

NADZOR RADIOAKTIVNOSTI V OKOLICI NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

Poročilo za leto 2023

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvaška

Nuklearna elektrarna Krško, Krško, Slovenija

Zavod za varstvo pri delu, Ljubljana, Slovenija

MEIS storitve za okolje, Mali Vrh pri Šmarju, Slovenija

VSEBINA

Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14646

Izvajalci meritev	P-3 / P-84
Letno poročilo	P-4 / P-84
Uvod in upravne podlage	P-5 / P-84
Izveček	P-9 / P-84
Summary	P-41 / P-84
Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev	P-73 / P-84

POGLAVJE

Poročilo

AVTORJI

mag. Denis Glavič – Cindro
dr. Helena Fajfar
doc. dr. Benjamin Zorko

Povzetek

doc. dr. Tomaž Žagar
doc. dr. Benjamin Zorko

Izveček in angleški prevod izvečka

doc. dr. Benjamin Zorko

Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev

mag. Denis Glavič – Cindro
dr. Helena Fajfar

Celovita analiza sevalnih učinkov nadzorovanih izpustov v okolje iz NEK na prebivalstvo in okolje ISBN 978-961-264-287-7

Odgovorni za izdajo: doc. dr. Benjamin Zorko

Uredniki: doc. dr. Benjamin Zorko, mag. Denis Glavič – Cindro in dr. Helena Fajfar

Recenzija: prof. dr. Alojz Kodre, mag. Matjaž Koželj, mag. Borut Breznik

Lektoriral: prof. dr. Alojz Kodre

Monografija je lektorirana po mednarodnem standardu ISO 80000.

POGLAVJE

Radioaktivnost v reki Savi

AVTORJI

Matija Škrlep, mag. prof. fiz., ZVD
doc. dr. Benjamin Zorko, IJS

Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi

dr. Jasmina Kožar Logar, IJS

Radioaktivnost v usedih

dr. Toni Petrovič, IJS

Zrak

dr. Marko Giacomelli, ZVD

Zunanje sevanje

Klara Poiškruh, mag. med. fiz., IJS
Boštjan Črnič, mag. med. fiz., IJS

Radionuklidi v hrani

prof. dr. Katarina Vogel Mikuš, BF

Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645

Imisijske meritve (meritve v okolju jedrske elektrarne)

Obratovalni nadzor radioaktivnosti v okolici NEK Tabele merskih rezultatov	M-1 / M-128
Obratovalni nadzor radioaktivnosti v okolici NEK zaradi HE Brežice Tabele merskih rezultatov	M-89 / M-128
<i>Tabele interkomparacijskih rezultatov</i> Mednarodne primerjalne meritve izvajalcev	M-103 / M-128

Poročilo *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645* je na priloženi zgoščenki.

Vzdrževanje pripravljenosti izrednega monitoringa radioaktivnosti

Redna letna obhoda okolice NEK v letu 2023 sta bila izvedena 5. 6.–7. 6. 2023 in 18. 9.–20. 9. 2023.

Poročilo o obhodu mobilnih enot, LMSAR-35/2023-MŠ, 4. 8. 2023

ROMENEK 2/23, Mobilni radiološki laboratorij, Poročilo o meritvah po programu vzdrževanja pripravljenosti za primer izrednega dogodka v NEK, IJS-DP-14490, oktober 2023

Vzdrževanje pripravljenosti izrednega monitoringa radioaktivnosti v NEK, Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14635, februar 2024

Vsa poročila o vzdrževanju pripravljenosti za primer izrednega dogodka so na priloženem USB ključku.

NADZOR RADIOAKTIVNOSTI V OKOLICI NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

Poročilo za leto 2023



Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvaška

Nuklearna elektrarna Krško, Krško, Slovenija

Zavod za varstvo pri delu, Ljubljana, Slovenija

MEIS storitve za okolje, Mali Vrh pri Šmarju, Slovenija

NADZOR RADIOAKTIVNOSTI V OKOLICI NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

Poročilo za leto 2023

Odgovorni za izdajo poročila: doc. dr. Benjamin Zorko

Koordinator za IJS: doc. dr. Benjamin Zorko

Koordinator za NEK: mag. Borut Breznik

Skrbnik za NEK: Aleš Volčanšek, univ. dipl. kem.

Izvajalci meritev in drugi sodelujoči

so navedeni na 3. strani v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645*, ki je na priloženi zgoščenki.

Urednici: mag. Denis Glavič – Cindro in dr. Helena Fajfar

Lektoriral: prof. dr. Alojz Kodre;
poročilo (razen angleškega prevoda izvlečka) je lektorirano po mednarodnem standardu ISO 80000

Stavčni in računalniški prelom: mag. Denis Glavič - Cindro

Likovno in grafično uredili: mag. Denis Glavič – Cindro in dr. Helena Fajfar

Fotografije: doc. dr. Benjamin Zorko, arhiv NEK

Oprema in vezava: ABO grafika in Institut "Jožef Stefan"

Založil: Institut "Jožef Stefan"

Prva izdaja: marec 2023

Naročnik: NE Krško, Vrbina 12, SI-8270 Krško

Pogodba št.: Pogodba IJS št. 3212111 in ZVD št.3212112 (Obratovalni monitoring radioaktivnosti v okolici NEK) z dne 20. 1. 2022

Št. delovnega poročila: IJS-DP-14646

Redakcija je bila končana aprila 2024.

Vse pravice pridržane. Noben del poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14656* ter obeh prilog k poročilu: *Celovita analiza sevalnih učinkov nadzorovanih izpustov v okolje iz NEK na prebivalstvo in okolje* in *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645* ne sme biti reproduciran, shranjen ali prepisan v kateri koli obliki oziroma na kateri koli način, bodisi elektronsko, mehansko, s fotokopiranjem, snemanjem ali kako drugače, brez predhodnega privoljenja Nuklearne elektrarne Krško ©. Avtorska dela so intelektualna last Instituta "Jožef Stefan".

Naklada: 50 izvodov

**NASLOV:**

Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško

IJS-DP-14646

april 2024

KLJUČNE BESEDE:

poročanje o rezultatih meritev, radioaktivno onesnaženje okolja, zračni in tekočinski radioaktivni izpusti, umetni in naravni radionuklidi, vsebnost radionuklidov, specifična aktivnost radionuklidov, površinske vode, podtalnica, vodovod, deževnica, talni in suhi used, zrak, aerosoli, zemlja, hrana, doze zunanjega sevanja, ocena učinkovitih doz, razredčitveni faktor, referenčna oseba – posameznik iz prebivalstva, primerjalne meritve

KRATEK POVZETEK:

Sumarni rezultati meritev radioaktivnosti umetnih in naravnih radionuklidov v različnih nadzorovanih medijih in ekspozicijskih prenosnih poteh so podani z ocenami učinkovitih doz. Konzervativni oceni učinkovite doze zaradi emisij jedrske elektrarne za posameznika iz prebivalstva (odrasla referenčna oseba) dajeta v letu 2023 za atmosferske emisije *efektivno dozo* 4,4 E–5 mSv na leto, kar velja za ograjo NEK in okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja, ter 6,1 E–6 mSv na leto za tekočinske emisije. V letu 2023 so bili tako vsi sevalni učinki NEK na posameznika iz prebivalstva v okolici ocenjeni na manj kot 5,0 E–5 mSv na leto, kar je 0,1 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in dalje (0,05 mSv; vsota prispevkov po vseh prenosnih poteh). Iz meritev so bile ocenjene tudi izpostavitve naravnemu sevanju in prispevki zaradi splošne radioaktivne onesnaženosti okolja, ki so jo povzročile poskusne jedrske eksplozije in černobilska nesreča. *Ocenjena vrednost sevalnih učinkov (letne učinkovite doze) NEK na referenčno osebo – posameznika iz prebivalstva ob ograji NEK je približno 0,001 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja v okolici NEK. Ocena velja okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja. Sevalni učinki izpustov iz NEK se niso povečali po naravni ujmi v avgustu in okvari na priključnem cevovodu na reaktorsko posodo v oktobru.*

TITLE:

Off-site radiological monitoring of the Krško Nuclear Power Plant

IJS-DP-14646

April 2024

KEYWORDS:

reporting measurement results, radioactive contamination of the environment, airborne and liquid radioactive effluents, man-made and natural occurring radionuclides, specific activities, surface waters, underground water, tap water, rainwater, dry and ground deposition, airborne radionuclides, soil, foodstuffs, external radiation doses, effective dose assessments, dilution factor, representative person, intercomparison measurements

SHORT ABSTRACT:

Summarised results of radioactivity measurements of antropogenic and naturally occurring radionuclides are presented due to different contamination media and exposure pathways in the form of assessed effective doses. Conservatively estimated effective dose received by the adult representative person as the result of Krško NPP emissions in the year 2023 gives a value of the *effective dose* of 4.4 E–5 mSv per year for atmospheric discharges at the Krško NPP fence (applicable approximately also at a distance of 500 m from the axis of the reactor) and 6.1 E–6 mSv per year for liquid discharges. Thus, in 2023, the radiation effects of the Krško NPP on the representative person in the immediate surroundings were estimated at less than 5.0 E–5 mSv per year, representing 0.1 % of the authorized dose limit at the border of the Krško NPP exclusion area, set at 0,05 mSv; the sum of the contributions from all exposure pathways. From the measurements the exposure to natural radiation and general radioactive contamination due to nuclear test explosions and Chornobyl accident were assessed. *The estimated sum of all radiation contributions (annual effective doses) from the Krško NPP to the representative person at the Krško NPP fence is 0.001 % of the characteristic unavoidable natural background radiation in the vicinity of the Krško NPP. The estimate is valid approximately also at the distance of 500 m from the axis of the reactor. The radiation effects of the emissions from the Krško NPP did not increase following the natural disaster in August and the leakage of the reactor vessel connection pipeline in October.*



AVTORJI IN RECENZENTI POROČILA

	Ime in priimek	Datum in podpis
Povzetek in izvleček	doc. dr. Tomaž Žagar doc. dr. Benjamin Zorko	
Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev	mag. Denis Glavič – Cindro dr. Helena Fajfar	
Radioaktivnost v reki Savi	Matija Škrlep, mag. prof. fiz. doc. dr. Benjamin Zorko	
Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi	dr. Jasmina Kožar Logar	
Radioaktivnost v usedih	dr. Toni Petrovič	
Zrak	dr. Marko Giacomelli	
Zunanje sevanje	Klara Poiškruh, mag. med. fiz. Boštjan Črnič, mag. med. fiz.	
Radionuklidi v hrani	prof. dr. Katarina Vogel Mikuš	
Recenzija	prof. dr. Alojz Kodre	
	mag. Matjaž Koželj	



IZVAJALCI MERITEV

INSTITUT "JOŽEF STEFAN" (IJS), LJUBLJANA

Koordinator projekta za IJS: doc. dr. Benjamin Zorko

Izvajalci na IJS:

Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij (Odsek F-2)

M. Centrih, dipl. inž. fiz., B. Črnič, mag. med. fiz., P. Gerjol, dipl. inž. teh. var., mag. D. Glavič - Cindro, S. Gobec, dr. J. Kožar Logar, dr. R. Krištof, dr. M. Nečemer, P. Prem, prof. biol., dr. T. Petrovič, K. Poiškruh, mag. med. fiz., R. Roš Opaškar, mag. B. Vodenik, doc. dr. B. Zorko

Odsek za znanosti o okolju (Odsek O2)

dr. L. Rovan, B. Svetek, inž. kem. tehnol., doc. dr. M. Štrok

ZAVOD ZA VARSTVO PRI DELU (ZVD), LJUBLJANA

Koordinator projekta za ZVD: dr. Gregor Omahen

Izvajalci na ZVD:

dr. M. Giacomelli, A. Ivanc, P. Jovanovič, inž. fiz., D. Konda, M. Levstek, dr. G. Omahen, L. Peršin, M. Podvratnik, univ. dipl. fiz., mag. med. fiz., M. Škrlep, mag. prof. fiz., dr. Andrej Žohar, mag. jed. teh.

INSTITUT RUĐER BOŠKOVIĆ (IRB), ZAGREB

Koordinator projekta za IRB - ZIMO: dr. Željko Grahek

Izvajalci na IRB – Zavod za istraživanje mora i okoliša, Laboratorij za radioekologiju (IRB–ZIMO–LRE):

I. Balinović, dr. I. Coha, dr. Ž. Grahek, M. Ivković, mag. kem., G. Karanović, dipl. inž., dr. K. Magdić Košiček, dr. I. Tucaković, D. Žilić

Izvajalci na IRB – Laboratorij za mjerenje niskih radioaktivnosti – Zavod za eksperimentalnu fiziku:

dr. J. Barešić, mag. D. Borković, dr. I. Krajcar Bronić, dr. I. Lovrenčić Mikelić, A. Rajtarić, dr. A. Sironić

Izvajalci na IRB – Laboratorij za radijacijsku kemiju i dozimetriju –Zavod za kemiju materijala:

dr. Ž. Knežević, dr. M. Majer, dr. M. Nodilo, V. Trputec

IZVAJALCI EMISIJSKIH MERITEV ZNOTRAJ OGRAJE NE KRŠKO NUKLEARNA ELEKTRARNA KRŠKO (NEK), KRŠKO

Nosilec projekta za NE Krško: mag. Borut Breznik

Izvajalci v NEK:

D. Mešiček, M. Pavlin, dipl. str., M. Simončič, univ. dipl. kem., M. Urbanč, B. Vene, kem. tehnik, A. Volčanšek, univ. dipl. kem., J. Žnideršič, dipl. kem.

IZVAJALCI IZRAČUNOV RAZREDČITVENIH IN DEPOZICIJSKIH KOEFICIENTOV SEVANJA IZ OBLAKA PO LAGRANGEEVEM MODELU, MEIS STORITVE ZA OKOLJE (MEIS), MALI VRH PRI ŠMARJU

Izvajalci v MEIS:

dr. M. Z. Božnar, dr. B. Grašič, dr. P. Mlakar



LETNO POROČILO

Po pogodbi IJS št. 3212111 in ZVD št.3212112 (Obratovalni monitoring radioaktivnosti v okolici NEK) z dne 20. 1. 2022 z Nuklearno elektrarno Krško, Vrbina 12, SI-8270 Krško, obravnavamo v poročilu radiološko sliko v okolici NEK in širše. V ta namen v uvodu povzemamo ovrednotenja po posameznih sklopih, kot to zahteva *Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti JV10* (Ur. l. RS 27/2018, 5. 5. 2018) [8]. Uvod je povzetek prispevkov iz drugega dela poročila - monografije *Celovita analiza sevalnih učinkov nadzorovanih izpustov v okolje iz NEK na prebivalstvo in okolje*, kjer so ocene doz in drugi parametri obravnavani podrobno. Za potrebe poročila pa v strnjeni obliki podajamo ugotovitve za leto 2023.

Odgovorni za izdajo:

doc. dr. Benjamin Zorko



UVOD IN PRAVNE PODLAGE

Namen ovrednotenja je celovit in neodvisen izračun doz direktnega in indirektnega učinka majhnih količin radioaktivnih snovi, ki jih v zrak in vodo med obratovanjem izpušča jedrska elektrarna Krško. Osnova za izvajanje obratovalnega nadzora je *Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti JV10* (Ur. l. RS 27/18) [8]. Program obsega meritve v okolju jedrske elektrarne (priloga 4, preglednica 3 iz pravilnika JV10). Podroben program meritev je določen v *Tehnični specifikaciji za izvedbo storitve obratovalnega monitoringa radioaktivnosti v okolici NEK (pitne vode, zraka, hrane, reke Save, padavin, zemlje in sevanja v okolju skupaj z oceno doz prebivalstva) v Republiki Sloveniji za leti 2022–2023*, NEK, TS št. TO.RZ, 8/2021, Revizija 0, *Tehnični specifikaciji za izvedbo storitve obratovalnega monitoringa radioaktivnosti v okolici NEK zaradi HE Brežice (meritve Save, sedimenta, vodne biote in podtalnice) za leti 2022–2023*, NEK, TS št. TO.RZ 14/2021, Revizija 1 in dodatno v *Radiological Effluent Technical Specifications (RETS)*, NEK-RETS, Rev. 13, poglavje 3.12, strani 45–64.

Da bi zajeli vse učinke radioaktivnosti na prebivalstvo, meritve v okolici elektrarne obsegajo zunanje sevanje (sevanje radionuklidov v zraku, iz tal, kozmično sevanje ter sevanje neposredno iz elektrarne) in koncentracije aktivnosti oziroma specifične aktivnosti radioaktivnih snovi v zraku, hrani, vodi in zemlji. Te snovi z vnosom v telo povzročijo notranje obsevanje. Koncentracije aktivnosti oziroma specifične aktivnosti radionuklidov v zraku, hrani in vodi se merijo v odvzetih vzorcih v laboratorijih zunaj vpliva na okolje, ki ga povzroča elektrarna. Za izračun doz so avtorji uporabili znanstveno potrjene modele in postopke. Ovrednotenje se nanaša na imisijske meritve v okolju ter povzetek programa emisijskih meritev. Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejel najvišje doze. Za evalvacijo merskih podatkov in oceno doznih obremenitev so bili kot dopolnilni ali vzporedni podatki uporabljeni tudi:

- letno in mesečna poročila NEK o tekočinskih in zračnih emisijah v letu 2023;
- mesečni izračuni zračnih razredčitvenih faktorjev Agencije Republike Slovenije za okolje za okolico NEK v letu 2023;
- mesečni izračuni zračnih razredčitvenih in depozicijskih faktorjev ter koeficientov sevanja iz oblaka MEIS storitve za okolje, d. o. o., za okolico NEK v letu 2023;
- mesečna poročila o meritvah koncentracije H-3 v podtalnici na dodatnih lokacijah v okolici NEK (vrtine VOP-1/06, V 12/77 in V-7/77);
- mesečna poročila o meritvah savske vode, sedimentov in biote iz *Dodatnega programa nadzora radioaktivnosti v okolici NEK zaradi HE Brežice*;
- nekateri merski podatki iz *Programa nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju Republike Slovenije* in posebnih meritev IJS.

Učinek objektov, ki v okolje spuščajo radioaktivne snovi, nadziramo na dva načina. Na samem viru izpustov merimo emisije, to je sestavo radionuklidov in izpuščeno aktivnost, ter z modelom transporta snovi v okolju ocenjujemo dozne obremenitve posameznika iz prebivalstva (referenčna oseba) v okolici objektov. Po drugi strani pa z neposrednimi meritvami ugotovljamo prisotnost radioaktivnih snovi v okolje, kar omogoča neposredno oceno izpostavljenosti posameznika iz prebivalstva. Slednje meritve omogočajo tudi oceno izpostavljenosti posameznika iz prebivalstva naravnemu sevanju in vplivom širšega okolja, kot so bile jedrske eksplozije in černobilska nesreča.

Zunanje sevanje se meri z elektronskimi merilniki hitrosti doze, ki se uporabljajo pri sprotne spremljanju zunanjega sevanja (Envinet MIRA, AMES/MFM, Atomtex/MFM in Gihmm), in s pasivnimi termoluminiscenčnimi dozimetri (TLD). Radioaktivnost v zraku se določa iz vzorcev, dobljenih s črpanjem zraka skozi aerosolne filtre in filtre, ki zadržijo jod iz zraka, ter iz vzorcev deževnice in suhega useda. Radioaktivnost v reki Savi, kamor se iztekajo tekočinski izpusti, se določa iz meritev vzorcev vode, sedimentov in rib, radioaktivnost podzemnih vod pa iz vzorcev podtalnice in vzorcev vodovodne vode iz zajetij in črpališč. Vzorci hrane, ki so pridelani v okolici elektrarne in v katerih se meri vsebnost radionuklidov, so izbrani tako, da se lahko oceni celotni prispevek radioaktivnosti hrane k dozi. Poleg tega se določa še vsebnost radionuklidov v zemlji.



Izvajalci meritev so bili Institut "Jožef Stefan" (IJS) in Zavod za varstvo pri delu (ZVD) iz Ljubljane ter Institut Ruđer Bošković (IRB) iz Zagreba, Republika Hrvaška. Emisijske meritve znotraj ograje Nuklearne elektrarne Krško so izvedli sodelavci NEK.

