormi tohto článku z PRIF UK a ich laboratórne gamaspektrometrické analýzy realizovalo Oddelenie rádiochemie VUVH.

Laboratórne gamaspektrometrické meranie sa realizuje gamaspektrometrickým meracím systémom Canberra GC4018 v koaxiálnej geometrii, ktorý je na Oddelení rádiochemie Výskumného ústavu vodného hospodárstva v prevádzke od roku 2018. Prístroj je metrologicky zaradený ako určené meradlo. Metrologické overenie prístroja zabezpečuje Slovenský metrologický ústav (SMÚ).

Energetickú a účinnostnú kalibráciu prístroja vykonávajú v pravidelných intervaloch pracovníci Oddelenia rádiochemie s použitím certifikovaných referenčných materiálov.

### **Odber a príprava pôdnych vzoriek**

Dňa 02.09.2021 boli odoberané vzorky pôd z bodov 4513H18, 4513C23, 4513F2 a 4513D23. Vzorka 4513H18 bola odoberaná z troch hĺbkových úrovní, 0 až 15 cm, 15 až 30 cm a 30 až 45 cm. Bod je situovaný v lese bez antropogénneho zásahu, z toho dôvodu je povrchová informácia užitočná. Vzorky pôd z bodov 4513C23, 4513F2, 4513D23 boli odoberané z hĺbok 20 až 40 cm a 40 až 60 cm. Tieto body sú lokalizované na aktívnej ornej pôde. Dňa 09.09.2021 sa vzorka pôdy odoberala z bodu 4513E23 z hĺbok 20 až 40 cm a 40 až 60 cm. Polohy bodov, na ktorých sa odoberali vzorky pôdy sú znázornené na obrázku 4 červenou farbou.



***Obr. 6 Odobraté a uložené vzorky pôd v teréne (foto: autor)***





**Obr. 7 Vzorka pripravená na sušenie (foto: autor)**

drvenie. Samotné drvenie bolo realizované pomocou kladiva a sáčku. Vysušená zemina bola vložená do sáčku a následne drvená kladivom. Cieľom pri drvení je, aby nadržovaná zemina dokázala prepadnúť cez kuchynské sitko s, ktoré má približne 20 očiek na  $\text{cm}^2$  (výsledná frakcia po úprave vzorky je 0.2 mm). Táto zrnitosť je pre laboratórne gamaspektrometrické meranie dostatočujúca. Na obrázku 8 je znázornený rozdiel v štruktúre zeminy pred a po preosievaní.



**Obr. 8 Vzorka pôdy pred a po preosievaní. Na pravej strane je znázornená vzorka pred preosievaním a na ľavej strane je znázornená vzorka po preosievaní (foto: autor)**

Pri spracovávaní pôdnych vzoriek je nutné zachovať správny postup. Najdôležitejším krokom je sušenie. Vzorky boli sušené približne mesiac, kým vizuálne neboli suché. Na obrázku 7 je znázornená nádoba s nespracovanou pôdou, ktorá je pripravená na sušenie.

Po sušení je ďalším krokom



**Obr. 9 Hermetické uzavretie vzorky pôdy (foto: autor)**

Záverečným krokom je hermetické uzavretie pôdnej vzorky v špeciálnej vzorkovnici (obr. 9). Po uzavretí je potrebné vzorku nechať najmenej jeden mesiac stáť aby vznikla vo vnútri vzorkovnici rádioaktívna rovnováha medzi záujmovými rádionuklidmi rozpadových radov U a Th.