Institut "Jožef Stefan" (IJS) in Zavod za varstvo pri delu (ZVD) sta pooblaščenca za izvajanje merilnega nadzora radioaktivnosti na podlagi 159. člena Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-1, Ur. l. RS, št. 76/17 in 26/19) ter 8. in 10. člena Pravilnika o monitoringu radioaktivnosti (JV10, Ur. l. RS, št. 27/18) s pooblastiloma 35400-3/2019/12 z dne 14. 1. 2020 (IJS) in 35400-1/2019/4 z dne 15. 2. 2019 (ZVD), ki ju je izdala Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost (URSV) v soglasju z Upravo RS za varstvo pred sevanji (URSVS).

Institut "Ruđer Bošković" (IRB) je pooblaščen za izvajanje merilnega nadzora radioaktivnosti na podlagi 139. in 159. člena Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-1, Ur. l. RS, št. 76/17 in 26/19) ter 8. in 10. člena Pravilnika o monitoringu radioaktivnosti (JV10, Ur. l. RS, št. 27/18) s pooblastilom 35400-2/2021/3 z dne 29. 7. 2021, ki ga je izdala URSJV v soglasju z URSVS.

Pravilnik o posebnih zahtevah varstva pred sevanji in načinu ocene doz (SV5) (Ur. l. RS, št. 47/18 z dne 21. 7. 2018) [12] zahteva, da morajo poročilo o ocenah doz za posamezne značilne in referenčne osebe izdelati pooblaščenca izvedenci varstva pred sevanji.

Uprava Republike Slovenije za varstvo pred sevanji je pooblastila za dajanje strokovnih mnenj, ki temeljijo na meritvah in/ali izračunih glede izdelave ocen varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji, delovnih razmer izpostavljenih delavcev, obsegu izvajanja ukrepov varstva pred sevanji na opazovanih in nadzorovanih območjih, preverjanju učinkovitosti teh ukrepov, rednem umerjanju merilne opreme ter preverjanju uporabnosti zaščitne opreme na področju izpostavljenosti prebivalcev zaradi izvajanja sevalnih dejavnosti, naslednje sodelavce Instituta "Jožef Stefan" in Zavoda za varstvo pri delu:

- dr. Marka Giacomellija z odločbo 1864-15/2019-3 z dne 16. 10. 2019;
- mag. Denis Glavič - Cindro z odločbo 1864-15/2022-3 z dne 14. 10. 2022;
- mag. Matjaža Koželja z odločbo 1864-4/2023-3 z dne 14. 4. 2023;
- dr. Gregorja Omahna z odločbo 1864-6/2021-4 z dne 19. 7. 2021;
- mag. Matjaža Stepišnika z odločbo 1864-11/2022-3 z dne 28. 7. 2022 ter
- doc. dr. Benjamina Zorka z odločbo 1864-9/2018-5 z dne 1. 2. 2019 (oddana vloga za podaljšanje).

Institut "Jožef Stefan" (IJS), Ljubljana, je z odločbo Uprave RS za varstvo pred sevanji (URSVS) št. 1864-5/2022-4 z dne 29. 3. 2022 na podlagi 46. člena Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Uradni list RS, št. 76/17, 26/19 in 172/21) in 3. člena Pravilnika o pooblaščenju izvajalcev strokovnih nalog s področja ionizirajočih sevanj (Uradni list RS, št. 39/18) pooblaščen kot izvajalec dozimetrije za ugotavljanje izpostavljenosti zunanjemu obsevanju in dajanje strokovnih mnenj, ki temeljijo na meritvah in/ali izračunih na podlagi termoluminiscenčne dozimetrije sevanja gama in rentgenske svetlobe ter za ugotavljanje izpostavljenosti notranjemu obsevanju pri delu z odprtimi viri in dajanje strokovnih mnenj, ki temeljijo na meritvah in/ali izračunih na podlagi meritev specifične aktivnosti v bioloških vzorcih ali zraku oziroma specifične površinske aktivnosti kontaminiranih površin. Z odločbo Uprave RS za varstvo pred sevanji (URSVS) št. 1864-17/2022-4 z dne 11. 11. 2022 je pooblastilo razširjeno še na ugotavljanje izpostavljenosti zaradi radona in torona ter dajanje strokovnih mnenj, ki temeljijo na meritvah oziroma izračunih.

Institut "Jožef Stefan" (IJS), Ljubljana, je s pooblastilom št. 1864-20/2022-4 z dne 31. 1. 2023, ki ga je izdala Uprava RS za varstvo pred sevanji (URSVS) na podlagi 42. in 43. člena Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Uradni list RS, št. 76/17, 26/19 in 172/21) in 5. člena Pravilnika o pooblaščenju izvedencev varstva pred sevanji (Uradni list RS, št. 47/18), pooblaščen kot izvedenec varstva pred sevanji za svetovanje glede izvajanja sevalnih dejavnosti, izdelavo ocen varstva pred sevanji in dajanje strokovnih mnenj, ki temeljijo na meritvah in/ali izračunih ter za izvajanje nadzornih meritev na nadzorovanih in opazovanih območjih, pregledov virov sevanja in osebne varovalne opreme.

Institut "Jožef Stefan" (IJS), Ljubljana, je s pooblastilom št. 3571-1/2022/2 z dne 11. 3. 2022, ki ga je izdala Uprava RS za jedrsko varnost (URSV) na podlagi 2. in 3. odstavka 88. člena Zakona o varstvu pred



ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Uradni list RS, st. 76/17, 26/19 in 172/21) ter 4. člena Pravilnika o pooblaščenih izvedencih za sevalno in jedrsko varnost (Uradni list RS, st. 50/16 in 76/17 - ZVISJV-1) pooblaščen za izvajanje del pooblaščenega izvedenca za sevalno in jedrsko varnost za vse dejavnosti, ki so določene v tabeli v pooblastilu.

Institut "Jožef Stefan" ima izdelan sistem vodenja kakovosti. Sistem vodenja kakovosti Odseka za fiziko nizkih in srednjih energij (F-2), v okviru katerega delujejo Laboratorij za meritve radioaktivnosti, Laboratorij za dozimetrijo, Ekološki laboratorij z mobilno enoto in Laboratorij za tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo, je opisan v *Poslovniku kakovosti Odseka za fiziko nizkih in srednjih energij (F2-PK)*. Vsa dela, povezana z meritvami radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško v okviru *Programa nadzora radioaktivnosti v okolici NE Krško*, potekajo v skladu z institutskim in odsečnim poslovnikom in po postopkih, na katere se odsečni poslovnik sklicuje. Laboratorij za meritve radioaktivnosti je akreditiran pri Slovenski akreditaciji za meritve sevalcev gama v trdnih in tekočih vzorcih, Laboratorij za dozimetrijo za meritve doz s termoluminiscenčnimi dozimetri za uporabo v osebni in okoljski dozimetriji ter Ekološki laboratorij z mobilno enoto (ELME) za merjenje hitrosti doze s prenosnimi merilniki ionizirajočega sevanja, za neposredne meritve površinske kontaminacije s sevalci alfa, beta in z nizkoenergijskimi sevalci gama in za visokoločljivostno spektrometrijo gama v mobilnem radiološkem laboratoriju. Laboratorij za tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo je akreditiran za določanje tritija v vzorcih vode po direktni metodi in po metodi z elektrolitsko obogatitvijo, za določanje skupne aktivnosti sevalcev alfa in beta v vodnih vzorcih ter aktivnosti C-14 v tekočih, plinastih in trdnih vzorcih. Z akreditacijsko listino št. LP-022 jim Slovenska akreditacija priznava izpolnjevanje zahtev standarda SIST EN ISO/IEC 17025:2017 pri teh dejavnostih. Odsek za znanosti v okolju, v okviru katerega deluje Laboratorij za radiokemijo, ima ravno tako izdelan sistem vodenja, ki je skladen z zahtevami standarda SIST EN ISO/IEC 17025:2017. Metode za določanje vsebnosti stroncija, tritija in C-14 v vzorcih iz okolja so od junija 2009 dalje akreditirane pri Slovenski akreditaciji pod zaporedno številko LP-090.

Laboratorij za radioekologijo na Institutu Ruđer Bošković na ima akreditacijo Hrvatske akreditacijske agencije (HAA) v skladu s standardom HRN EN ISO/IEC 17025:2017 pod zaporedno številko 1162 za določanje vsebnosti radionuklidov z visokoločljivostno spektrometrijo gama in vsebnosti Sr-89/Sr-90 po radiokemijski metodi v vzorcih iz okolja in proizvodih, vključno s hrano in pitno vodo, ter za določanje tritija, skupne aktivnosti sevalcev alfa in beta ter Fe-55 v vodnih vzorcih. Od julija 2021 je Laboratorij za meritve nizkih radioaktivnosti na Institutu Ruđer Bošković akreditiran pri HAA pod zaporedno številko 1667 za določanje specifične aktivnosti C-14 s tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo v organskih in anorganskih materialih.

Zavod za varstvo pri delu ima delujoč sistem vodenja kakovosti, v katerega so vključene vse dejavnosti, povezane z meritvami v okviru *Programa nadzora radioaktivnosti v okolice NE Krško*. Laboratorij za merjenje specifičnih aktivnosti radionuklidov je akreditiran pri Slovenski akreditaciji za izvajanje visokoločljivostne spektrometrije gama v vzorcih aerosolov, padavin, zemlje, sedimentov in živil ter za določanje vsebnosti Sr-89 in Sr-90 v vzorcih iz okolja in živil. Z akreditacijsko listino št. LP-032 mu Slovenska akreditacija priznava izpolnjevanje zahtev standarda SIST EN ISO/IEC 17025:2017 pri teh dejavnostih.





IZVLEČEK

Poročilo podaja rezultate rednih letnih meritev naravnih in umetnih radioaktivnih snovi ter ostalih virov ionizirajočega sevanja v okolici jedrske elektrarne Krško (NEK), skupaj z izračunom prejete količine ionizirajočega sevanja, ki jih iz teh virov prejmejo prebivalci v okolici jedrske elektrarne Krško.

V letu 2023 so meritve in izračune po zakonsko predpisani in mednarodno priznani metodologiji (ICRP in IAEA) opravile štiri pooblaščen organizacije iz dveh držav (Institut "Jožef Stefan", Zavod za varstvo pri delu, Institut Ruđer Bošković in MEIS d.o.o) ter NEK kot zavezanec. Rezultati meritev in izračunov kažejo, da je bil skupni učinek NEK iz vseh virov in vseh prenosnih poti na prebivalstvo v vseh primerih manj kot en procent avtorizirane meje, kar pomeni, da objekti NEK ne vplivajo na sevalno obremenitev prebivalcev v okolici.

Tako kot vsi prebivalci, tudi prebivalci v okolici NEK prejmejo določeno količino naravnega ionizirajočega sevanja. Izpostavljenost naravnemu ionizirajočemu sevanju v okolici NEK lahko določimo zelo natančno prav na podlagi meritev, ki jih pooblaščen organizacije izvajajo v okviru zakonsko določenega nadzora NEK, saj občutljive naprave zaznavajo vse, tudi številne naravne radionuklide v okolju. Na podlagi meritev pooblaščenih organizacij in analiz Uprave RS za varstvo pred sevanji je bila v letu 2023 temeljito revidirana in z uporabo novih utežnih faktorjev in spoznanj o doznih obremenitvah vdihavanja naravnih radionuklidov in njihovih potomcev določena vrednost prejete doze naravnega ionizirajočega sevanja v okolici NEK 5,75 mSv na leto.

Tabela A: Zbirna tabela letnih izpostavitvev prebivalstva v okolici NEK za leto 2023 je povzetek podatkov, ki so obširneje predstavljeni v tabeli E.

Vir	Prenosna pot	Letna efektivna doza (mSv)
naravno sevanje	– zunanje sevanje gama in neposredno kozmično sevanje *	1,10
	– zaužitje naravnih radionuklidov (K, U, Th)**	0,33
	– vdihavanje naravnih radionuklidov in potomcev**	4,32
	Skupaj naravno sevanje v okolici NEK	5,75
NEK	– sevanje gama in neposredno sevanje iz objektov NEK	0,000000
	– kumulativni prispevek atmosferskih izpustov	0,000044
	– kumulativni prispevek tekočinskih izpustov	0,000003
	Skupaj učinki NEK***	0,000047
ostalo	– černobilska nesreča, vojaški jedrski poskusi, ...	0,0285
	Skupaj globalno onesnaženje v okolici NEK	0,0285

* Ocena efektivne doze zunanjega sevanja iz okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ z upoštevanjem pretvorbenega faktorja $E/H^*(10) = 0,84$ za fotone 600 keV [87]. Pretvorbeni faktorji v območju od 100 keV do 6 MeV so v območju med 0,84 in 0,89. Upoštevali smo tudi, da se odrasla oseba (referenčna oseba) zadržuje 20 % časa na prostem in da je faktor ščitenja pri zadrževanju v zgradbah 0,9. Okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$, ki je bil ocenjen v poglavju *Zunanje sevanje* v prilogi tega poročila, dodatno pomnožimo s faktorjem 0,84 ([26], [42]).

** Povzeto po poročilu [14].

*** Skupna vsota prispevkov NEK je informativna in konzervativno ocenjena navzgor, saj v celoti seštevamo vse različne prispevke za različne referenčne osebe, ki se v realnem primeru ne seštevajo v celoti.



Prispevek vseh sevalnih učinkov NEK na prebivalce v njegovi neposredni okolici je 0,000047 mSv na leto. Ta prispevek je stotisočkrat manjši od naravnega ozadja, zato lahko zaključimo, da prebivalci, ki živijo na krško-brežiškem polju, v naseljih v celotnem okrožju v okolici NEK in na robu izključitvenega območja, niso nič bolj izpostavljeni ionizirajočemu sevanju kot prebivalci drugod po Sloveniji. Prispevek sevalnih učinkov NEK na prebivalce predstavlja 0,1 % avtorizirane mejne letne doze. Avtorizirana letna doza za prebivalce je določena na 0,05 mSv na leto, kar je 5 % mejne efektivne doze (1 mSv) za posameznika iz prebivalstva v Sloveniji.

Prejete doze prebivalstva v okolici NEK so zbirno predstavljene v tabeli A. Ta vsebuje konzervativno zaokrožen in poenostavljen prikaz merskih in računskih podatkov, ki so v celoti predstavljeni v tabeli F in bolj podrobno v preostalem delu tega izvlečka in celotnega poročila.

Vsi sevalni učinki NEK na prebivalstvo v okolici so zelo majhni, manj kot en promil avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in naprej v zunanosti. Nizke vrednosti lahko pripišemo majhnim nadzorovanim izpustom iz NEK. Zasluge za tako nizke učinke jedrske elektrarne gredo tudi zaposlenim v NEK, ki zglejedo skrbijo za nadzor in omejevanje izpustov. Niti poplave v avgustu niti puščanje na priključnem cevovodu na reaktorsko posodo v oktobru, po katerem je bil opravljen tudi izredni remont, niso povečali sevalnih učinkov NEK na posameznika iz prebivalstva in okolje.

Pri tem je treba poudariti, da se za izračun ali oceno sevalne obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta uporablja tako imenovana referenčna oseba. To je za posamezno prenosno pot teoretični predstavnik prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejel najvišjo dozo pri posameznem načinu prenosa radioaktivnih snovi v okolje.

Tako je na primer referenčna oseba za izračun prispevka atmosferskih izpustov zaradi C-14 oseba, ki živi neposredno v okolici NEK (blizu roba izključitvenega območja) in dva meseca v letu uživa samo hrano, ki je bila pridelana na enakem mestu (blizu roba izključitvenega območja), ostalih 10 mesecev pa hrano od drugod iz Posavja (Dobova). Referenčna oseba za izračun prispevka tekočinskih izpustov v reko Savo je ribič ob reki Savi, ki se zadržuje 350 m nizvodno od jezua NEK in uživa tam ujete ribe. V skupni oceni vpliva te različne referenčne osebe seštejemo. Ker pa gre za prispevke različnih referenčnih oseb, je seštevek učinkov zračnih in tekočinskih izpustov iz NEK konzervativna zgornja ocena letne efektivne doze. Celotna taka konzervativna ocena izpostavljenosti hipotetične referenčne osebe, ki prejme vse mogoče dozne obremenitve iz NEK, predstavlja praktično zanemarljivo vrednost v primerjavi z vrednostmi značilnega neizogibnega naravnega ozadja v Republiki Sloveniji.

Tako lahko sklenemo, da NEK proizvaja čisto, učinkovito in nizkoogljico energijo, ki je bistvena za zadovoljevanje trenutnih in prihodnjih energetskega potreb Republike Slovenije in reševanje globalnih podnebnih sprememb.



UVOD

Podobno kot v svetu je prebivalstvo v Sloveniji izpostavljeno naravnemu ionizirajočemu sevanju in različnim antropogenim virom ionizirajočega sevanja. Poleg naravnih virov ionizirajočega sevanja je v razvitem svetu največji antropogeni vir ionizirajočega sevanja uporaba v medicini. Med druge antropogene vire štejeta še učinka preostale černobilske kontaminacije in kontaminacije okolja zaradi atmosferskih jedrskih poskusov, ki običajno predstavljata manj kot odstotek naravnega ozadja. Izpostavitev prebivalstva ionizirajočemu sevanju zaradi medicinskih preiskav v poročilu ni obravnavana.

Pri prebivalstvu v okolici Nuklearne elektrarne Krško (NEK) so možne dodatne izpostavitve zaradi atmosferskih in tekočinskih izpustov radioaktivnih snovi iz NEK in zaradi neposrednega sevanja iz objektov znotraj njene ograje. Pri njih mora NEK upoštevati *avtorizirane meje* in druge mejne vrednosti, ki se nanašajo na izpuste ter druge sevalne učinke na okolje in prebivalstvo. Omejitev dodatne izpostavitve prebivalstva je bila določena že v lokacijski dokumentaciji NEK leta 1974, kjer je navedena zahteva, da celotna letna učinkovita doza prispevkov vseh prenosnih poti na posameznika iz prebivalstva na robu izključitvenega območja (500 m od osi reaktorja) in navzven ne sme presegati 0,05 mSv na leto. Ta omejitev je bila po začetku obratovanja dopolnjena še z omejitvijo letne učinkovite doze *zunanjega sevanja* objektov na ograji (0,2 mSv na leto) ter z omejitvijo aktivnosti radionuklidov v tekočih in plinastih efluentih. Izpolnjevanje zahtev dokazuje NEK z *obratovalnim nadzorom radioaktivnosti*, katerega obseg in način izvajanja določata *Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8]. Obratovalni nadzor radioaktivnosti obsega meritve *emisij* na samem objektu, meritve *imisij* v okolici, meritve zunanjega sevanja v okolju, ovrednotenje merskih rezultatov in oceno doz. Pravilnik določa tudi zahteve, ki jih morajo izpolnjevati izvajalci nadzora radioaktivnosti, tehnične zahteve za merilno in analizo opremo ter načine in poti izpostavljenosti, ki jih je treba upoštevati pri ocenjevanju doz. Poleg NEK, ki meri emisije, sodelujejo pri izvedbi nadzora radioaktivnosti tudi *neodvisni pooblaščenizvajalci nadzora*.

V tem poročilu ocenjujemo sevalni učinek NEK zaradi tekočinskih izpustov z uporabo veljavnega enodimenzionalnega modela iz leta 2009. Ta model temelji na podatkih o tekočinskih izpustih in povprečnem letnem pretoku reke Save ter upošteva značilnosti referenčne osebe. To oceno nato primerjamo z rezultati, pridobljenimi z uporabo novega modela [34]. Model temelji na teoretični napovedi mešanja in redčenja z uporabo tridimenzionalnega hidrodinamičnega transportnega modela PCFLOW3D ([31], [32], [33], [38]). V okviru projektne naloge je bila izdelana tudi spletna platforma DOSENEK [34], v kateri vnašamo merske in druge podatke in z računskimi postopki izračunamo učinkovite doze za tri različne starostne skupine v pretočni akumulaciji HE Brežice. Pod jezom HE Brežice se učinkovita doza za referenčno osebo¹ oceni iz rezultatov analiz okoljskih vzorcev.

ZNAČILNOSTI VZORČENJA IN MERITEV VZORCEV IZ OKOLJA

Vzorčenje in meritve so v letu 2023 potekale v enakem obsegu in na enak način kot v preteklih letih, kar omogoča primerjavo rezultatov nadzora z rezultati iz preteklih let in določitev možnih usmeritev. Pred leti je bil po izgradnji HE Brežice uveden dodatni radiološki merilni nadzor v akumulacijskem jezeru. Značilnosti vzorčenja in meritev so:

1) Reka Sava

- a) neprekinjeno vzorčenje na štirih lokacijah (Krško – 3,2 km vzvodno, nad jezom HE Brežice – 7,2 km nizvodno, Brežice – 8,2 km nizvodno in Jesenice na Dolenjskem – 17,5 km nizvodno) za dolgožive radionuklide; posamično vzorčenje nefiltrirane vode v Krškem, na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera, v razlivnem območju ("nadomestni habitat"), nad jezom HE Brežice, v Brežicah, Jesenicah na Dolenjskem in Podsusedu pri Zagrebu (HR, okrog 30 km nizvodno od NEK) za kratkožive radionuklide;

¹ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba kot posameznik iz prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejel najvišje doze [8].



- b) posamični četrletni vzorci reke Save v Krškem in Brežicah;
- c) sestavljeni četrletni vzorci na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera za ugotavljanje koncentracije aktivnosti C-14 v Savi;
- č) vzorčenje sedimentov na desetih lokacijah (Krško vzvodno, pod jezom NEK, Pesje, na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice, nad jezom HE Brežice, Brežice, Jesenice na Dolenjskem, Podsused - HR nizvodno);
- d) vzorci rib: Krško, akumulacijsko jezero Brežice, Brežice, Jesenice na Dolenjskem, Podsused (HR) in Otok (HR). Prav tako sta bila odvzeta vzorca rib v pretočni akumulaciji HE Brežice za ugotavljanje vsebnosti C-14.

Meritve vzorcev vključujejo določanje koncentracije aktivnosti in specifične aktivnosti sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama (VLG), določanje koncentracije aktivnosti tritija (H-3) s tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo in določanje Sr-90/Sr-89 z radiokemično separacijo in štetjem s proporcionalnim števcem. Radiokemijska analiza Sr-89/Sr-90 se opravi na istih vzorcih kot visokoločljivostna spektrometrija gama. Vsebnost C-14 v savski vodi in ribah je bila določena z masno spektrometrijo s pospeševalnikom (AMS).

2) Vodovodi in črpališča

- a) posamični letni vzorci vode iz vodovoda v Ljubljani (Osrednjeslovenska regija, referenčna lokacija);
- b) posamični četrletni vzorci vode iz vodovodov v Krškem in Brežicah;
- c) mesečni sestavljeni vzorci črpališč na Bregah, v Rorah in Brežicah ter vodovodov Spodnji Stari Grad in Brežice; mesečni sestavljeni vzorci črpališča Petruševac v Zagrebu, Hrvaška;
- č) vzorčenje podtalnice v neposredni okolici elektrarne (četrletni posamični vzorci iz vrtine E1 znotraj ograje NEK in mesečni posamični vzorci iz vrtine VOP-4, Vrbina) ter na dveh lokacijah na Hrvaškem (vrtini Medsave in Šibice);
- d) mesečni vzorci vrtin VOP-1/06, V-7/77 in V-12/77.

Meritve vzorcev vključujejo določanje koncentracije aktivnosti sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama (VLG), določanje koncentracije aktivnosti tritija (H-3) s tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo in določanje koncentracije aktivnosti Sr-90/Sr-89 z radiokemično separacijo in štetjem s proporcionalnim števcem. Radiokemijska analiza Sr-89/Sr-90 se opravi na istih vzorcih kot visokoločljivostna spektrometrija gama.

3) Padavinski in suhi usedi

- a) mesečni sestavljeni vzorci iz zbiralnikov padavin na Bregah, v Krškem in na referenčni lokaciji v Dobovi ter v Ljubljani (kontrolna lokacija; v okviru nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji);
- b) mesečna menjava vazelinskih zbiralnikov suhega useda na osmih lokacijah v ožji in širši okolici NEK ter v Ljubljani (referenčna lokacija).

Pri vzorcih padavin so bile opravljene meritve z visokoločljivostno spektrometrijo gama, določena je bila še koncentracija aktivnosti tritija (H-3) s tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo in koncentracija aktivnosti Sr-90/Sr-89 z radiokemično analizo. Radiokemijska analiza Sr-89/Sr-90 se opravi na istih vzorcih kot visokoločljivostna spektrometrija gama. Na vazelinskih vzorcih so bile opravljene meritve z visokoločljivostno spektrometrijo gama.

4) Zrak

- a) vzorčenje aerosolov se opravlja z neprekinjenim prečrpavanjem zraka skozi aerosolne filtre, ki se menjajo vsakih 15 dni; črpalke so postavljene na osmih lokacijah v okolici NEK (Spodnji Stari Grad, Krško – Stara vas, Leskovec, Brege, Vihre, Gornji Lenart, Spodnja Libna in referenčna lokacija Dobova) ter na kontrolni lokaciji v Ljubljani (nadzor radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji);



- b) vzorčenje joda I-131 se opravlja s posebnimi črpalkami in filtri na istih lokacijah, kjer poteka vzorčenje aerosolov (razen v Dobovi);
- c) vzorčenje za specifično meritev Sr-90/Sr-89 je v Stari vasi;
- č) meritve emisij se opravijo na glavnem ventilacijskem izpustu NEK, pri čemer se odvezemajo vzorci za meritev joda, tritija (H-3), ogljika (C-14) in aerosolov ter opravljajo meritve žlahtnih plinov;
- d) zbiranje vzorcev zračnega ogljika C-14 v CO₂ je neprekinjeno potekalo na dveh mestih na ograji NEK, ki je v izključitvenem območju, v letu 2023 je bilo skupno zbranih štirinajst vzorcev. Kontrolne meritve so potekale v Zagrebu, R Hrvaška.

Meritve filtrov za aerosole in posebnih filtrov za I-131 se opravljajo z visokoločljivostno spektrometrijo gama, specifična meritev Sr-90/Sr-89 pa se opravlja na proporcionalnem števcu beta. Radiokemijska analiza Sr-89/Sr-90 se opravi na istih vzorcih kot visokoločljivostna spektrometrija gama. Merjenje specifične aktivnosti C-14 v atmosferskem CO₂ poteka z uporabo tekočinskoscintilacijskega števca po pretvorbi CO₂ v benzen.

5) Zunanja izpostavljenost sevanju

Zemlja

- a) vzorce zemlje zbiramo na treh lokacijah neobdelane zemlje nizvodno od NEK na poplavnih območjih (kraj Amerika – 3,5 km vzhodno od NEK, Gmajnice – 2,5 km od NEK in Kusova Vrbina-Trnje – 8,5 km od NEK); vzorčenje poteka dvakrat letno, in sicer ločeno po globinah do 30 cm.

Meritve sevalcev gama se opravljajo z visokoločljivostno spektrometrijo gama, specifična aktivnost Sr-90/Sr-89 pa se določa z radiokemijsko analizo, ki se opravi na istih vzorcih kot visokoločljivostna spektrometrija gama.

Zunanje sevanje

- a) doza zunanjega sevanja (sevanje gama in ionizirajoča komponenta kozmičnega sevanja izražena v okoljskem doznem ekvivalentu $H^*(10)$) se meri s 57 termoluminiscenčnimi dozimetri (TL-dozimetri) v okolici NEK (nameščeni so krožno okoli NEK na razdaljah do 10 km) in devetimi TL-dozimetri na ograji NEK; dozimetri se odčitavajo v polletnih presledkih; referenčni dozimeter za vse meritve doze zunanjega sevanja je v Ljubljani; dodatnih 10 TL-dozimetrov je postavljenih na Hrvaškem;
- b) doza zunanjega sevanja se meri tudi s sedmimi TL-dozimetri na zahodni ograji NEK v bližini stavbe za suho skladiščenje izrabljenega goriva;
- c) vzporedno potekajo meritve s TL-dozimetri na 50 lokacijah po državi [18], [19];
- d) v sklopu mreže zgodnjega obveščanja je v okolici NEK postavljenih 14 merilnikov hitrosti doze, ki delujejo neprekinjeno; poleg teh je v mrežo zgodnjega obveščanja v Sloveniji vključenih še dodatnih 64 merilnikov (Envinet MIRA, AMES/MFM, Atomtex/MFM in Gihmm).

Za merjenje okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ IJS uporablja dozimetre tipa TLD-IJS-05 (iz CaF₂:Mn). Meritve $H^*(10)$ na 10 lokacijah na Hrvaškem so opravljene s termoluminiscenčnimi (LiF:Mg,Cu,P, MCP-N, CaF₂:Mn), OSL Al₂O₃:C in radiofotoluminiscenčnimi (RPL) dozimetri. Podatke iz merilnikov mreže zgodnjega obveščanja zbira in posreduje URSJV.

6) Hrana

- a) odvezemna mesta vzorcev hrane v letu 2023, ki so označena na priloženem zemljevidu na koncu poročila, so bila: sadovnjak ob NEK (sadje), Pesje (mleko, zelenjava, sadje), Brege (mleko, zelenjava, meso), Vihre (zelenjava), Vrbina (žito, sadje, zelenjava), Spodnji Stari Grad (meso, jajca), Žadovinek (zelenjava), Trnje (zelenjava), Leskovec (meso, sadje), Dolenje Skopice (mleko, zelenjava), Dolenja vas (zelenjava), Gornji Lenart (jajca), Sevnica (meso); v letu 2023 je bilo v okolici NEK vzorčenih 29 vrst živil, skupno 71 vzorcev (mleko: 36, zelenjava: 20, meso: 7, sadje: 8);
- b) pogostost vzorčenja je odvisna od vrste živila: mleko mesečno oziroma trimesečno za specifično meritev Sr-90/Sr-89, meso, jajca in žito enkrat letno, povrtnine, poljščine in sadje sezonsko;



- c) vzorčenje rastlinstva, poljščin in sadja za določanje specifične aktivnosti C-14 je potekalo v letu 2023 dvakrat (junij in september) na 16 lokacijah v okolici NEK in v Dobovi; skupaj je bilo analiziranih 36 vzorcev.

Specifične aktivnosti sevalcev gama so bile izmerjene z visokoločljivostno spektrometrijo gama, specifične aktivnosti Sr-90/Sr-89 pa z radiokemijsko metodo, ki se opravi na istih vzorcih kot visokoločljivostna spektrometrija gama. Aktivnost C-14 se določa z meritvijo absorbiranega CO₂ s tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo.

REZULTATI MERITEV

Pri ovrednotenju merskih rezultatov z visokoločljivostno spektrometrijo gama, opravljenih na IJS, smo uporabili neposredne merske rezultate iz poročila *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645*, enako kot v zadnjih treh letih. Merski podatki so predstavljeni v obliki $y \pm u(y)$, kjer je y izmerjena specifična aktivnost in $u(y)$ združena standardna negotovost izmerka. Če je pri detektirani prisotnosti radionuklida negotovost aktivnosti večja od 80 % vrednosti izmerka, poročamo neposredni merski rezultat, ki ga označimo z znakom "‡", pod tabelo pa dopišemo, da gre za merski rezultat pod mejo kvantifikacije.

Za izračun letne doze uporabljamo aritmetično sredino periodičnih merskih rezultatov [60]. Negotovost izračunane letne doze je apriorna negotovost aritmetičnega povprečja, ki upošteva negotovosti periodičnih merskih rezultatov. Negotovost aritmetičnega povprečja lahko ocenimo tudi s predpostavko, da so periodični merski rezultati porazdeljeni po normalni verjetnostni porazdelitvi. Standardno deviacijo takšne porazdelitve imenujemo razsutje. Če jo delimo s korenem števila meritev, pridemo do aposteriorne negotovosti aritmetičnega povprečja. Definicije teh izrazov so v delovnem poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS DP 14645*. Tako definirane cenilke so združljive s frekventističnim pristopom [61], le da se namesto aposteriorne negotovosti tam uporablja izraz raztresenost povprečja.

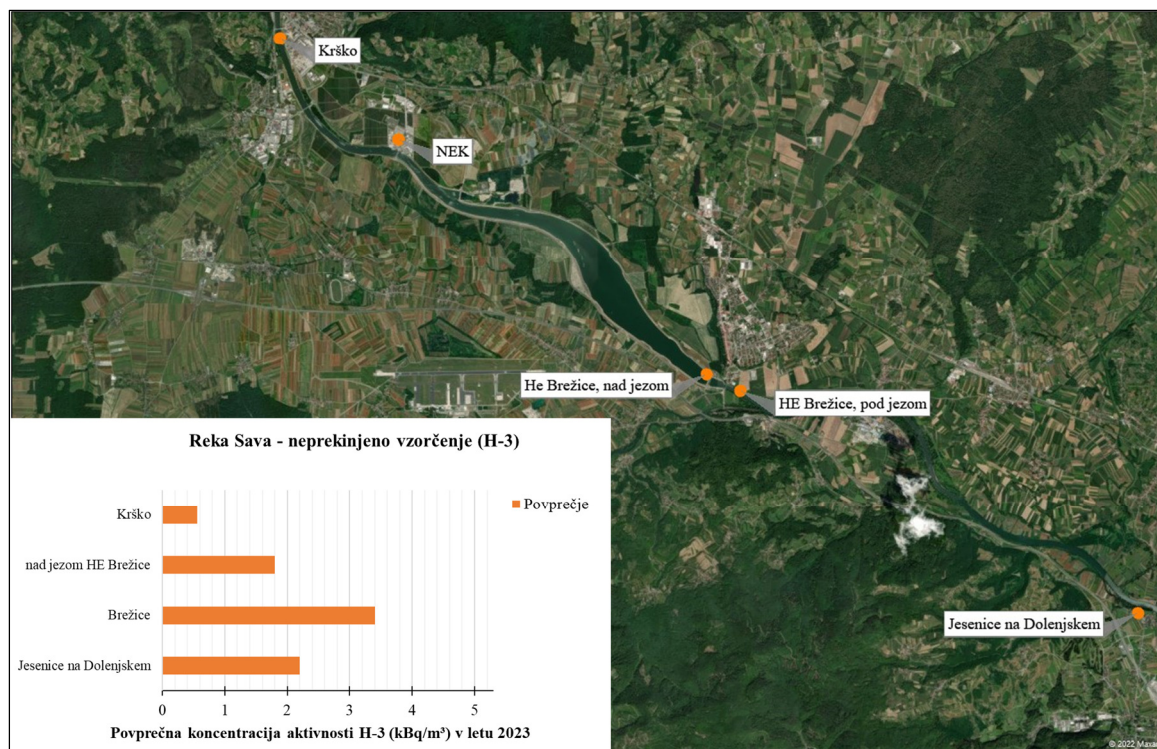
Kadar se poroča meja detekcije (največkrat pri Pb-210, H-3, Sr-90, itd.), se na podlagi priporočila Evropske komisije (*European Commission recommendation on standardized information on radioactive airborne and liquid discharges into the environment from nuclear power reactors and reprocessing plants in normal operation*, Euratom Off. J. Eur. Union. 2004; str. L2:32; odstavka 6 in 7 [62]) v tabelah upošteva 1/4 meje detekcije kot predpostavljena vrednost. Teh vrednosti ne podajamo s pripadajočo negotovostjo in so v tabelah označene z znakom "†". Zaradi tega tudi negotovosti aritmetičnega povprečja za izbrano leto ne podajamo z apriorno negotovostjo, temveč z aposteriorno negotovostjo (tj. upoštevamo razsutje vrednosti). Takšni zapisi so v tabelah označeni z "x".

Spodnje meje aktivnosti drugih nedetektiranih radionuklidov nismo pisali v tabele. Pri izračunih mesečnih povprečij se prazna polja upoštevajo kot ničle.

Označba Sr-90/Sr-89 pomeni, da ni bila narejena analiza na Y-90. Ločitev za Y-90 se izvede samo v primerih, ko iz ponovitev meritev Sr-90/Sr-89 ugotovimo, da je izmerjena hitrost štetja res manjša od predhodno določene in je ta razlika hitrosti štetja posledica radioaktivnega razpada Sr-89. Poročane specifične aktivnosti Sr-89/Sr-90 se tako nanašajo le na koncentracije aktivnosti ali specifične aktivnosti Sr-90, saj kratkoživi Sr-89 ni prisoten v okolju.

1) Reka Sava (*Izveček poglavja Radioaktivnost v reki Savi*)

Tritij (H-3) je naraven kozmogeni radionuklid. Ker nastaja v zgornjih plasteh atmosfere, je prisoten v deževnici in vodotokih. Naravna koncentracija aktivnosti tritija v deževnici je od 0,2 kBq/m³ do 1,5 kBq/m³. Povprečje koncentracij aktivnosti tritija (ozadje) v reki Savi nad Krškim je 0,7 kBq/m³. Tritij je tudi redno prisoten v tekočinskih izpustih NEK, zaznamo ga tudi v reki Savi. Pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti tritija v reki Savi na postajah z neprekinjenim vzorčenjem (filtrirana voda) vzvodno in nizvodno od jezua NEK v letu 2023 je prikazan na sliki I1. Večletno povprečje koncentracij aktivnosti H-3 (od 2017 do 2022) v Brežicah je 3,1 kBq/m³, na vzorčevalni postaji nad jezom HE Brežice pa 3,3 kBq/m³. Zaradi pritokov Krke in Sotle, se Sava dodatno razredči, zato pričakujemo dodatno redčenje nizvodno. Večmesečno povprečje tritija v Jesenicah na Dolenjskem je 3,0 kBq/m³, kar je v okviru razsutja vrednosti v Brežicah in pred jezom HE Brežice, enako.

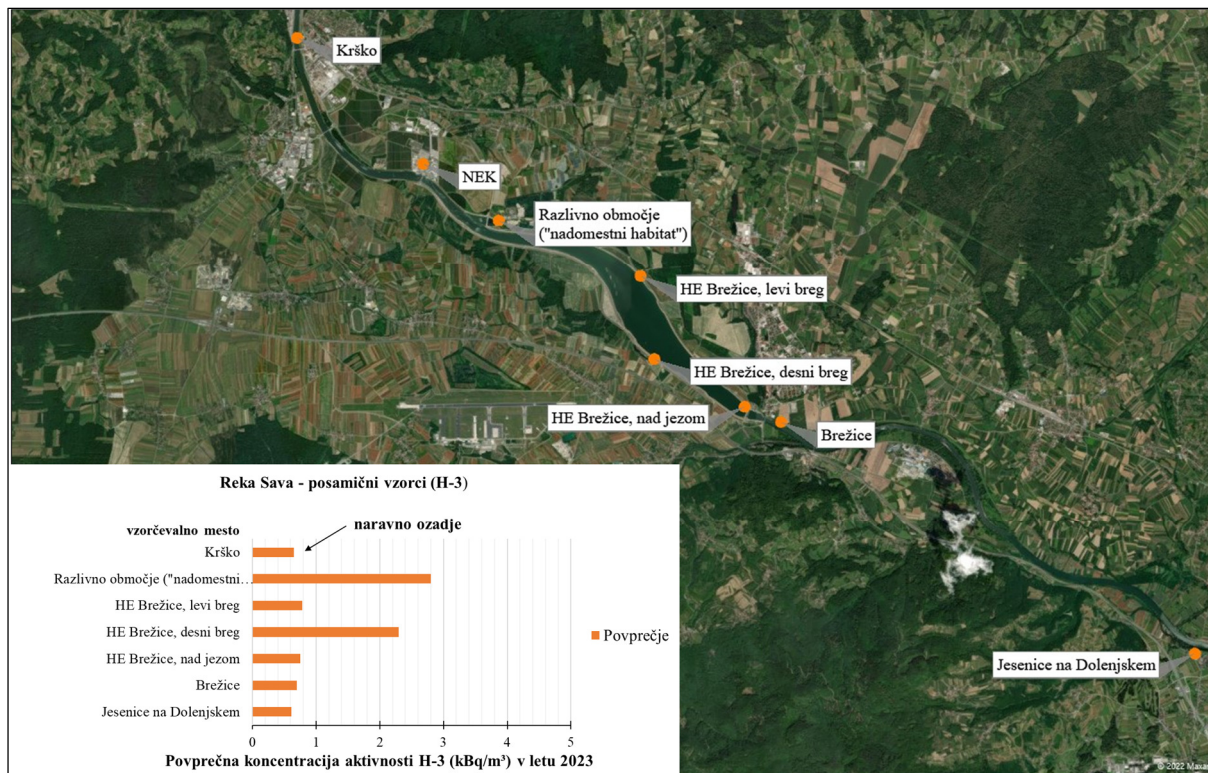


Slika I1: Na grafu je pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v reki Savi na postajah z neprekinjenim vzorčenjem vzvodno in nizvodno od jezua NEK v letu 2023.