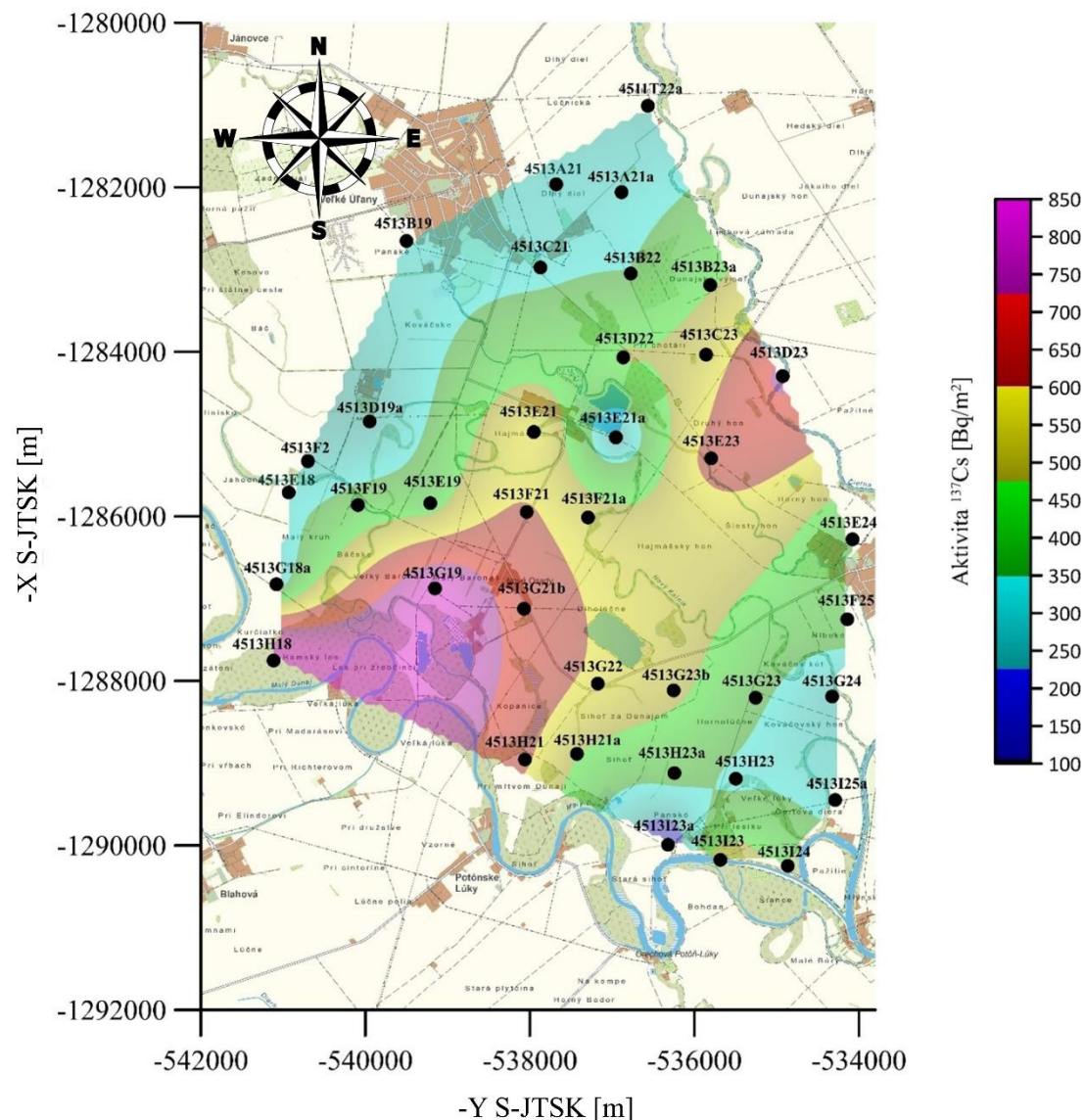
## 5. Výsledky meraní v roku 2021

Výber bodov pre realizáciu merania povrchovej gamaspektrometrie bol založený na systematickom vyhodnotení zvýšených hodnôt z roku 1995. Táto metodika umožnila získať komplexný a dôkladný pohľad na zvýšenú plošnú aktivitu izotopu  $^{137}\text{Cs}$  na skúmanej lokalite v roku 2021.

Bod 4513H18, situovaný v lesnom prostredí bez prítomnosti antropogénnej činnosti disponuje najvyššou nameranou hodnotou aktivity  $^{137}\text{Cs}$ . Na základe vysokej aktivity a faktu, že lesné prostredie je bez ľudského zásahu sa vzorky pôdy brali z troch hĺbkových úrovní, konkrétne z 0-15, 15-30 a 30-45 cm. Tieto vzorky nám umožňujú analyzovať zloženie a distribúciu rádioaktívnych prvkov v pôde v rôznych hĺbkových úrovniach.