Po izgradnji in umestitvi HE Brežice se je tok reke Save spremenil in časovni potek koncentracij aktivnosti H-3 na vzorčevalnih mestih v akumulaciji HE Brežice (levi breg, desni breg, nad jezum HE Brežice) ne sledi časovnemu poteku mesečnih izpustov H-3 iz NEK. Pojavljajo se občasna ujemanja z dnevnimi izpusti, pri čemer upoštevamo dvo- do tridnevni zamik med datumoma izpusta in vzorčenja. Enako je bilo tudi v letu 2023. Opazimo, da so koncentracije aktivnosti H-3 v reki Savi, vzorčene na desni strani najširšega dela akumulacije, višje od levega brega. Domnevamo lahko, da je tok počasnejši, a izrazitejši, po desni strani akumulacije do najširšega dela akumulacije, nato tok sledi matici reke do jezua HE Brežice. To lahko sklepamo tudi iz batimetričnih meritev globine reke Save, ki so bile opravljene v zavezitvi nad jezum HE Brežice [29]. Možen je tudi povraten tok v bazenu akumulacije, kar lahko poveča ali zniža redčenje onesnažil v akumulaciji. Na sliki I2 so prikazane koncentracije aktivnosti H-3 na lokacijah vzvodno in nizvodno od jezua NEK, kjer se vzorčujejo posamični vzorci (nefiltrirana voda).

V letu 2023 je bil vzorčen radioaktivni ogljik (C-14) v izpustih iz odpadnih merilnih rezervoarjev NEK. Prispevek C-14 smo ocenili iz meritev v četrtletnih vzorcih WMT, ki jih je opravil IRB. Četrtletne aktivnosti C-14 so bile od 0,003 GBq v drugem četrtletju do 0,03 GBq v zadnjem četrtletju. Četrtletni vzorci so sestavljeni iz posamičnih izpustov. Skupno letno izpuščeno aktivnost C-14 0,041 GBq smo izračunali kot vsoto četrtletnih vrednosti. Izpusti so za velikostni red nižji, kot je dolgoletno povprečje (1,4 GBq) od leta 2013 do 2022.

C-14 je bil merjen tudi v savski vodi in v ribah [22]. Na lokacijah na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice so bili odvzeti sestavljeni četrtletni vzorci. Povprečje izmerjenih koncentracij aktivnosti na levem bregu v pretočni akumulaciji je bilo 9,7 Bq/m³, na desnem pa 9,6 Bq/m³. Četrtletne izmerjene vrednosti se v okviru razsutja podatkov ne odmikajo od povprečij. Zato ne moremo sklepati na učinek delovanja NEK. Povprečne koncentracije aktivnosti so sicer nižje od trenutnih atmosferskih aktivnosti (trenutna splošna atmosferska aktivnost C-14 brez učinkov NEK je 231 Bq na kilogram ogljika). V primerjavi s prejšnjimi leti so specifične aktivnosti C-14 v ribah v letu 2023 v okviru negotovosti meritev enake kot pred leti. Specifična aktivnost C-14 v ribah je blizu trenutne atmosferske aktivnosti C-14.



Slika I2: Pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v letu 2023 v reki Savi na lokacijah vzvodno in nizvodno od jezua NEK, kjer se vzorčujejo posamični (mesečni ali četrletni) vzorci. Ozadje H-3 v Savi je 0,7 kBq/m³.

Radioaktivni jod (I-131), ki se uporablja tudi v medicini, je redno prisoten na vseh nadzornih mestih reke Save, tako vzvodno od elektrarne kot nizvodno v Brežicah in Jesenicah na Dolenjskem. V tekočinskih izpustih iz NEK je bil I-131 v letu 2023 zaznan. Letni izpust je bil 0,3 MBq. V letu 2023 je koncentracija aktivnosti I-131 na vseh vzorčevalnih mestih, enako kot prejšnja leta, zelo nihala in je včasih bila tudi pod mejo detekcije. V posamičnih vzorcih na različnih mestih vzorčenja reke Save v Posavju je bila tako od 0 Bq/m³ do 9,3 Bq/m³. Najvišje povprečje v Posavju je bilo v letu 2023 v pretočni akumulaciji na levem bregu, in sicer 2,4 Bq/m³. Ocenjena koncentracija aktivnosti (prirast koncentracije aktivnosti) I-131 iz elektrarne v reki Savi 350 m nizvodno od jezua NEK je bila 8,8 E-5 Bq/m³, v Brežicah 4,1 E-5 Bq/m³ in v Jesenicah na Dolenjskem 2,5 E-5 Bq/m³. Iz povedanega lahko sklepamo, da je učinek izpustov I-131 iz elektrarne, v reki Savi nedoločljiv oziroma zanemarljivo majhen v primerjavi z učinki izpustov iz bolnišnic. Prisotnost I-131 v rekah po Sloveniji ugotavljamo z meritvami v ločenem nadzoru v življenjskem okolju v RS [19]. Najvišja izmerjena koncentracija aktivnosti I-131 v letu 2023 je bila (5,5 ± 1,0) Bq/m³ v reki Savi v Brežicah. Najvišje povprečje dveh analiz 4,9 Bq/m³ je bilo prav tako izračunano za vzorca reke Save v Brežicah. V primerjavi s prejšnjimi leti so bile izmerjene koncentracije I-131 v rekah v letu 2023 nižje. V Savi v Lazah pri Ljubljani je bila vsebnost joda petkrat nižja, kot je dolgoletno povprečje. Prisotnost radioaktivnega joda v rekah izvira iz tekočinskih izpustov iz bolnišnic.

V vzorcih rib in talnega sedimenta na vseh vzorčevalnih mestih vzvodno in nizvodno od jezua NEK ni bila zaznana prisotnost I-131, kar je enako kot v preteklih letih.

Letni tekočinski izpust Cs-137 iz NEK v reko Savo je bil 1,2 MBq, kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo z izpusti v preteklih letih (2016-2022) in nižje kot dolgoletno povprečje 14 MBq od leta 2000. Vsebnost Cs-137 v reki Savi pripisujemo globalni kontaminaciji, saj je izračunani prirastek koncentracije aktivnosti Cs-137 350 m nizvodno od jezua NEK, ob upoštevanju letnih tekočinskih izpustov in povprečnega pretoka Save ter privzetku razredčitvenega razmerja na levem bregu v



Brežicah, enak $3,8 \text{ E-}4 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah pa $1,8 \text{ E-}4 \text{ Bq/m}^3$. Teh ocenjenih vrednosti ni mogoče ločiti od nehomogeno porazdeljene globalne kontaminacije.

Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Cs-137 v filtrirani vodi reke Save je bilo na referenčnem mestu v Krškem $0,17 \text{ Bq/m}^3$, v Jesenicah na Dolenjskem pa $0,05 \text{ Bq/m}^3$. V Brežicah in nad jezom HE Brežice Cs-137 v savski vodi ni bil zaznan v nobenem vzorcu. Na levem bregu največje razširitve pretočne akumulacije je bilo povprečje v nefiltrirani vodi $0,55 \text{ Bq/m}^3$, na desnem bregu pa $0,52 \text{ Bq/m}^3$. V nefiltrirani vodi v Krškem je bilo povprečje vsebnosti Cs-137 $1,2 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah pa $0,48 \text{ Bq/m}^3$.

Izmerjena koncentracija aktivnosti Cs-137 v rekah variira glede na lokacijo vzorčenja. Povprečna koncentracija aktivnosti Cs-137 v letu 2023 je bila od $0,06 \text{ Bq/m}^3$ v Krki do $0,96 \text{ Bq/m}^3$ v Muri. V Soči, Savi pri Brežicah in Kolpi Cs-137 v letu 2023 ni bil detektiran. V Krki pa je bil radioaktivni cezij, ki je posledica splošne kontaminacije, detektiran le v enem vzorcu [19].

Radioaktivni stroncij (Sr-90) je redno izmerjen v tekočinskih izpustih NEK. V letu 2023 je bila skupna izpuščena aktivnost v reko Savo $0,11 \text{ MBq}$, kar je podobno kot v zadnjih desetih letih ter nižje kot večletno povprečje $0,14 \text{ MBq}$. Mesečni vzorci so sestavljeni iz posamičnih izpustov. Tudi vsebnost Sr-90 v reki Savi pripisujemo globalni kontaminaciji, saj je izračunani prirastek koncentracije aktivnosti Sr-90 350 m nizvodno od jezua NEK, ob upoštevanju letnih tekočinskih izpustov in povprečnega pretoka Save ter privzetku razredčitvenega razmerja na levem bregu v Brežicah, enak $3,3 \text{ E-}5 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah pa je enak $1,5 \text{ E-}5 \text{ Bq/m}^3$. Teh prispevkov ni mogoče ločiti od nehomogeno porazdeljene globalne kontaminacije.

Povprečna koncentracija aktivnosti Sr-90 v filtrirani vodi na referenčnem mestu Krško je bila $1,2 \text{ Bq/m}^3$, nad jezom HE Brežice $1,3 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah $1,4 \text{ Bq/m}^3$ in v Jesenicah na Dolenjskem $2,1 \text{ Bq/m}^3$. Najvišja posamična koncentracija aktivnosti je bila $2,7 \text{ Bq/m}^3$ v Brežicah. V okviru razsutja podatkov so vrednosti primerljive med seboj, pri tem pa je potrebno upoštevati, da gre za merske izide različnih izvajalcev meritev. Koncentracije aktivnosti Sr-90 v posamičnih vzorcih nefiltrirane vode so v okviru negotovosti enake kot v neprekinjeno vzorčenih vzorcih filtrirane vode. Na vseh lokacijah so četrletna povprečja od $1,2 \text{ Bq/m}^3$ do $3,1 \text{ Bq/m}^3$. Najvišja posamična izmerjena vrednost je bila v nadomestnem habitatu $4,9 \text{ Bq/m}^3$.

Meritve izotopa stroncija Sr-90 so bile opravljene le na vzorcih vode, vzorčenih v Dravi, Muri in Savi (Ljubljana). Povprečna letna koncentracija aktivnosti Sr-90 v reki Muri od leta 2008 do 2022 je $2,3 \text{ Bq/m}^3$, v reki Dravi $1,3 \text{ Bq/m}^3$ in v Savi v Lazah pri Ljubljani $2,1 \text{ Bq/m}^3$. Izmerjene koncentracije aktivnosti Sr-90 v rekah v Sloveniji so v letu 2023 nižje kot v letu 2022 in kot v prejšnjih 14-ih letih [19]. Enake koncentracije aktivnosti stroncija, v okvirih razsutja podatkov, v vseh slovenskih rekah potrjujejo domnevo, da so izmerjene koncentracije stroncija predvsem posledica globalne kontaminacije in niso posledica izpustov NEK.

Večina stroncija je raztopljena v vodi. Povprečne koncentracije aktivnosti Sr-90 v filtrskem ostanku na vseh lokacijah (Krško, pretočna akumulacija, Brežice, Jesenice na Dolenjskem) so bile vsaj za red velikosti nižje kot v vodi. Na splošno so koncentracije aktivnosti stroncija v filtrirani rečni vodi vsaj 10-krat višje kot za cezij.

Na sliki I3 prikazujemo povprečne specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v obrežnih sedimentih vzvodno in nizvodno od jezua NEK. Vsebnosti obeh radionuklidov v sedimentih pripisujemo globalni kontaminaciji, saj tekočinski izpusti iz NEK prispevajo specifični aktivnosti $7,6 \text{ E-}4 \text{ Bq/kg}$ za Cs-137 in $6,5 \text{ E-}5 \text{ Bq/kg}$ za Sr-90 v talnih sedimentih 350 m nizvodno od jezua NEK ter $3,6 \text{ E-}4 \text{ Bq/kg}$ za Cs-137 in $3,1 \text{ E-}5 \text{ Bq/kg}$ za Sr-90 v Brežicah. Ocenjene vrednosti so zanemarljive v primerjavi s povprečnima specifičnima aktivnostima $5,6 \text{ Bq/kg}$ za Cs-137 in $0,3 \text{ Bq/kg}$ za Sr-90 v letu 2023 v Brežicah.

Na sliki I4 prikazujemo povprečne specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v ribah vzvodno in nizvodno od jezua NEK. Aktivnosti pripisujemo globalni kontaminaciji, saj sta prispevka radionuklidov zaradi tekočinskih izpustov iz NEK, $3,7 \text{ E-}4 \text{ Bq/kg}$ za Cs-137 in $9,5 \text{ E-}7 \text{ Bq/kg}$ za Sr-90, od dva do šest velikostnih redov nižja od izmerjenih vrednosti, $0,08 \text{ Bq/kg}$ za Cs-137 in $0,2 \text{ Bq/kg}$ za Sr-90, v ribah, ki so bile ulovljene pri Brežicah. V akumulaciji sta povprečni specifični aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v ribah $0,04 \text{ Bq/kg}$ in $0,08 \text{ Bq/kg}$.



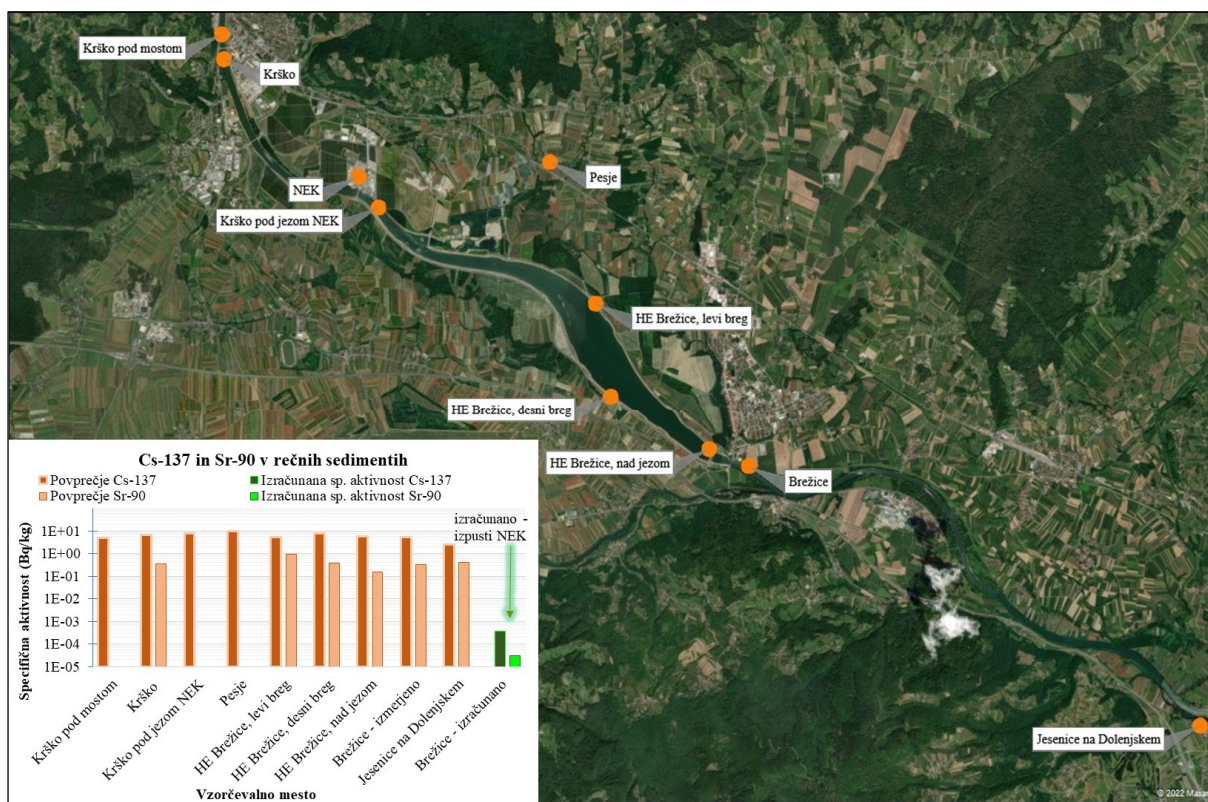
Drugi fisijski in aktivacijski produkti (Mn-54, Co-58, Co-60, Ag-110m) se v sledih redno pojavljajo v tekočinskih izpustih NEK. Skupna aktivnost teh radionuklidov v letu 2023 je bila vsaj pet velikostnih redov nižja od tritijeve. Cs-134 je bil v tekočinskih izpustih nazadnje izmerjen leta 2016. V zadnjih nekaj letih ni bil zaznan v okolju noben od naštetih radionuklidov. Nazadnje je bil detektiran Co-60 v letih 2003 in 2006 v vodi in sedimentu, Cs-134 pa v sedimentih leta 2002.

Naravni radionuklidi uranove (U-238, Ra-226 in Pb-210) in torijeve (Ra-228 in Th-228) razpadne vrste so bili redno zaznani v vseh vzorcih vode. V filtrirani savski vodi so bile na vseh odvzemnih mestih povprečne koncentracije aktivnosti U-238 od 1,2 Bq/m³ do 8,7 Bq/m³, Ra-226 od 1,1 Bq/m³ do 2,5 Bq/m³, Pb-210 od 0 Bq/m³ do 8,7 Bq/m³, Ra-228 od 0,8 Bq/m³ do 1,3 Bq/m³, Th-228 od 0 Bq/m³ do 0,8 Bq/m³ in Be-7 od 2,6 Bq/m³ do 115,7 Bq/m³. Koncentracije aktivnosti K-40 so od 29,5 Bq/m³ do 43,1 Bq/m³. Podobna so tudi povprečja koncentracij aktivnosti naravnih radionuklidov v nefiltrirani vodi: U-238: 1,0–7,2 Bq/m³, Ra-226: 1,6–3,3 Bq/m³, Pb-210: 11,4–28,1 Bq/m³, Ra-228: 1,3–4,8 Bq/m³, Th-228: 0,8–3,2 Bq/m³, Be-7: 18,2–80,6 Bq/m³ in K-40: 38,9–100 Bq/m³.

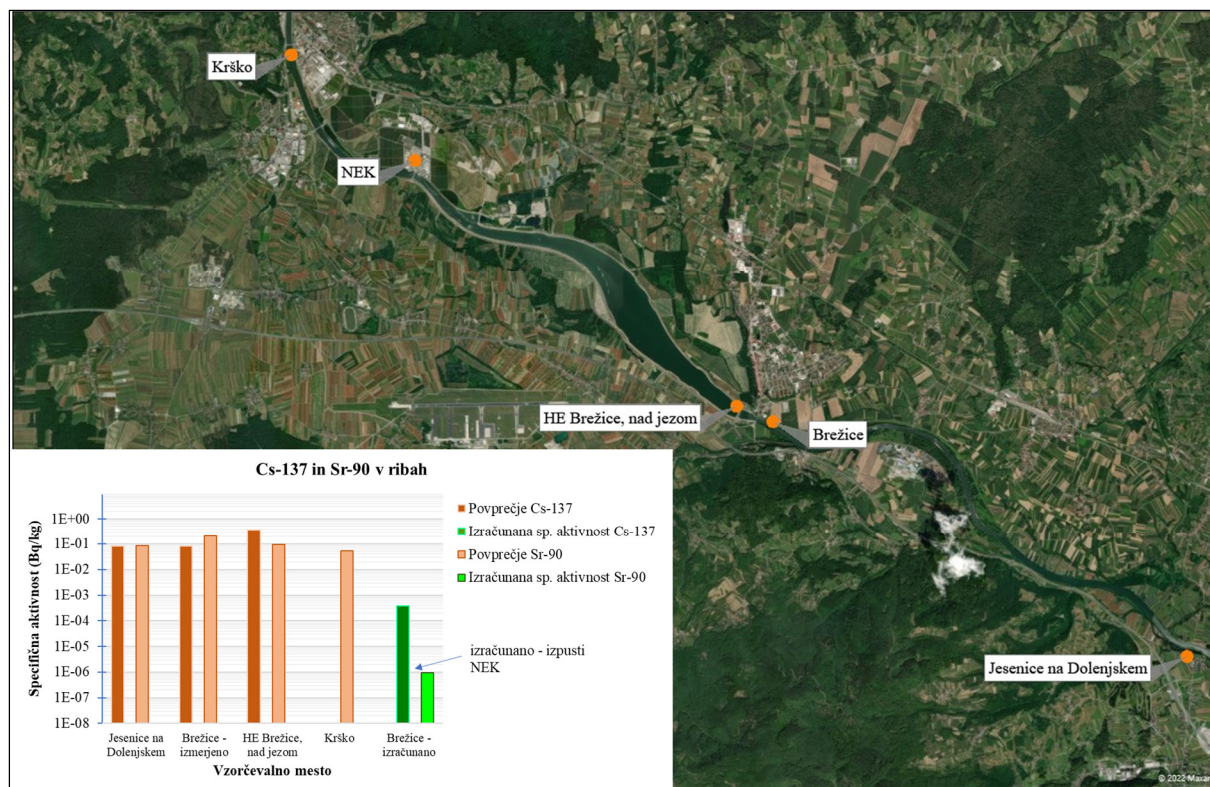
Koncentracije aktivnosti naravnih radionuklidov v vodi vzvodno in nizvodno od NEK so podobne izmerjenim v rekah po Sloveniji.

V sedimentih so bile na vseh odvzemnih mestih povprečne specifične aktivnosti U-238 od 25 Bq/kg do 44 Bq/kg, Ra-226 od 25 Bq/kg do 45 Bq/kg, Pb-210 od 31 Bq/kg do 85 Bq/kg, Ra-228 od 21 Bq/kg do 50 Bq/kg in Th-228 od 18 Bq/kg do 35 Bq/kg. Povprečne specifične aktivnosti K-40 so bile od 245 Bq/kg do 583 Bq/kg. V sedimentu je bil občasno zaznan Be-7 z razponom povprečij od 1,5 Bq/kg do 49 Bq/kg na vseh lokacijah.

V efluentih NEK naravni radionuklidi niso prisotni, zato ne ocenjujemo njihovega prispevka k obremenitvi okolja.



Slika I3: Specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v sedimentih v letu 2023. Povprečje Sr-90 v Krškem je bilo pod mejo detekcije. Skala je logaritemska.



Slika I4: Specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v ribah v letu 2023. Skala je logaritemska.

2) Vodovodi in črpaljšča (Izvlček poglavja Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi)

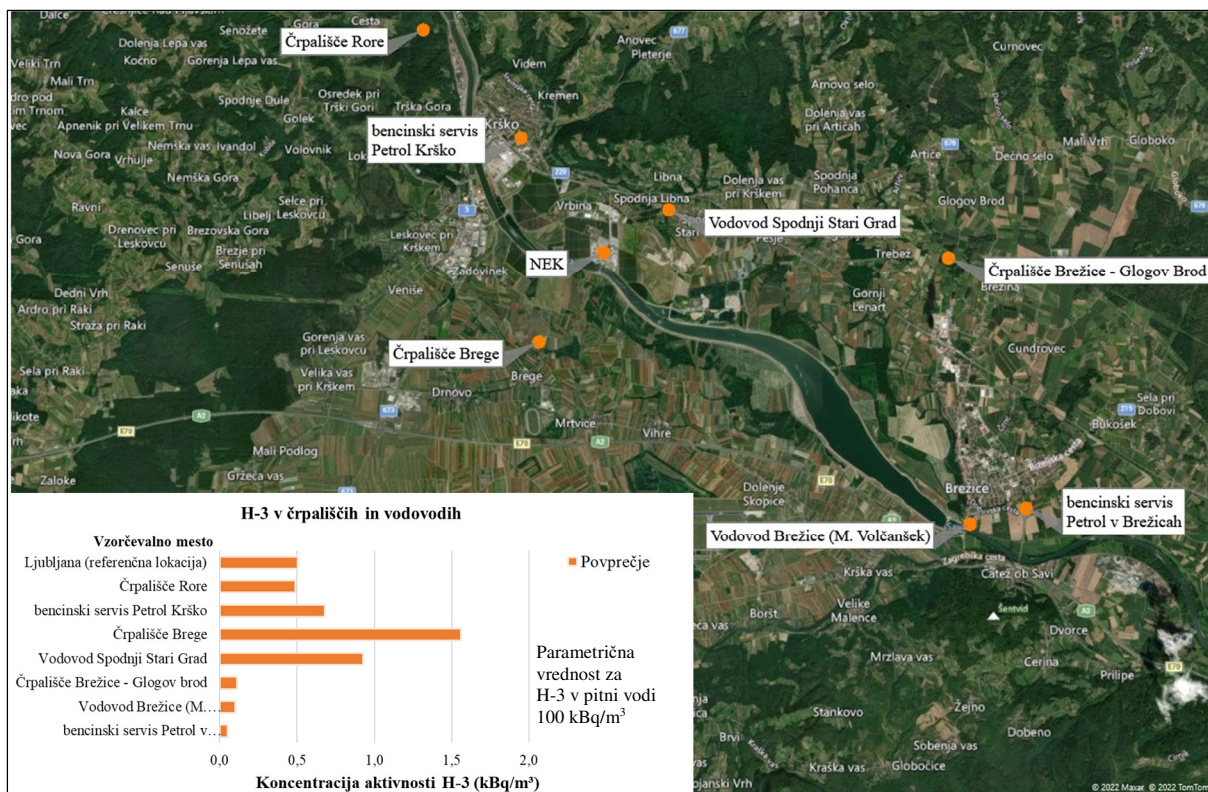
Med vsemi vzorčenimi mesti v Sloveniji so vsebnosti tritija najvišje na Bregah, kar je nedvomno posledica učinka NEK, vendar tudi najvišje vrednosti še vedno dosegajo manj kot 2 % parametrične vrednosti² direktive Evropske komisije za pitne vode. Poleg rednih mesečnih odvzemov vode na črpaljščih in vodovodih v občinah Krško in Brežice je bila tudi v letu 2023 analizirana voda s posamičnimi odvzemi na bencinskih servisih Petrol v Krškem in v Brežicah. Vrednosti za vodo iz brežiškega vodovoda so nizke. V vzorcih krškega vodovoda je bilo povprečje primerljivo s koncentracijo aktivnosti v ljubljanskem vodovodu. Pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v pitni vodi iz črpaljšč in vodovodov v krški in brežiški občini je na sliki I5. V legendi je za primerjavo dodana še koncentracija aktivnosti H-3 v vodovodu Ljubljana [20]. Koncentracija aktivnosti tritija v pitni vodi v okolici NEK je istega velikostnega reda kot drugod po Sloveniji.

Zaradi nadzora izmenjave vode med Savo in podzemno vodo na krško-brežiškem polju se že od začetka obratovalnega merilnega nadzora radioaktivnosti v okolici NEK preverja stanje tritija v vrtinah. Voda iz vrtin se ne uporablja niti kot pitna voda niti kot tehnološka voda, ampak le za sledenje izpustov iz NEK. Pregled koncentracij aktivnosti H-3 v vrtinah je na sliki I6.

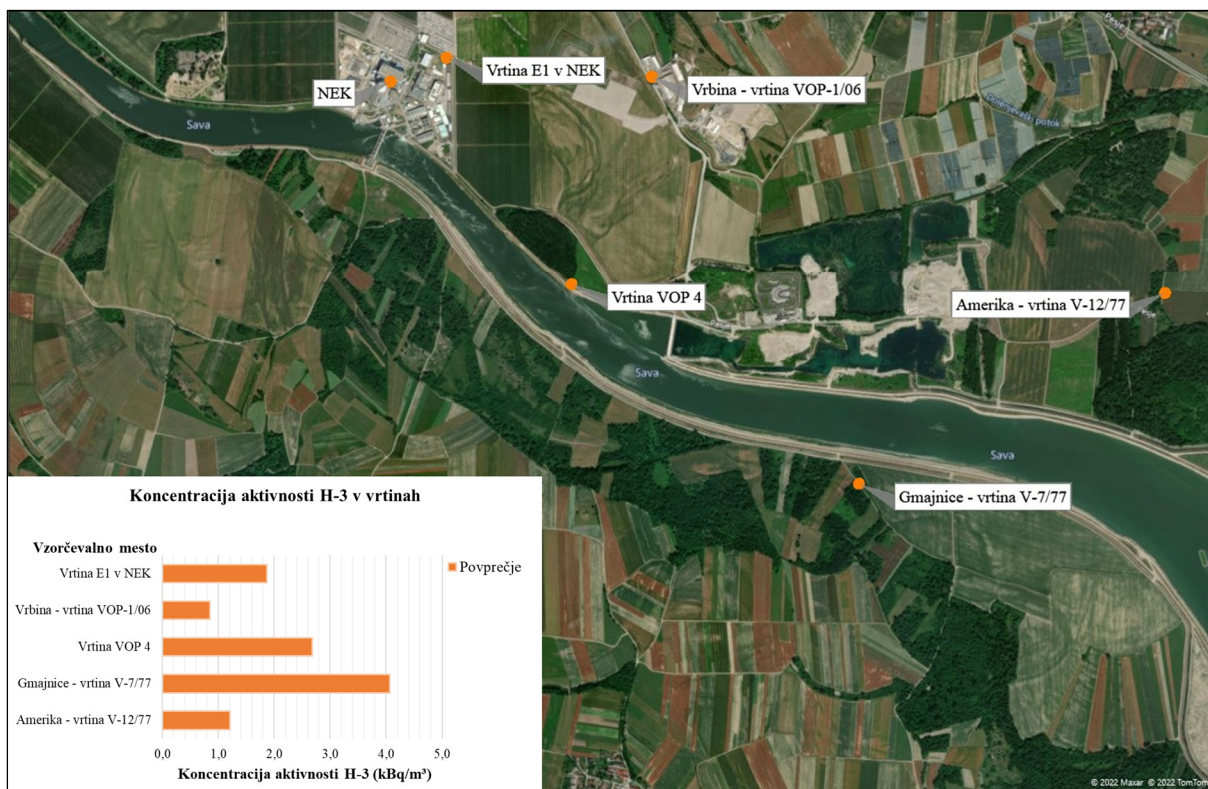
Radionuklida Cs-137 in Sr-90 sta nehomogeno razširjena na naših tleh. V majhnih količinah se pojavljata tudi v izpustih NEK, vendar je njun učinek na podtalnico zanemarljiv in neločljiv od globalne kontaminacije.

V mesečnih ali četrletnih vzorcih na vseh vzorčevalnih mestih v Krškem in Brežicah ter tudi na Hrvaškem I-131 ni bil zaznan v pitni vodi.

² Parametrična vrednost je vrednost radioaktivnih snovi v pitni vodi, nad katero organ, pristojen za varstvo pred sevanji, preveri, ali prisotnost radioaktivnih snovi v pitni vodi predstavlja tveganje za zdravje ljudi, na katero se je treba odzvati, ter po potrebi sprejme sanacijske ukrepe za izboljšanje kakovosti vode do take stopnje, da bodo izpolnjene zahteve za varovanje zdravja ljudi z vidika varstva pred sevanjem [9].



Slika I5: Pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v pitni vodi iz črpališč in vodovodov v krški in brežiški občini na lokacijah z neprekinjenim ali četrtletnim vzorčenjem. Za primerjavo prikazujemo tudi koncentracijo aktivnosti na referenčni lokaciji (Ljubljana).



Slika I6: Pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v vodi iz vrtin v okolici NEK v letu 2023. Voda iz vrtin se ne uporablja niti kot pitna voda niti kot tehnološka voda, služi le za sledenje izpustov iz NEK.



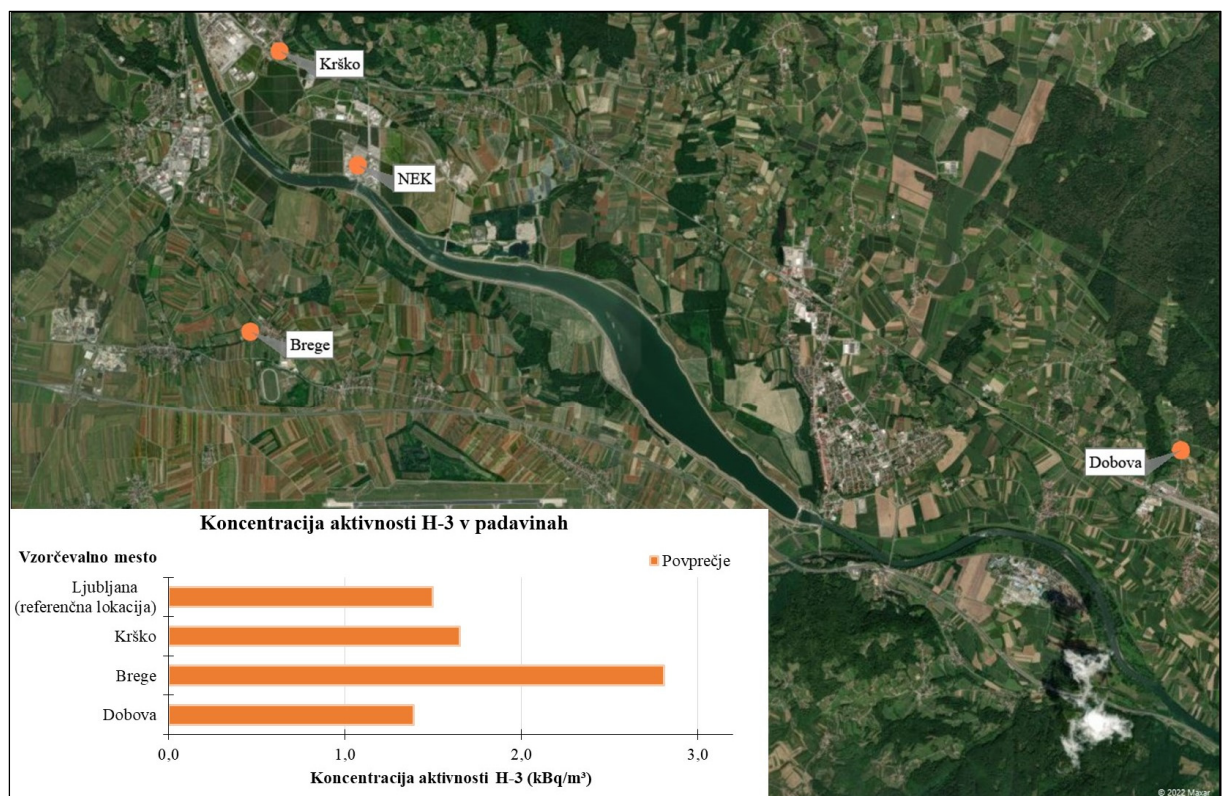
Koncentracije aktivnosti naravnega radionuklida K-40 so bile izmerjene na vseh vzorčevalnih mestih. Na Bregah je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti 57 Bq/m^3 , v vodovodu Spodnji Stari Grad 32 Bq/m^3 . Na drugih črpališčih in vodovodih je bila povprečna koncentracija aktivnosti K-40 25 Bq/m^3 , kar je v okviru statističnega razsutja podatkov enako kot v zadnjih petih letih. Domnevamo, da se na krško-brežiškem polju spreminja režim gnojenja kmetijskih površin nad območji vodonosnikov [49] in da gre za neposredni učinek padavinskega useda in višjih vodostajev Save.

Za vsa vzorčevalna mesta krškega in brežiškega vodovoda velja, da so povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti naravnega U-238 nizka, najvišje povprečje mesečnih vrednosti je bilo izmerjeno v vodovodu Brežice, in sicer $3,8 \text{ Bq/m}^3$. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-226 se giblje od $0,7 \text{ Bq/m}^3$ (vodovod Brežice) do $3,1 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Brege). Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Pb-210 je bilo od $2,4 \text{ Bq/m}^3$ v vodi iz vodovoda Brežice, do $7,3 \text{ Bq/m}^3$ v vodi iz črpališča Brežice. V Ljubljani je bila koncentracija aktivnosti Pb-210 $0,3 \text{ Bq/m}^3$. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-228 v črpališču Brežice je bilo $0,4 \text{ Bq/m}^3$, črpališču Rore $0,6 \text{ Bq/m}^3$, v vodovodu Spodnji Stari Grad pa $0,6 \text{ Bq/m}^3$ in na Bregah $0,9 \text{ Bq/m}^3$. Povprečja mesečnih koncentracij Th-228 se gibljejo med $0,3 \text{ Bq/m}^3$ (vodovod Brežice) in $0,4 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Brežice). Be-7 je bil občasno detektiran v vseh črpališčih in vodovodih v Krškem in Brežicah. Povprečje mesečnih koncentracij Be-7 je bilo $0,7 \text{ Bq/m}^3$ v vodovodu Brežice, najvišje povprečje pa je bilo v črpališču Brege in sicer 5 Bq/m^3 .

V zračnih in tekočinskih izpustih NEK naravni radionuklidi niso prisotni, zato ne ocenjujemo njihovega prispevka k obremenitvi okolja.

3) Padavinski in suhi usedi (*Izvleček poglavja Radioaktivnost v usedih*)

V letu 2023 je bila letna količina padavin v Ljubljani 1 827 mm, v Krškem 1 344 mm, na Bregah 1 355 mm in v Dobovi 1 285 mm. Letna količina padavin v okolici NEK je bila v letu 2023 27 % nižja kot v Ljubljani. Količine padavin po lokacijah so v okvirih razsutja podatkov primerljive z zadnjimi leti. Razsutje letne količine padavin je $\pm 88 \text{ mm}$ v Ljubljani, v okolici NEK pa 44 mm. Variacija padavin po mesecih je še izrazitejša. Sušni meseci se pojavljajo praktično vsako leto, vendar ne vedno v istem letnem času.



Slika I7: Pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v padavinah v okolici NEK in Ljubljani v letu 2023



Koncentracija aktivnosti tritija v padavinah močno variira in le koncentracije aktivnosti nad 2 kBq/m^3 bi lahko pripisali izpustom iz NEK [55]. V letu 2023 je bila koncentracija aktivnosti tritija v padavinah štirikrat višja od 2 kBq/m^3 , in sicer na Bregah. Povprečne mesečne koncentracije aktivnosti H-3 v padavinah so na sliki I7.

Učinek NEK na koncentracije aktivnosti tritija v padavinah v neposredni bližini elektrarne je opazen, če pogledamo letna povprečja, ki so na Bregah in v Krškem (Stara Vas) vsako leto višja kot v Dobovi in Ljubljani. Koncentracije aktivnosti tritija na Bregah so bile spomladi in jeseni višje od povprečne vrednosti, kar se sklada z zračnimi izpusti, ki so bili takrat najvišji v letu. Povezanost med zračnimi izpusti in izmerjeno koncentracijo aktivnosti H-3 je letos zaznana na Bregah in Stari vasi, medtem ko je bila povezanost majhna oziroma neznatna v Ljubljani in na Dobovi.

Najvišji mesečni padavinski used H-3 je bil izmerjen na Bregah $0,45 \text{ kBq/m}^2$ v mesecu januarju. Vrednosti in časovni poteki usedov za Ljubljano, Dobovo, Krško in Brege so v okviru razsutja vrednosti primerljivi, vrhovi se skladajo z meseci, ko je bilo padavin več.