Ďalšie štyri body, z ktorých boli odobrané vzorky pôdy sú situované na aktívnej ornej pôde. Z bodov 4513C23, 4513F2, 4513D23 a 4513E23 boli vzorky odoberané z väčších hĺbok, konkrétne z 20-40 a 40-60 cm. Tieto hĺbky umožňujú študovať vplyv ľudských aktivít a pôdnej úpravy na rozloženie umelého rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$  v pôde.

Plošná distribúcia izotopu  $^{137}\text{Cs}$  je znázornená na obrázku č. 10 a konkrétne hodnoty v tabuľke č. 2. V tabuľke č. 3 sú popísané výsledky z laboratórnej gamaspektrometrie.



Obr. 10 Mapa distribúcie plošnej aktivity rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$  z meraní 2021

Výsledky laboratórnej gamaspektrometrie vykazujú obmedzenú schopnosť stanovenia vertikálnej distribúcie umelého rádioaktívneho prvku  $^{137}\text{Cs}$  vo voľnej prírode v oblastiach tvorených pôdou, teda sypkým materiálom. Zistené výsledky naznačujú (tab. 3), že prevažná väčšina  $^{137}\text{Cs}$  zostáva v prvom horizonte pôdy a nevykazujú významné premiestňovanie do hlbších vrstiev či podzemných vôd.

## 6. Diskusia

Štyri body (4513E21a, 4513I23, 4513G21b a 4513F19) sú ovplyvnené aktívnou antropogénnou činnosťou a z toho dôvodu nie je relevantné ich porovnanie s nameranými hodnotami z roku 1995.

Tri body nevykazujú žiadne povrchové znaky po zásahu antropogénnej činnosti. Bod 4513H18 je situovaný v lese neďaleko hlavného toku rieky Malý Dunaj (Obr. 4). Na tomto bode sa namerala najvyššia plošná aktivita rádioaktívneho cézia spomedzi všetkých bodov, a to  $1025 \text{ Bq/m}^2$  (tab. 2). Povrchový pozostatok v porovnaní s aktivitou rádioaktívneho cézia nameranou v roku 1995 je 9% (Tab. 2). Body 4513I23 a 4513I24 sa nachádzajú v bezprostrednej blízkosti, pričom prostredie, v ktorom sa body vyskytujú je rozdielne. Bod 4513I24 je

**Tab. 2** Tabuľka nameraných hodnôt plošnej aktivity rádioaktívneho cézia v rokoch 1995 a 1998, (Gluch et al., 2005) a v roku 2021

Názov bodu	Dátum prvého merania (dd.mm.rrrr)	Dátum druhého merania (dd.mm.rrrr)	Prvé meranie aktivity $^{137}\text{Cs}$ [Bq/m <sup>2</sup> ]	Druhé meranie aktivity $^{137}\text{Cs}$ [Bq/m <sup>2</sup> ]	Percento pretrvávajúcej aktivity
4511T22a	04.10.1995	11.03.2021	8587	247	2 %
4513A21a	04.10.1995	11.03.2021	3107	315	10 %
4513A21	04.10.1995	11.03.2021	2855	293	10 %
4513C21	04.10.1995	11.03.2021	5778	212	3 %
4513B23a	04.10.1995	11.03.2021	5205	465	9 %
4513C23	04.10.1995	11.03.2021	7624	529	7 %
4513D23	04.10.1995	11.03.2021	16875	756	4 %
4513E21a	18.09.1995	11.03.2021	7406	226	3 %
4513E21	18.09.1995	11.03.2021	7119	602	8 %
4513F21	18.09.1995	11.03.2021	8346	615	7 %
4513G21b	18.09.1995	11.03.2021	9595	664	7 %
4513G19	04.10.1995	11.03.2021	9939	855	8 %
4513E19	04.10.1995	11.03.2021	5778	421	7 %
4513F19	07.10.1995	11.03.2021	3474	407	12 %
4513F2	13.09.1998	11.03.2021	4957	264	5 %
4513E18	07.10.1995	11.03.2021	2728	328	12 %
4513G18a	07.10.1995	11.03.2021	4758	293	6 %
4513H18	07.10.1995	11.03.2021	10902	1025	9 %
4513D22	04.10.1995	03.08.2021	7142	488	7 %
4513E23	18.09.1995	03.08.2021	8380	655	8 %
4513E24	17.09.1995	03.08.2021	2740	355	13 %

situovaný na kraji lesa a bod 4513I23 sa vyskytuje na nábřeží rieky Malý Dunaj. Celková aktivita rádioaktívneho cézia nie je vysoká, ale percentuálny pozostatok pôvodnej aktivity je najvyššia na bode 4513I24 21% a na bode 4513I23 až 37% (tab. 2).