Najvišje izmerjene vrednosti padavinskega useda za Cs-137 so bile v Ljubljani $0,03 \text{ Bq/m}^2$ julija, na Bregah $0,07 \text{ Bq/m}^2$ avgusta, v Krškem $0,03 \text{ Bq/m}^2$ junija in v Dobovi $0,03 \text{ Bq/m}^2$ julija, v vseh primerih pri zmerni ali večji količini padavin. V takšnih primerih povišanje pripisujemo izpiranju iz zraka, v zimskih mesecih pa še kurjenju s trdimi gorivi. Used Cs-137 je na vseh lokacijah primerljiv z vrednostmi iz predčernobilskega obdobja med letoma 1982 in 1985.

V letu 2023 so bile koncentracije aktivnosti Sr-90 večinoma pod mejo detekcije, z izjemo poletja in nekaterih jesenskih vzorcev, kjer je bil Sr-90 zaznan v sledih. Nizki zračni izpusti Sr-90 iz NEK kažejo, da je prisotnost tega radionuklida posledica vetrovne resuspenzije delcev iz zemlje. Prisotnost Cs-137 skupaj s Sr-90 v večini vzorcev dodatno potrjuje, da oba izvirata iz splošne kontaminacije tal.

4) Zrak (Izveček poglavja Zrak)

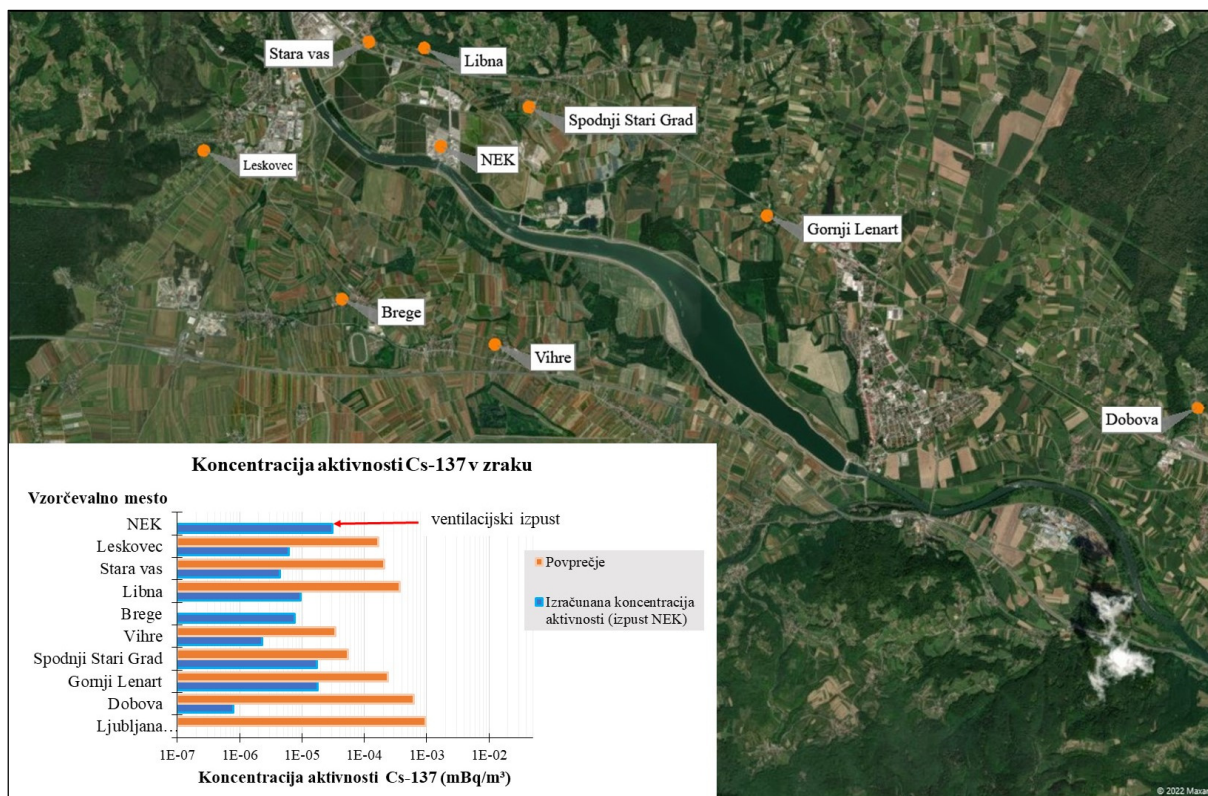
V zračnih izpustih iz NEK je največ tritija H-3 ($7,4 \text{ TBq}$) in C-14 ($0,13 \text{ TBq}$). Količino izpusta merimo na izviru. Njuno prisotnost v okolju ocenjujemo z uporabo modela razširjanja snovi po zraku na podlagi meritev na izviru.

Med obratovanjem so bili v zračnih izpustih NEK v letu 2023 zaznani izpusti I-131, I-133, Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Se-75, Te-127m, Cs-137 in Sr-90, vendar ti radionuklidi z izjemo zadnjih dveh niso bili detektirani na nobenem od sedmih merilnih mest v okolici NEK in v Ljubljani. Izračunane koncentracije aktivnosti Cs-137 in Sr-90 so na vzorčevalnih postajah najmanj tri rede velikosti nižje od izmerjenih vrednosti. Cs-137 in Sr-90 sta v okolju tako pretežno posledica splošne kontaminacije.

Povprečne mesečne koncentracije aktivnosti Cs-137 na lokacijah v okolici NEK v letu 2023 so nižje kot drugod po Sloveniji. Domnevamo, da je prisotnost Cs-137 v Sloveniji v zraku predvsem posledica uporabe trdih goriv (drva, briketi, peleti). Na sliki I8 je pregled koncentracij aktivnosti Cs-137 (izmerjenih in izračunanih) na lokacijah v okolici NEK. Za primerjavo je dodana še vrednost za Ljubljano.

Meritve stroncija (Sr-90) v okolju se izvajajo v trimesečnih sestavljenih vzorcih v Stari vasi. Povprečna koncentracija aktivnosti v letu 2023 je bila $1,3 \text{ E-4 mBq/m}^3$. Radionuklid Sr-89 v letu 2023 v zračnih izpustih NEK ni bil zaznan.

Radionuklid I-131 v letu 2023 ni bil detektiran na nobenem od sedmih merilnih mest v okolici NEK, kjer so postavljene kombinirane črpalke (aerosolni in ogljeni filtri). Tudi zmogljivejše aerosolne črpalke na mestih v Dobovi (nadzor radioaktivnosti v okolju v okolici NEK) in Ljubljani (nadzor radioaktivnosti v okolju v RS) niso pokazale prisotnosti I-131 v zraku.



Slika I8: Pregled povprečnih mesečnih in izračunanih koncentracij aktivnosti Cs-137 v zraku v okolici NEK in Ljubljani v letu 2023. Skala je logaritemska.

Meritve naravnih radionuklidov v aerosolih v vzorcih iz okolice NEK kažejo prisotnost radionuklidov, ki jih merimo v okviru nadzornih meritev tudi na drugih mestih v Sloveniji. Pri tem velja, da se povprečni koncentraciji aktivnosti Be-7 in Pb-210 v letu 2023 v okviru negotovosti povprečja dobro ujemata na vseh merilnih mestih v okolici NEK in Ljubljani. Povprečna koncentracija aktivnosti Be-7 v letu 2023 v okolici NEK je bila 2,5 mBq/m³, Pb-210 pa 0,5 mBq/m³. V Ljubljani sta bili povprečni koncentraciji 3,6 mBq/m³ in 0,8 mBq/m³. Za kozmogeni Be-7 ugotavljamo, da je bila v okviru negotovosti povprečij na vseh vzorčevalnih mestih v okolici NEK, Murski Soboti in v Ljubljani izmerjena primerljiva vrednost, izjema je lokacija Predmeja, kjer so vrednosti za velikostni red višje, kar je najverjetneje lastnost dobro prevetrene lokacije in posledično višjih koncentracij v zraku. Podobno velja tudi za Pb-210. Taka ugotovitev je pričakovana predvsem za lokacije s podobnim padavinskim režimom in ustrezno podobnim izpiranjem aerosolov iz ozračja ter prehajanjem zračnih mas iz višjih plasti atmosfere v nižje.

Pri drugih naravnih radionuklidih (izotopi uranove in torijeve razpadne verige ter K-40) so bile razlike med posameznimi merilnimi mesti v okolici NEK večje. Neujemanje lahko pripišemo različni sestavi tal, bližini obdelovalnih polj ter neupoštevanju izhajanja radona iz vzorca pri meritvah Ra-226 za vzorce iz Predmeje in Murske Sobotice ter uporabi zračnih črpalk z različnimi pretoki. Meritve koncentracije aktivnosti radionuklidov v aerosolih v Ljubljani se zaradi najbolj zmogljive črpalke v primerjavah uporabljajo kot referenčne.

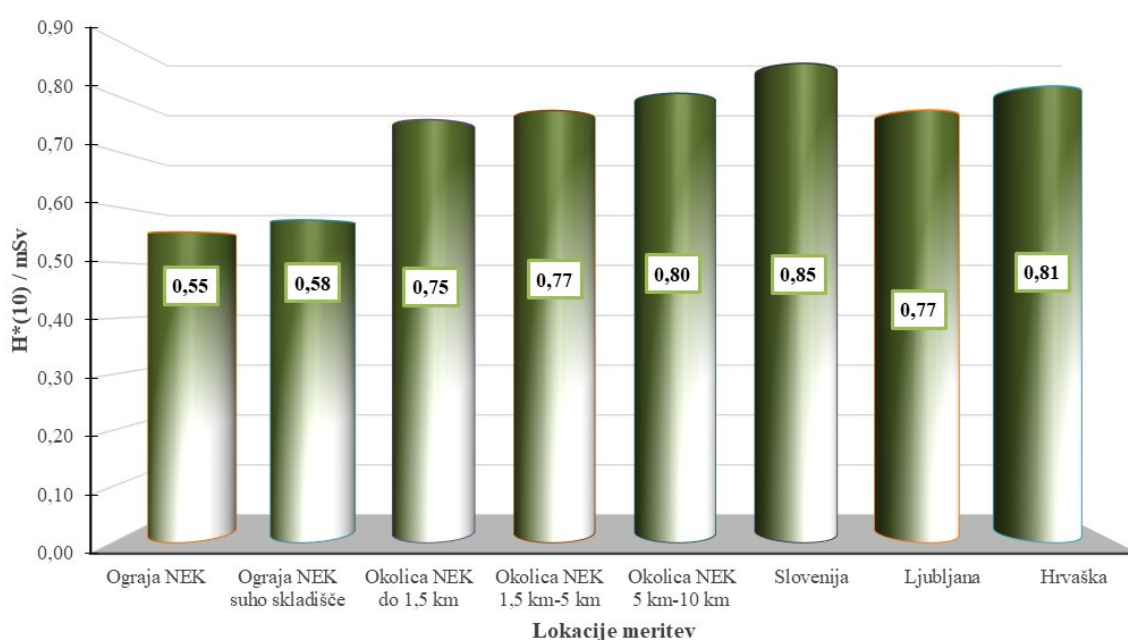
NEK pri svojem delovanju v zrak in reko Savo ne izpušča naravnih radionuklidov, zato ne ocenjujemo njihovega prispevka k obremenitvi okolja.



5) Zunanja izpostavljenost sevanju (*Izveček poglavja Zunanje sevanje*)

Zunanje sevanje

Zunanje sevanje, ki mu je izpostavljeno prebivalstvo v okolici NEK, vključuje kozmično sevanje, sevanje naravnih radionuklidov v ozračju (predvsem razpadnih produktov radona), sevanje iz radioaktivnega oblaka ob izpustu radioaktivnih snovi iz NEK v okolje in zunanje sevanje zaradi useda, ki se odloži po prehodu oblaka, ter zunanje sevanje zaradi naravnih in umetnih radionuklidov v zemlji. Mreža TLD meri skupno dozo sevanja gama naravnih radionuklidov v okolju (zemlja, gradbeni materiali), direktne ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja ter prispevka globalne kontaminacije s Cs-137. Ker okoljski TLD ne merijo doze nevtronske komponente kozmičnega sevanja, smo jo izračunali z uporabo programa EXPACS ([75], [76], [77]). Program omogoča izračun doze, ki je posledica posameznih komponent kozmičnega sevanja, vključno z nevtronsko komponento za poljubno geografsko dolžino in širino.



Slika I9: Prikaz povprečnih letnih okoljskih doznih ekvivalentov $H^*(10)$, izmerjenih v okolici NEK, na referenčni lokaciji v Ljubljani in povprečne ekvivalente, izmerjene na Hrvaškem v okviru programa nadzora radioaktivnosti v okolici NEK, ter povprečnih doznih ekvivalentov, izmerjenih v okviru meritev radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji za leto 2023.

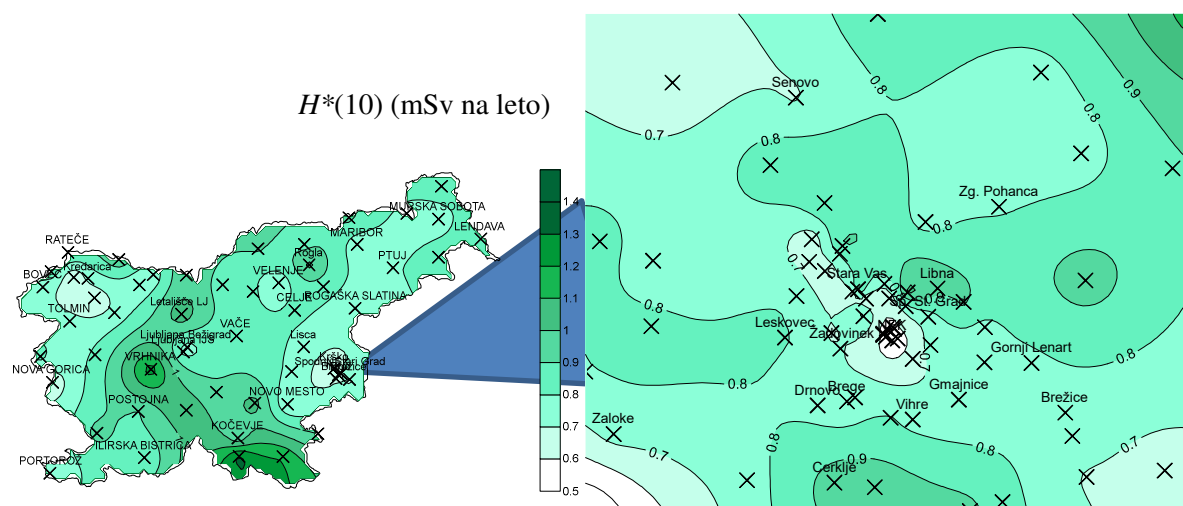
Na sliki I9 prikazujemo povprečne letne okoljske dozne ekvivalente $H^*(10)$, izmerjene v okolici NEK, na referenčni lokaciji v Ljubljani in povprečne ekvivalente, izmerjene na Hrvaškem v okviru programa nadzora radioaktivnosti v okolici NEK ter povprečne ekvivalente, izmerjene v okviru meritev radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji. Izmerjeni letni okoljski dozni ekvivalenti se v okviru razsutja vrednosti ne odmikajo od večletnega povprečja na posameznih lokacijah. Najnižji letni $H^*(10)$ je ob ograji NEK, saj so tam prodnata tla z odstranjeno plastjo zemlje. Zunanje sevanje iz zemljišča dodatno slabijo še asfaltirane površine in zgradbe znotraj ograje NEK. Tudi dodatni dozimetri ob zahodni ograji NEK, kjer je suho skladišče izrabljenega goriva, so pokazali povprečen letni dozni ekvivalent ($0,58 \pm 0,004$) mSv, kar je v okviru stresanja podatkov primerljivo z letnim doznim ekvivalentom, ki smo ga izmerili s TLD na ograji NEK, ($0,55 \pm 0,03$) mSv. To kaže, da je prispevek NEK k dozni obremenitvi v okolici zaradi sevanja iz objektov NEK zanemarljiv in nemerljiv.



Meritve v Sloveniji kažejo, da je povprečni letni okoljski dozni ekvivalent v okolici NEK sistematično nekoliko nižji kot v povprečnem življenjskem okolju v Sloveniji. To pripisujemo raznolikosti slovenske pokrajine, orografiji, sestavi tal, debelini snežne odeje, neenakomernemu usedu Cs-137 po nesreči v jedrskem reaktorju v Černobilu ter drugim pojavom in pogojem v okolju, kar vpliva na dozo zunanjega sevanja. Tudi v krajih v okolici NEK so določene raznolikosti pokrajine, dodatno pa k nihanjem učinkovitih doz izmerjenih s TLD na bližnjih lokacijah prispevajo še lokalne posebnosti pri postavitvi dozimetrom v okolju (travniki, polje, gozd, asfaltirane površine, bližine zgradb, temperatura tal itd.). Na sliki I10 prikazujemo izodoze³ $H^*(10)$ na zemljevidu Slovenije. Povečano je prikazano območje v okolici NEK.

Neprekinjene meritve $H^*(10)$ s 14 merilniki hitrosti doze v okolici NEK so v letu 2023 dale povprečno vrednost ($0,8 \pm 0,1$) mSv na leto (v razponu od 0,64 mSv do 0,97 mSv), kar je v okviru razsutja merskih vrednosti enako kot letni dozni ekvivalent, dobljen s TL-dozimetri ($0,78 \pm 0,10$) mSv.

Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent pri 64 merilnikih po Sloveniji, ki so pod nadzorom URSJV, je bil v letu 2023 ($0,78 \pm 0,16$) mSv v razponu od 0,46 mSv do 1,20 mSv. V okviru razsutja merskih vrednosti je primerljiv s tem, kot ga kažejo meritve s TLD na območju Slovenije ($0,85 \pm 0,15$) mSv. V primerjavi s prejšnjimi leti ne opazimo statistično značilnih odmikov.



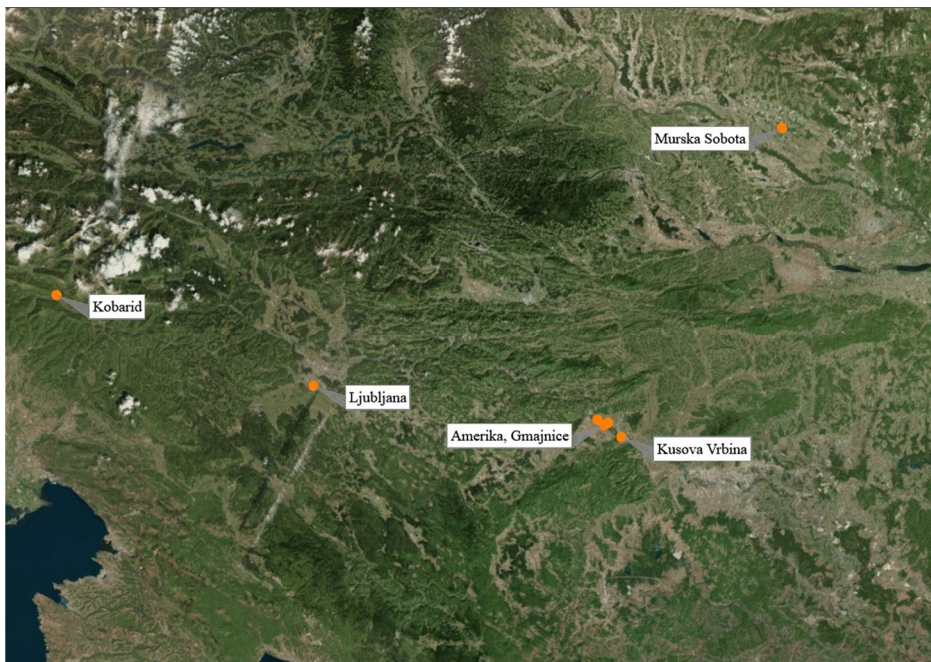
Slika I10: Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ po Sloveniji in v okolici NEK v letu 2023

Za meritve zunanjega sevanja v Sloveniji je v vseh primerih značilno zmanjševanje letnega okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ s časom. Zmanjševanje je bilo hitro predvsem v prvih letih po černobilski nesreči, to je po letu 1986. Tak potek se nadaljuje tudi v letu 2023. Vzrok je razpad usedlih kratkoživih sevalcev gama, ki so v začetnem obdobju največ prispevali k zunanjemu sevanju, in premikanju Cs-137 v globlje plasti zemlje. Letni okoljski dozni ekvivalenti zaradi globalne kontaminacije s Cs-137 na lokacijah v okolici NEK, ocenjeni pri predpostavki realne globinske porazdelitve Cs-137, so v območju med 0,003 mSv in 0,023 mSv. To je primerljivo z vrednostmi na lokacijah, kjer se zemlja vzorčuje v okviru nadzora radioaktivnosti v Republiki Sloveniji. Tam so ocenjene letne doze $H^*(10)$ v območju od 0,014 mSv do 0,072 mSv.

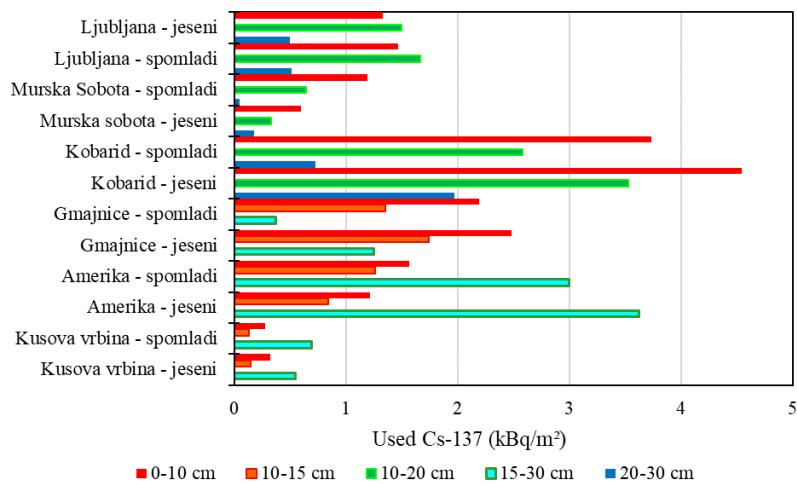
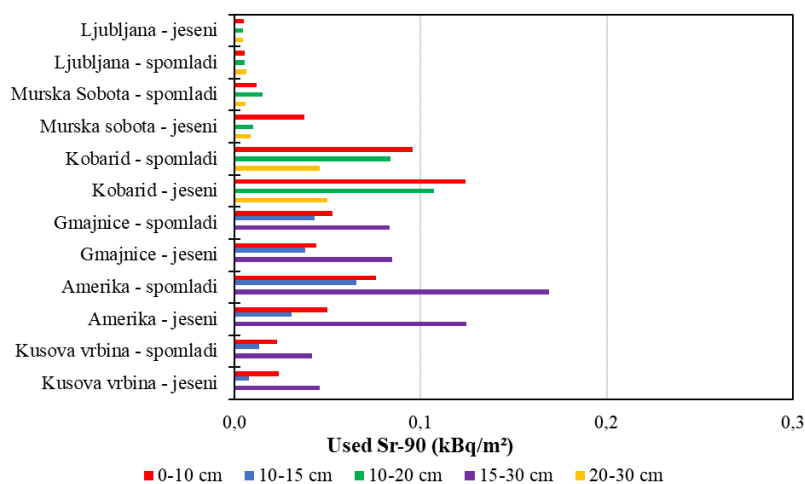
Zemlja

Vzorčenje zemlje poteka na poplavnih področjih, kjer sta usedanje iz zraka in poplavljanje prenosni poti, po katerih lahko izpusti NEK dosežejo mesto vzorčenja. Poleti med 3. in 4. avgustom 2023 so bile v Sloveniji obsežne poplave, v katerih je močno poplavljal tudi Sava. Ta se je nizvodno od jezua NEK razlivala po širšem področju. Aktiviral se je tudi visokovodni preliv HE Brežice. Poplavljen je bila vrbina na levem in desnem bregu Save. Poplave so obsežno pokrile tako Ameriko, Gmajnice kot Kusovo Vrbino.

³ Izodoze so krivulje, ki povezujejo področja z enako letno učinkovito dozo $H^*(10)$.



Slika I11: Lokacije vzorčenja zemlje v okolici NEK (Gmajnice, Amerika, Kusova Vrbina) in po Sloveniji (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) v letu 2023



Slika I12: Usedi Sr-90 in Cs-137 po Sloveniji in v okolici NEK v letu 2023



Specifične aktivnosti Cs-137 v zemlji so bile v letu 2023 od 2,4 Bq/kg v globinah 15–30 cm do 40 Bq/kg v globini 5–10 cm v Gmajnicah, od 15 Bq/kg v globinah 0–5 cm do 23 Bq/kg v globini 10–15 cm v Ameriki in od 2,4 Bq/kg v globinah 5–10 cm do 4,7 Bq/kg v globini 15–30 cm v Kusovi Vrbini. Specifične aktivnosti Cs-137 so statistično najvišje v Gmajnicah, najnižje pa v Kusovi Vrbini. Iz rezultatov meritev je razvidno, da gre za precejšnje razsutje specifičnih aktivnosti Cs-137 na mikrolokaciji v posameznih letih. Nihanja vrednosti lahko pripišemo nehomogenosti svežega nanosa po černobilski nesreči in prerazporeditvi useda na mikrolokaciji. Prerazporeditev je posledica hidrogeoloških procesov, ki vplivajo na prodiranje Cs-137 v zemljino. To ugotovitev lahko podkrepimo z ugotovljenim premikanjem težišča nanosa v globino na lokaciji Kusova Vrbina. Dva izrazita skoka v globini težišča sta vsekakor posledica poplav, ki so povzročile dodaten nanos sveže mivke. To je tudi razlog, da je prodiranje Cs-137 v zemljino navidezno hitrejše kot na drugih dveh lokacijah. Začetna globina težišča nanosa na lokaciji Kusova Vrbina, upoštevajoč podatke od leta 1992, je ustrezno večja. Dodatno lahko ugotovimo, da se šele v 10-letnem drsečem povprečju izpovpreči lokalna nehomogenost useda in vpliv hidrogeoloških procesov v zgornjih plasteh. Na slikah I11 in I12 prikazujemo usede Cs-137 in Sr-90 po globinah za lokacije v okolici NEK, za primerjavo pa so dodani še usedi po Sloveniji. Opazimo lahko, da so usedi v okolici NEK v okviru razsutja primerljivi s podatki po Sloveniji.

V izpuhu NEK so se poleg kratkoživih radionuklidov v letu 2023 pojavili tudi Co-57, Co-58, Co-60, Se-75, I-131, I-133, Te-127m in Cs-137, katerih prisotnosti v usedu zemlje nismo zaznali.

Noben od radionuklidov, ki so bili prisotni v tekočinskih izpustih (Mn-54, Co-58, Co-60, Sr-90, Ag-110m, I-131, in Cs-137), ni bil izmerjen v vzorcih zemlje. Izjemi sta Sr-90 in Cs-137, pri katerih pa izmerjene specifične aktivnosti na lokacijah okrog NEK v primerjavi z vrednostmi na referenčni lokaciji v Ljubljani in drugod po Sloveniji kažejo, da nista posledici izpustov iz NEK, temveč zgolj globalne kontaminacije.

Naravni radionuklidi, potomci uranove in torijeve razpadne verige ter K-40 so v zemlji porazdeljeni enakomerno, razen Pb-210, ki se useda iz zraka kot potomec Rn-222. Potomca iz torijevega razpadnega niza Ra-228 in Th-228 sta v ravnovesju v vseh globinah in na vseh lokacijah. U-238 in Ra-226 nista v ravnovesju, ker je uran v vodi topnejši od radija in se zato bolje izpira. Rezultati meritev kažejo, da so specifične aktivnosti potomcev uranove in radijeve razpadne vrste ter K-40 na lokacijah, ki so izpostavljene rednim poplavam, nižje. Tako je bilo uteženo povprečje specifičnih aktivnosti K-40 do globine 30 cm v Kusovi Vrbini 336 Bq/kg, v Gmajnicah 357 Bq/kg, v Ameriki pa 428 Bq/kg. Utežena povprečja U-238 za vzorčevalne lokacije so od 25 Bq/kg do 33 Bq/kg, za Ra-226 od 36 Bq/kg do 41 Bq/kg, Ra-228 in Th-228 pa od 27 Bq/kg v Kusovi Vrbini do 34 Bq/kg v Ameriki. Rezultati meritev specifičnih aktivnosti naravnih radionuklidov v zemlji (K-40, U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228) so primerljivi v okviru razsutja podatkov s povprečnimi specifičnimi aktivnostmi, 420 Bq/kg za K-40, 33 Bq/kg za U-238 in 45 Bq/kg za Th-232, ki jih za države južne Evrope navaja UNSCEAR [42].

V efluentih Nuklearne elektrarne Krško naravni radionuklidi niso prisotni, zato njihov prispevek k obremenitvi okolja ne ocenjujemo.

6) Hrana (*Izvleček poglavja Radionuklidi v hrani*)

V hrani nismo zaznali radionuklidov, ki so bodisi v zračnih bodisi v tekočinskih izpustih NEK. Zaznali smo C-14, Cs-137 in Sr-90, ki pa so pretežno kozmogenega izvora ali posledica globalne kontaminacije. Meritve specifičnih aktivnosti H-3 v hrani niso v programu nadzora radioaktivnosti v okolici NEK. Za oceno vsebnosti organsko vezanega tritija v vegetaciji je bila v letu 2023 opravljena študija [24].

C-14 se v rastline vgrajuje v procesu fotosinteze, v živalski in človeški organizem pa prehaja predvsem z zaužitjem rastlinske hrane. Specifična aktivnost C-14 je bila v bližnji okolici NEK v letu 2023 izmerjena v koruzi, pšenici, jabolkih, travi, senu in hruškah in sicer v juniju in septembru. Med povprečnimi vsebnostmi C-14 v hrani in rastlinju, merjenih v juniju in septembru na istih lokacijah, ni statistično značilnih razlik (povprečni kvocient specifičnih aktivnosti C-14 je 1,02). Najvišja izmerjena specifična aktivnost C-14, (252 ± 8) Bq na kilogram ogljika je bila izmerjena v travi (lokacija Q, ob vzhodni ograji NEK) v septembru [21]. Izmerjena specifična aktivnost C-14 v hrani v neposredni bližini



NEK je pričakovano rahlo nad povprečjem. Sicer so aktivnosti C-14 v hrani, ki je pridelana ob ograji NEK približno za dva odstotka višje kot drugod.

Izračunane specifične aktivnosti radionuklidov, ki so v okolje prišli po zračnih izpustih iz NEK, so vsaj štiri rede velikosti nižje od izmerjenih specifičnih aktivnosti v hrani. S tem razložimo, da vsebnosti Cs-137 in Sr-90 v hrani pripisujemo globalni onesnaženosti. Specifične aktivnosti radionuklidov v hrani v okolici NEK in po Sloveniji močno variirajo, kar je posledica neenakomerne globalne onesnaženosti, orografije, sestave tal in drugih značilnosti površja Republike Slovenije. V okviru negotovosti povprečij po skupinah hranil so specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90, vzorčene v okolici NEK in Sloveniji, primerljive.

Med naravnimi radionuklidi je v hrani najbolj zastopan K-40, ki je vnesen po različnih prenosnih poteh iz zemlje, umetnih gnojil in vode, prisotni pa so tudi radionuklidi iz razpadnih vrst U-238 in Th-232.

V letu 2023 je bila specifična aktivnost K-40 v hrani, pridelani na krško-brežiškem polju, od 30 Bq/kg (jagode) do 382 Bq/kg (ječmen), v hrani, vzorčeni drugod po Sloveniji, pa od 12 Bq/kg (jabolka) do 133 Bq/kg (solata). V okolici NEK v skupino z večjo specifično aktivnostjo K-40 spada listna zelenjava in žito, med živila z manjšo aktivnostjo K-40 pa mleko in sadje. Enaka ugotovitev velja tudi za hrano vzorčeno po Sloveniji.

OCENA UČINKOV

Ob delovanju jedrske elektrarne v Krškem so koncentracije aktivnosti izpuščenih radionuklidov, razen H-3, v okolju znatno pod detekcijskimi mejami in je njihov morebitni prispevek težko ločiti od splošnega ozadja (C-14, Cs-137). Zato njihov učinek na človeka in okolje posredno ovrednotimo iz podatkov o izpustih v ozračje in tekočinskih izpustih. Z uporabo modelov, ki opisujejo razširjanje radionuklidov po raznih prenosnih poteh v okolju, pa ocenimo izpostavljenost prebivalstva.

Za oceno učinkov ionizirajočega sevanja na prebivalstvo, ki bi lahko nastali kot posledica izpustov iz jedrskega objekta, se uporablja koncept referenčne osebe. Referenčna oseba je teoretični predstavnik prebivalstva, ki zaradi načina življenja in prehranjevanja prejme ali bi lahko prejel najvišje doze sevanja, ki izvirajo iz posamezne prenosne poti radionuklidov v okolju.

Tekočinski izpusti (Tabele B1, B2 in B3)

Učinek na okolje po savski prenosni poti ocenjujemo iz primerjave rezultatov emisijskih meritev (meritev vzorcev iz odpadnih merilnih rezervoarjev – WMT in kaluž uparjalnikov – SGBD), ki jih izvaja NEK, in rezultatov meritev vzorcev reke Save. V letu 2003 sta bila izdelana metodologija in model za oceno doz pri izpostavitvi prebivalcev [27], revidirana v letu 2009 (*Izpostavitve referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo – Nova referenčna lokacija* [28]). V metodologiji so prepoznane glavne prenosne poti, načini izpostavitve in referenčne osebe za Slovenijo in Hrvaško.

V tabelah B1 in B2 je prikazano ovrednotenje tekočinskih emisij z modelnim izračunom za leto 2023, ki temelji na tekočinskih izpustih in podatkih o letnem pretoku reke Save, upoštevajoč značilnosti referenčne osebe (to so ribiči, ki lovijo po akumulacijskem jezeru do 350 m nizvodno od jeza NEK in pod merilno postajo za neprekinjeno vzorčenje v Brežicah, preživijo znaten čas na obrežju in uživajo savske ribe). Iz tabel B1 in B2 lahko ugotovimo, da so prispevki k letni efektivni dozi za odraslega prebivalca 350 m nizvodno od jezua NEK 12,3 % od sevalnih učinkov NEK, prispevek v Brežicah pa le 5,8 %.

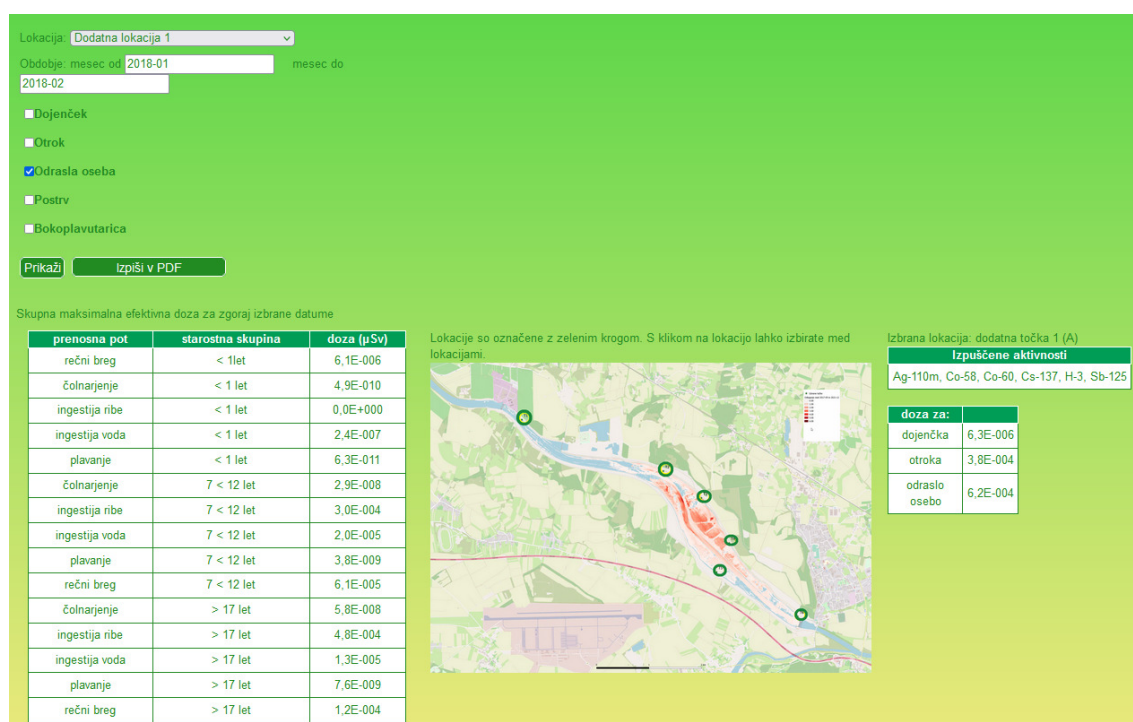
Zaradi gradnje HE Brežice in nastanka akumulacijskega jezera je prišlo do sprememb pri načinih in poteh izpostavitve prebivalstva. V okviru projektne naloge *Vpliv HE Brežice na NEK in Poročilo o vplivih na okolje za podaljšanje obratovalne dobe NEK* [34] in v skladu s tehnično specifikacijo *Dose calculation and dilution modelling of run-of-river Brežice Hydro Plant Accumulation* št. TO.RZ-5/2020 je bila predlagana nova metodologija ocenjevanja učinkov delovanja jedrske elektrarne na prebivalstvo in okolje v njeni okolici zaradi tekočinskih izpustov v reko Savo.


Tabela B1: Ocenjena efektivna letna doza posameznika iz prebivalstva na lokaciji 350 m pod jezom NEK

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	sevanje iz useda (obrežni sediment)	Co-58, Co-60	1,6E-6
notranja obsevanost	zaužitje ribe	H-3, C-14	4,5E-6

Tabela B2: Ocenjena efektivna letna doza posameznika iz prebivalstva v Brežicah

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	sevanje iz useda (obrežni sediment)	Co-58, Co-60	7,6E-7
notranja obsevanost	zaužitje ribe	H-3, C-14	2,1E-6


Slika I13: Prikaz primera izračunanih efektivnih doz v programu DOSENEK [34].

Za teoretično napoved mešanja in redčenja je bil uporabljen tridimenzionalni hidrodinamični transportni model PCFLOW3D ([31], [32], [33], [38]), ki so ga razvili na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FGG) v sodelovanju s sodelavci projektantskega podjetja IBE (IBE d.d., svetovanje, projektiranje in inženiring). Modelna ocena obremenitve se opira na realne prenosne poti in se izračuna za referenčne osebe po starostnih skupinah na sedmih lokacijah nizvodno od jezusa NEK do jezusa HE Brežice. V okviru projektne naloge je bil izdelan Program za računanje efektivnih doz (DOSENEK), ki je napisan v integriranem razvojnem okolju Microsoft Visual Studio (slika I13). V našem primeru gre za spletno aplikacijo, ki omogoča vnos vhodnih podatkov v bazo Microsoft SQL, izračun efektivnih doz glede na vnesene vhodne podatke in prikaz različnih izračunanih doz glede na izbrana obdobja.



Z večkrat preverjenim numeričnim modelom PCFLOW3D so bile opravljene simulacije toka reke Save v pretočni akumulaciji HE Brežice. Na podlagi simulacij za različne scenarije oziroma pretoke reke Save so bili ocenjeni razredčitveni koeficienti v površinskem sloju (0 m do 1 m) in v sloju toka reke od 1 m do 2 m ter v globini 10 m na lokaciji vzorčevalne košare nad jezom HE Brežice. Prikazane rezultate lahko obravnavamo kot razmeroma točne za predvidene vhodne podatke. Parametri v predvidenih scenarijih so namreč določeni na podlagi časovno povprečenih podatkov. Pri oceni mesečnih koncentracij smo predpostavili:

- vzorčenje savske vode poteka neprekinjeno;
- konstanten pretok reke Save v pretočni akumulaciji HE Brežice v času posameznega izpusta;
- ni povratnega vala v bazenu NEK;
- učinek izpusta brezpogojno pripišemo mesecu, v katerem se izpust začne;
- negotovost modelskih vrednosti je velika (lahko tudi red velikosti).