Ostatné body sú situované na ornej pôde (obr. 4), pričom sa horná vrstva pôdy pravidelne preorieva približne do hĺbky 30 cm, čím sa skúmaný rádioizotop  $^{137}\text{Cs}$  nárazovo dostane do väčších hĺbok. Nárazový vertikálny transport je potvrdený aj vykonanými laboratórnymi skúškami (tabuľka 3). Na niektorých miestach je pravidelne sadená slnečnica, ktorá má schopnosť z pôdy absorbovať rádioaktívne izotopy  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  (Amano, 2021). Vzhľadom na väčší počet bodov je percentuálny zostatok aktivity rádioaktívneho cézia porovnateľný, a to 4 až 12% (tab. 2). Ojedinele na dvoch bodoch je menší pozostatok, a to na bode 4511T22a a 4513C21. Napriek nižším nameraným hodnotám je tvar anomálie vo veľkej miere zachovaný (obr. 3 a 10). Samotný tvar anomálie je zobrazený na obrázku 3, v ktorom je čitateľný tvar anomálie zvýšených hodnôt. Na bodoch, ktoré disponujú nižšími hodnotami plošnej aktivity rádioaktívneho cézia bol preukázaný celkovo nižší úbytok aktivity rádioaktívneho cézia.

Umelý rádioizotop  $^{137}\text{Cs}$  je pri kontakte so zemským povrchom absorbovaný jemnými ílovitými časticami pôdy do takmer ireverzibilnej formy. Jeho imobilita v pôde závisí od obsahu ílovitých častíc a od ich typu, ďalej od obsahu humusu, karbonátov a pH pôdy.

Názov bodu	Dátum prvého merania (dd.mm.rrrr)	Dátum druhého merania (dd.mm.rrrr)	Prvé meranie aktivity $^{137}\text{Cs}$ [Bq/m <sup>2</sup> ]	Druhé meranie aktivity $^{137}\text{Cs}$ [Bq/m <sup>2</sup> ]	Percento pretrvávajúcej aktivity
4513F25	17.09.1995	03.08.2021	3485	402	11 %
4513G24	18.09.1995	03.08.2021	3840	258	6 %
4513G23	18.09.1995	03.08.2021	4861	371	7 %
4513H23	18.09.1995	03.08.2021	4494	332	7 %
4513I25a	18.09.1995	03.08.2021	2591	313	12 %
4513I24	18.09.1995	03.08.2021	2018	437	21 %
4513I23	18.09.1995	03.08.2021	1525	564	37 %
4513I23a	18.09.1995	03.08.2021	3256	107	3 %
4513F21a	18.09.1995	03.08.2021	9947	531	5 %
4513G22	18.09.1995	09.09.2021	8082	575	7 %
4513H21a	18.09.1995	09.09.2021	7199	475	6 %
4513H21	18.09.1995	09.09.2021	6489	622	9 %
4513H23a	18.09.1995	09.09.2021	4964	393	8 %
4513G23b	18.09.1995	09.09.2021	5468	503	9 %
4513B22	04.10.1995	09.09.2021	4872	352	7 %
4513D19a	07.10.1995	09.09.2021	2224	228	10 %
4513B19	07.10.1995	09.09.2021	2923	312	10 %

*Vysvetlivky: Tmavosivá výplň buniek znázorňuje body bez antropogénnej činnosti, bledosivá výplň buniek znázorňuje body s veľkou antropogénnou činnosťou a bunky bez výplne znázorňujú body ležiace na ornej pôde.*

Najviac imobilným sa stáva v pôdach s nízkym obsahom organických látok pri pH 4-7 s dominanciou sľudových ílových minerálov. Na neerodovaných miestach je prevažná časť  $^{137}\text{Cs}$  koncentrovaná v hĺbkach približne 5 až 10 cm (Lehotský & Stankoviansky, 1992). Táto vlastnosť je podložená aj výsledkami laboratórnej gamaspektrometrie z bodu 4513H18 (tab. 3). Jeho koncentrácia smerom do hĺbky pôdy klesá exponenciálne takmer bez translokácie fyzikálno – chemickými procesmi (Lehotský & Stankoviansky, 1992). Chemická stavba pôdy má výrazný vplyv na migráciu rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$  v pôde. Skúmaný rádioaktívny izotop je silno fixovaný pôdami, z toho dôvodu aj rýchlosť pohybu rádiocézia je nízka. Dôležitý význam zohrávajú agrochemické vlastnosti pôd (Čipáková, 2000).

V rámci porovnávania štyroch vzoriek odobraných z ornej pôdy a bodu nachádzajúceho sa v lesnom prostredí sa preukázalo, že antropogénna činnosť značne ovplyvňuje vertikálnu distribúciu rádioaktívneho prvku  $^{137}\text{Cs}$  v pôdach, najmä v dôsledku každoročnej orby, pri ktorej dochádza k intenzívnemu premiešavaniu pôdy v krátkom časovom úseku. Na polohe bodu 4513H18, kde nedochádza k takémuto premiešavaniu, sa prvok  $^{137}\text{Cs}$  dokáže udržať v hornej vrstve, čo sa značne líši od vzoriek odobraných z ornej pôdy. Z laboratórnych výsledkov z bodu 4513H18 tiež vyplýva, že zrážková činnosť nedokáže pretransportovať umelý rádioizotop  $^{137}\text{Cs}$  do väčších hĺbok, ako je 15 cm za obdobie 35 rokov.

## 7. Záver

Povrchové gamaspektrometrické merania v roku 2021 poukázali na značný úbytok plošnej aktivity rádioaktívneho izotopu  $^{137}\text{Cs}$ , ktorý ale nezodpovedá času doby polpremeny. Doba polpremeny skúmaného rádioizotopu je 30.17 rokov (Lehotský & Stankoviansky, 1992). Teda, v roku 2025 by mala byť

**Tab. 3 Výsledné merné aktivity stanovených rádionuklidov [ $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] s príslušnými rozšírenými neistotami [%]**

vzorka	$^{40}\text{K}$ [ $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \pm \%$ ]	$^{137}\text{Cs}$ [ $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \pm \%$ ]	$^{238}\text{U}$ [ $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \pm \%$ ]	$^{232}\text{Th}$ [ $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \pm \%$ ]
4513H18 h= 0-15 cm	646 ± 5	72 ± 4	36 ± 6	46 ± 7
4513H18 h= 15-30 cm	642 ± 4	< 1	39 ± 4	51 ± 6
4513H18 h= 30-45 cm	628 ± 5	< 1	39 ± 5	6 ± 13
4513C23 h= 20-40 cm	399 ± 4	26 ± 2	20 ± 3	48 ± 4
4513C23 h= 40-60 cm	342 ± 4	2 ± 20	14 ± 5	20 ± 7
4513F2 h= 20-40 cm	472 ± 3	10 ± 3	34 ± 2	97 ± 4
4513F2 h= 40-60 cm	418 ± 3	2 ± 3	33 ± 2	236 ± 3
4513E23 h= 20-40 cm	504 ± 3	55 ± 2	28 ± 2	96 ± 4
4513E23 h= 40-60 cm	521 ± 3	25 ± 2	30 ± 2	151 ± 4
4513D23 h= 20-40 cm	510 ± 3	54 ± 2	32 ± 2	85 ± 4
4513D23 h= 40-60 cm	445 ± 3	6 ± 4	30 ± 2	81 ± 4

polovica z pôvodného množstva rádionuklidov oproti roku 1995. Príčinou zvýšeného úbytku rádioaktívneho cézia  $^{137}\text{Cs}$  na skúmanej lokalite spôsobuje vegetácia, ktorá dokáže absorbovať skúmaný rádioizotop cez koreňové systémy (Koranda & Robison, 1978; Zhu & Smolders, 2000; Amano, 2021; Soudek et al, 2006), to zapríčiňuje zrýchlený úbytok aktivity rádioaktívneho cézia  $^{137}\text{Cs}$ .

Percentuálny úbytok skúmaného rádioizotopu na orných pôdach je od 90 do 98%. Veľkému úbytku prispieva hlavne sadenie nových obilnín, pričom dochádza ku absorbovaniu umelého rádioizotopu do rastlinných tiel. V menšej miere tomu prispieva každoročná orba, pričom dochádza ku premiešavaniu pôdy. Tento proces ale nedokáže eliminovať skúmaný rádioizotop z lokality, iba ho pretransportuje do väčšej hĺbky. V lesnom prostredí na bode 4513I24 je percentuálny úbytok rádioizotopu  $^{137}\text{Cs}$  najmenší v rámci celej lokality, a to 63%. Bod 4513H18 disponuje s najvyššou nameranou plošnou aktivitou  $^{137}\text{Cs}$  ale percentuálny úbytok je vysoký, 91%. Ku úbytku plošnej aktivity tiež prispieva výskyt vegetácie.

Výsledky laboratórnej gamaspektrometrie poukazujú na výskyt vertikálnej migrácie skúmaného rádioizotopu  $^{137}\text{Cs}$  na orných pôdach, na ktorých dochádza ku pravidelnému premiešavaniu zeminy. Naopak, v lesnom prostredí ku vertikálnej migrácii skúmaného rádioizotopu  $^{137}\text{Cs}$  nedošlo. Napriek tomu je percentuálna zhoda úbytku plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  totožná medzi dvoma prostrediami. V prípade, ak by orná pôda nebola pravidelne premiešavaná, tak by povrchová plošná aktivita bola prítomná vo väčšej miere.

Výsledná mapa plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  vytvorená z meraní z roku 2021 sa vo veľkej miere zhoduje s pôvodnou mapou plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z výsledkov z roku 1995. Najväčší rozdiel medzi dvoma mapami izolínií je na polohe bodu 4513E21a, na ktorom je nanosený nový materiál vo výške približne 3 m nad terénom a to zapríčiňuje, že nie je možné merať na rovnakej pozícii, ako to bolo v roku 1995.

Snami nameraných 38 bodoch bola zaregistrovaná priemerná hodnota dávkového príkonu 75 nGy/h v rozmedzí od 50 nGy/h do 87 nGy/h so smerodajnou odchýlkou 6.5 nGy/h. Na základe nameraných hodnôt skúmaná oblasť spadá ako celok do strednej kategórie prírodných rádioaktivít hornín podľa Smernice MŽP SR zo 4. januára 2000 č. 1/2000-3, z toho 6 bodov spadá do kategórie zvýšenej kategórie prírodnej rádioaktivít hornín.

Pokles plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  na skúmanej lokalite nastal vo väčšej miere, ako sa predpokladalo. Doba polpremeny rádioizotopu  $^{137}\text{Cs}$  je 30.17 rokov (Lehotský & Stankoviansky, 1992) z čoho vyplýva, že by úbytok plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  mal byť menší ako 50%. Z výsledkov vyplýva, že úbytok plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  je väčší, ako 90%. Vysoký úbytok je spôsobený pravidelným sadením nových obilných na orných pôdach a vegetáciou v lesnom prostredí. Výsledky laboratórnej gamaspektrometrie poukázali na zrýchlený vertikálny transport na orných pôdach rádioizotopu  $^{137}\text{Cs}$ , ku ktorému dochádza počas orby. V lesnom prostredí ku takémuto typu transportu nedochádza a výskyt rádioizotopu  $^{137}\text{Cs}$  je iba do hĺbky 15 cm.

## PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Grantom UK/36/2023, Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-21-0159 a č. APVV-16-0146 a Vedeckou grantovou agentúrou na základe Zmluvy č. VEGA 1/0107/23.

## Použitá literatúra

- AMANO, O. Results of Removing Radioactive Cesium from Shallow Rice Fields by Planting Sunflower – Report from the Survey team on the Absorption and Adsorption of Cesium by Planting Sunflower. In book: Insight Concerning the Fukushima Daiichi Nuclear Accident Vol. 2&3. Atomic Energy Society of Japan (AESJ), 15-21, 2021. DOI: 10.15669/fukushimainsights. Vol.2.15
- ANDRÁSSY, E., MOJZEŠ, A., NOGOVÁ, E., WALLOVÁ, G., BÓDI, J., ONDRÁŠOVÁ, L. Porovnanie starých a nových výsledkov meraní plošnej aktivity  $^{137}\text{Cs}$  v pokryvných útvaroch v oblasti Blahová (jz. Slovensko). EGRSE, 22, 1. s. 1-13. 2022. DOI: 10.26345/EGRSE-001-22-101
- ČANGEL, O. Detekcia poddolovaného územia geofyzikálnymi metódami na lokalite baňa Čáry, A.S. – Diplomová práca. Univerzita Komenského v Bratislave, s. 85. 2019.
- ČIPÁKOVÁ, A., Štúdium migrácie rádiostroncua a rádiocézia v pôdach s možnosťou eliminácie ich negatívnych účinkov. Štátny zdravotný ústav, Košice, s. 13. 2000.
- FORDINÁL, K. (ed.), MAGLAY, J., ELEČKO, M., NAGY, A., MORAVCOVÁ, M., VLAČIKY, M., KOHÚT, M., NÉMETH, Z., BEZÁK, V., POLÁK, M., PLAŠIENKA, D., OLŠAVSKÝ, M., BUČEK, S., HAVRILA, M., HÓK, J., PEŠKOVÁ, I., KUCHARIČ, L., KUBEŠ, P., MALÍK, M., BALÁŽ, P., LIŠČÁK, P., MADARÁS, J., ŠEFČÍK, P., BARÁTH, I., BOOROVÁ, D., UHER, P., ZLINSKÁ, A. & ŽECOVÁ, K. *Vysvetlivky ku geologickej mape Záhorskej nížiny 1: 50 000*. ŠGÚDŠ, Bratislava. 2012.
- Geologická mapa Slovenska M 1:50 000 [online]. Bratislava: Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, 2013. Dostupné na internete: <http://apl.geology.sk/gm50js>
- GKÚ Bratislava.
- GLUCH A., SMOLÁROVÁ, H., ČÍŽEK, P. *Reambulácia máp rádioaktivity  $^{137}\text{Cs}$  územia Slovenska v mierkach 1:200 000 a 1:500 000*. Orientačný prieskum geofaktorov životného prostredia – záverečná správa. ŠGUDŠ Bratislava, Archívne číslo: 86511, s. 25, (in Slovak). 2005.
- KORANDA, J. J., ROBISON W. L. *Accumulation of Radionuclides by Plants as a Monitor System*. Environmental Health Perspectives, 27, s. 165 – 179. 1978.
- LEHOTSKÝ, M., STANKOVIANSKY, M. *Detection of pluvial erosion-accumulation processes on the basis of assessment of the isotope  $\text{Cs-137}$  content in soil profile*. Geografický časopis, 44, s. 273-287. 1992.
- MAZÚR, E., & LUKNIŠ, M. Regionálne geomorfologické členenie Slovenska. Geografický časopis, 30, 2, s. 101-124. 1978.
- Smernica MŽP SR č. 1/2000-3 zo 4.1.2000 na zostavovanie a vydávanie máp prírodnej a umelej rádioaktivity v mierke 1:50 000
- SOUDEK, P., PETROVA, S., VAVRÍKOVÁ, Z., VANEK, T.  *$^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions*. Journal of Environmental Radioactivity, 88, 3, s. 236-250. 2006.
- TOMANA, J., DZÚRIK, J., KOVÁCS. Posúdenie vplyvu nového zdroja podzemnej vody vo Veľkých Úľanoch na VZ Jelka – hydrogeologický posudok. GEOSPEKTRUM s.r.o., Bratislava, s. 16. 2014.

ZHU, Y-G. & SMOLDERS, E. *Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application*. Journal of Experimental Botany, 51, 351, s. 1635 – 1645. 2000.

---

**Autoři:**

<sup>1</sup> Mgr. Erik Andrassy, Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, [andrassy4@uniba.sk](mailto:andrassy4@uniba.sk)

<sup>1</sup> doc. RNDr. Andrej Mojzeš, PhD., Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, [andrej.mojzes@uniba.sk](mailto:andrej.mojzes@uniba.sk)

<sup>2</sup> RNDr. Gabriela Wallová, PhD., Výskumný ústav vodného hospodárstva, Národné referenčné laboratórium pre oblasť vôd na Slovensku, Nábr. arm. gen. L. Svobodu 5, 812 49 Bratislava [gabriela.wallova@vuvh.sk](mailto:gabriela.wallova@vuvh.sk)