Ker za posamezni izpust ne moremo predvideti mase zaužitih rib ali popite vode v izbranem času ter ju primerjati s časom izpostavitve sevanju na bregu v enakem izbranem času, v programu DOSENEK, podajamo le mesečne in letne doze, ki jih za posamezno pot izpostavitve tudi obravnavamo.

Pripravek posameznega izpusta k povprečni mesečni koncentraciji aktivnosti radionuklida v Savi smo določili tako, da smo ocenili delež efektivnega časa zadrževanja največje koncentracije onesnažila na izbrani lokaciji v mesecu. Efektivni čas zadrževanja ni odvisen od začetne koncentracije izpusta in volumna izpusta, pač pa zgolj od pretoka reke Save in izbrane lokacije ob Savi. Ocenjena mesečna koncentracija aktivnosti H-3 je uteženo povprečje koncentracij aktivnosti v reki Savi po izpustih iz NEK v danem mesecu.

Razredčitveni koeficienti so bili izračunani pri različnih pretokih Save pri sedmih različnih točkah nizvodno od jezua NEK:

- T1: 350 m nizvodno od jezua NEK, levi breg
- T2: razlivno območje – nadomestni habitat
- T3: dodatna lokacija 1
- T4: levi breg pretočne akumulacije HE Brežice
- T5: dodatna lokacija 2
- T6: desni breg pretočne akumulacije HE Brežice
- T7: nad jezom HE Brežice

Za izračun efektivnih doz za referenčno osebo na posamični lokaciji za različne starostne skupine iz prebivalstva v programu DOSENEK moramo med drugim vnesti podatke o izpustih:

- datum ter čas začetka in konca izpusta – trajanje izpusta (h)
- izpuščen radionuklid in njegova aktivnost (Bq)
- prostornina izpuščenih odpadnih vod (m^3)
- pretok reke Save na dan izpusta (m^3/s)

Iz teh podatkov lahko ocenimo efektivne doze na referenčne osebe in živali. V programu DOSENEK so tri starostne skupine referenčnih oseb: dojenček (< 1 leto), otrok (med 7 in 12 let) in odrasla oseba (> 17 let). Za navedene osebe so bile prepoznane naslednje možne prenosne poti: zadrževanje na rečnem bregu, plavanje v reki, čolnarjenje, uživanje rib in pitje vode. Za vsako referenčno osebo so za posamezne točke T1–T7 nizvodno od jezua NEK v pretočni akumulaciji HE Brežice določene značilnosti, oziroma tipični parametri vedenja, ki vplivajo na prejeto efektivno dozo: čas zadrževanja na bregu, čas plavanja v reki, čas čolnarjenja v reki, količina zaužitih rib in količina (nenamerno) popite vode ob plavanju v reki. Lastnosti referenčnih oseb za posamezne točke T1–T7 so predstavljene v tabeli 1.8 v poglavju *Radioaktivnost v reki Savi*.

Oceno sevalnih učinkov delovanja NEK na prebivalstvo izvajamo pri točki T1 (tabela B3), ker se ta ujema z lokacijo, za katero se efektivna doza izračuna z uporabo veljavnega modela. Pri točkah T1 (350 m od NEK) in T2 ne upoštevamo aktivnosti, kot so zadrževanje na rečnem bregu, zaužitje vode in plavanje, kar pomeni, da upoštevamo le dve prenosni poti. Pri točki T7 upoštevamo samo eno prenosno pot, saj tam ni niti čolnarjenja. Pri točki T3 pa je zajetih vseh pet prenosnih poti, zato je za to točko v poglavju *Radioaktivnost*



v reki Savi opravljena analiza vseh prispevkov po posameznih prenosnih poteh in različnih radionuklidov k skupni efektivni dozi.

Tabela B3: Povprečne koncentracije aktivnosti radionuklidov (Bq/m^3) in letne prejete efektivne doze (μSv) za odraslo osebo po vseh petih prenosnih poteh na točki T1 v pretočni akumulaciji HE Brežice. Najvišje doze pri vsaki prenosni poti so zapisane krepko.

Radionuklid	Povprečna koncentracija aktivnosti v letu	Rečni breg (μSv)	Zaužitje ribe (μSv)	Zaužitje vode (μSv)	Plavanje (μSv)	Čolnarjenje (μSv)	Skupna doza (radionuklid) (μSv)
	(Bq/m^3)						
H-3	2,0E+04	0,0E+00	2,3E-03	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,3E-03
C-14	2,9E-02	0,0E+00	2,4E-04	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,4E-04
Mn-54	1,1E-03	0,0E+00	3,0E-07	0,0E+00	0,0E+00	1,7E-08	3,1E-07
Fe-55	2,4E-03	0,0E+00	7,1E-07	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	7,1E-07
Co-58	5,3E-03	0,0E+00	3,9E-06	0,0E+00	0,0E+00	1,9E-07	4,1E-06
Co-60	2,2E-03	0,0E+00	7,5E-06	0,0E+00	0,0E+00	2,0E-07	7,7E-06
Sr-90	3,1E-03	0,0E+00	3,1E-05	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	3,1E-05
Ag-110m	1,9E-03	0,0E+00	8,0E-08	0,0E+00	0,0E+00	1,8E-07	2,6E-07
I-131	1,1E-03	0,0E+00	1,6E-06	0,0E+00	0,0E+00	4,3E-09	1,6E-06
Cs-137	1,6E-03	0,0E+00	2,5E-04	0,0E+00	0,0E+00	3,3E-08	2,5E-04
Skupna doza (prenosna pot)		0,0E+00	2,9E-03	0,0E+00	0,0E+00	6,2E-07	2,9E-03

Atmosferski izpusti (Tabeli C1 in C2)

V ovrednotenju učinka atmosferskih izpustov vključimo naslednje skupine radionuklidov:

- **žlahtni plini**, ki prispevajo izključno k zunanji izpostavitvi ob prehodu oblaka;
- **čisti sevalci beta**, kot sta H-3 in C-14, ki sta biološko pomembna le v primeru vnosa v organizem z inhalacijo (H-3, C-14) in zaužitjem (C-14);
- **sevalci beta/gama** v aerosolih (radionuklidi Co, Cs, Sr) s prenosnimi potmi: inhalacija, zunanje sevanje iz useda, zaužitje rastlin z usedlimi radionuklidi in resuspenzija;
- **izotopi joda** v raznih fizikalnih in kemijskih oblikah, s prispevkom pri inhalaciji ob prehodu oblaka in pri vnosu v telo z mlekom.

V tabelah C1 in C2 je prikazano ovrednotenje zračnih emisij z modelnim izračunom razredčitvenih koeficientov v ozračju za leto 2023 in za posamezne skupine radionuklidov po najpomembnejših prenosnih poteh za odrasle prebivalce v naselju Spodnji Stari Grad, ki je najbližje naselje zunaj izključitvenega območja (tabela C1), in ob ograji NEK. Ocene okvirno veljajo tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja (tabela C2). Velja omejitev dodatne izpostavitve prebivalstva na robu izključitvenega območja (500 m od osi reaktorja) in navzven: celotna letna efektivna doza prispevkov vseh prenosnih poti na posameznika iz prebivalstva ne sme preseči 0,050 mSv. Iz tabel C1 in C2 lahko ugotovimo, da so prispevki k letni efektivni dozi za odraslega posameznika iz prebivalstva ob ograji NEK ter okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja, 87,7 % od vseh sevalnih učinkov NEK v letu 2023, prispevek v Spodnjem Starem Gradu pa le 24,6 %.

Razredčitvene faktorje za zunanje sevanje iz oblaka in inhalacijo od leta 2007 ocenjujemo z Lagrangeevim modelom, ki vključuje značilnosti terena v okolici NEK in večji nabor meteoroloških spremenljivk. Model uporablja vse merjene podatke iz ekološkega informacijskega sistema EIS, ki ga upravlja NEK. Model potrebuje še hitrost izpustnih plinov ter presek ventilacijskega izpusta (pretok plinov skozi glavni izpuh). Po



posvetovanju z NEK je bila za temperaturo dimnih plinov izbrana temperatura 25 °C. Prispevek sevanja iz useda je bil do leta 2010 ocenjen še z Gaussovimi modelom z upoštevanjem talnega izpusta [3]. Ocena za zračno imerzijo v letu 2023 je v okviru razsutja podatkov primerljiva z ocenami za prejšnja leta.

Tabela C1: Izpostavitve sevanju referenčne osebe odraslega posameznika iz prebivalstva v naselju Spodnji Stari Grad zaradi atmosferskih izpustov iz NEK v letu 2023

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	– imerzija (oblak)	– žlahtni plini (Ar-41, izotopi Xe)	1,9 E-7
	– sevanje iz useda	– aerosoli (Co-60, Cs-137)	5,4 E-12
notranja obsevanost	inhalacija (oblak)	H-3, C-14	1,2 E-5
	zaužitje rastlinske hrane	C-14	0*

* Rezultat je manjši od negotovosti meritve.

Tabela C2: Izpostavitve sevanju referenčne osebe odraslega posameznika iz prebivalstva ob ograji NEK zaradi atmosferskih izpustov iz NEK v letu 2023. Ocene okvirno veljajo tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja.

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	– imerzija (oblak)	– žlahtni plini (Ar-41, izotopi Xe)	3,8 E-7
	– sevanje iz useda	– aerosoli (Co-60, Cs-137)	5,0 E-11
notranja obsevanost	inhalacija (oblak)	H-3, C-14	2,3 E-5
	zaužitje rastlinske hrane	C-14	2 E-5

Meritve C-14 so bile v letu 2023 izvedene na vzorcih v koruzi, pšenici, jabolkih, travi, senu in hruškah na Institutu Ruđer Bošković iz Zagreba v juniju in septembru. Rezultati meritev kažejo pričakovano rahlo povečanje specifične aktivnosti C-14 v vzorcih na razdalji do 1 km od osi reaktorja glede na vzorce, vzete na referenčni točki v Dobovi. Ocenjena letna efektivna doza zaradi zaužitja C-14 je tako v okolici NEK (do 1 km) za 2 E-5 mSv višja kot na kontrolni točki v Dobovi. Pri izračunu doze, prejete zaradi C-14 v okolici NEK, smo konzervativno privzeli, da posamezniki iz prebivalstva uživajo hrano iz neposredne bližine NEK (blizu roba izključitvenega območja) dva meseca v letu, drugih 10 mesecev pa hrano od drugod (Dobova). Iz tega izhaja, da je tudi v računu doze zaradi C-14 upoštevano, da posamezniki iz prebivalstva uživajo hrano, pridelano na krško-brežiškem področju (od ograje NEK do Dobove).

Razlika med računanjem efektivne doze zaradi C-14 in efektivne doze zaradi vnosa drugih radionuklidov v hrano je v tem, da se za C-14 upošteva uteženo povprečje specifične aktivnosti C-14 glede na lokacijo vzorčenja, za druge radionuklide pa to ni mogoče zaradi različnih načinov vzorčenja. Doza C-14 se nanaša na hrano in ne na posamezno vrsto hrane, saj se specifične aktivnosti C-14 (v Bq na kilogram ogljika) v raznih vrstah živil ne razlikujejo. Razmerje med izotopoma C-14 in C-12 je namreč v vseh organizmih konstantno in izraža razmerje med izotopoma v atmosferi. V primeru umetnih izpustov C-14 pa se razmerje med izotopi C-14 in C-12 tako v atmosferi kot v organizmih lahko spremeni, saj izotopi C-14 zamenjujejo izotope C-12 v organskih molekulah.

V letu 2023 je bil v rastlinju analiziran tudi organsko vezan tritij (OBT). Meritve so opravili na IRB [24]. Koncentracije aktivnosti v vseh merjenih vzorcih rastlinja (koruza in jabolka) so od $(3,0 \pm 1,1)$ Bq/L na



kontrolni lokaciji v Dobovi do ($17,8 \pm 1,6$) Bq/L ob zahodni ograji NEK (lokacija J). Izmerjene vrednosti so pod 100 Bq/L, kolikor je priporočena raven evropske komisije za H-3 v pitni vodi. Dozna obremenitev na posameznika iz prebivalstva zaradi vsebnosti OBT v hrani je z biološkega stališča zanemarljiva (manj kot $3 \text{ E}-2 \mu\text{Sv}$).

Ugotavljamo, da so bili vsi načini izpostavitve prebivalstva (različne referenčne osebe) zanemarljivi v primerjavi z naravnim sevanjem, doznimi omejitvami in avtoriziranimi mejami. Niti poplave v avgustu niti puščanje na priključnem cevovodu na reaktorsko posodo v oktobru, po katerem je bil opravljen še izredni remont, niso povečali učinka sevalnih učinkov NEK na posameznika iz prebivalstva in okolje.

Naravno sevanje (Tabela D) – okolica NEK

Meritve zunanjega sevanja v okolici NEK so tudi v letu 2023 potrdile ugotovitve iz preteklosti, da gre za značilno naravno okolje, kot ga najdemo tudi drugje v Sloveniji in v svetu. Letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ sevanja gama in direktne ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja v okolici NEK je na prostem v povprečju 0,78 mSv, kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo s prejšnjimi leti. K temu je treba dodati še prispevek $H^*(10)$ nevtronskega kozmičnega sevanja, ki je za območje NEK 0,08 mSv na leto. Tako je bila skupna doza naravnega zunanjega sevanja $H^*(10)$ v letu 2023 v okolici NEK 0,86 mSv na leto. Ustrezna letna efektivna doza (ob upoštevanju pretvorbenih faktorjev iz publikacije Radiation Protection 106 [87]) je 0,72 mSv na leto, kar je nižje od podatka za svetovno povprečje (0,87 mSv na leto). Ob upoštevanju deleža časa zadrževanja na prostem 0,2 in faktorja ščitenja stavb 0,1, je efektivna doza 0,66 mSv. V okviru nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji za leto 2023 [19], kjer efektivno dozo zunanjega sevanja merimo s 50 dozimetri, postavljenimi po Sloveniji (glej poglavje *Zunanje sevanje*), smo letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ sevanja gama ocenili na 0,85 mSv, oziroma ustrezno letno efektivno dozo 0,71 mSv.

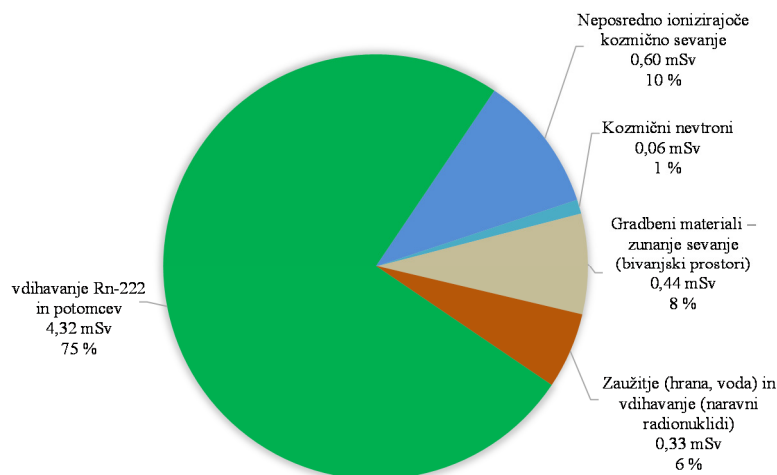
V študiji, ki jo je v letu 2023 opravil ZVD [14], so ocenili prispevke zaradi zunanjega sevanja iz gradbenih materialov, ki je 0,44 mSv, efektivno dozo zaradi zaužitja hrane in vode ter vdihavanja, ki je 0,33 mSv, ter značilni prispevek kratkoživih radonovih potomcev k efektivni dozi 4,32 mSv. Posamezni prispevki k dozi naravnega sevanja so zbrani v tabeli D in na sliki I14. Skupna letna efektivna doza je ocenjena na 5,76 mSv, kar je znatno višje od ocene, ki je veljala v preteklih letih (2,35 mSv) in svetovnega povprečja, ki je 2,4 mSv na leto [42]. Prav tako je ocena višja, kot je značilna efektivna doza v Evropi [26].

Tabela D: Efektivne doze E zaradi naravnih virov sevanja v okolici NEK v letu 2023

Vir	Letna efektivna doza E (mSv)
— Neposredno ionizirajoče kozmično sevanje#	0,60
— Kozmični nevtroni [42]	0,06
Gradbeni materiali – zunanje sevanje (bivanjski prostori)## – ocena velja za Krško	0,44
Zaužitje (hrana, voda) in vdihavanje (naravni radionuklidi)## – ocena velja za Krško	0,33
Vdihavanje kratkoživi potomci Rn-222, efektivna doza)## – ocena velja za Krško	4,32
Skupaj naravno sevanje	5,75

Opomba: # Ocena efektivne doze zunanjega sevanja iz okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ z upoštevanjem pretvorbenega faktorja $E/H^*(10) = 0,84$ za fotone 600 keV [87]. Pretvorbeni faktorji v območju od 100 keV do 6 MeV so v območju med 0,84 in 0,89. Upoštevali smo tudi, da se odrasla oseba (referenčna oseba) zadržuje 20 % časa na prostem in da je faktor ščitenja pri zadrževanju v zgradbah 0,9. Okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$, ki je bil ocenjen v poglavju *Zunanje sevanje* tega, ki je priloga tega poročila, dodatno pomnožimo s faktorjem 0,84 ([26], [42])

Povzeto po poročilu [14].



Slika I14: Deleži letnih efektivnih doz zaradi naravnega ionizirajočega sevanja. Podatki so povzeti po študiji [14], razen za prispevka direktnega ionizirajočega sevanja in nevtronsko doze (Poglavje *Zunanje sevanje*).

Naravni radionuklidi

Izmerjene aktivnosti naravnih radionuklidov (uranova in torijeva veriga, K-40, Be-7) se ne razlikujejo bistveno od vrednosti, izmerjenih v drugih krajih Slovenije, in vrednosti, ki jih podaja literatura. To velja tako za reko Savo, podtalnice, vodovode in usede, kot za zrak in hrano. Prav tako velja, da so vrednosti primerljive z vrednostmi iz preteklih let. Dodatne podrobnosti so v [14].

Černobilska kontaminacija, poskusne vojaške jedrske eksplozije, nesreča v Fukušimi (Tabela E)

V letu 2023 sta bila, podobno kot v preteklih letih, od antropogenih radionuklidov v zemlji merljiva še Cs-137 in Sr-90, ki izvirata iz černobilske nesreče in poskusnih jedrskih eksplozij (tabela E). V letu 2023 učinka radionuklidov, ki so ušli v ozračje po nesreči v japonski jedrski elektrarni v Fukušimi leta 2011, ni bilo zaznati.

Prispevek Cs-137 k zunanjemu sevanju je bil ocenjen na manj kot 0,014 mSv na leto, kar je 1,6 % povprečne letne zunanje doze zaradi naravnega sevanja v okolici NEK. Ocena je v okviru razsutja podatkov primerljiva s preteklimi leti.

Tabela E: Efektivne doze E zaradi globalne kontaminacije v okolici NEK v letu 2023

Vir	Letna efektivna doza E (mSv)
Zunanje sevanje (Cs-137 v zemlji)	0,014
Vdišavanje (Sr-90 in Cs-137 v zraku)	$2,7 \text{ E}-7$
Zaužitje (Sr-90 in Cs-137 v hrani)	$4,0 \text{ E}-4$
Zaužitje (Sr-90 v ribah)	$4,0 \text{ E}-4$
Zaužitje (C-14 v hrani)	$1,45 \text{ E}-2$
Skupaj globalno onesnaženje v okolici NEK	0,0285



Predvidena efektivna doza zaradi vdihavanja radionuklidov, ki so posledica splošne kontaminacije (Cs-137 in Sr-90), je za odraslega posameznika iz prebivalstva ocenjena na $2,7 \text{ E-}7 \text{ mSv}$ na leto.

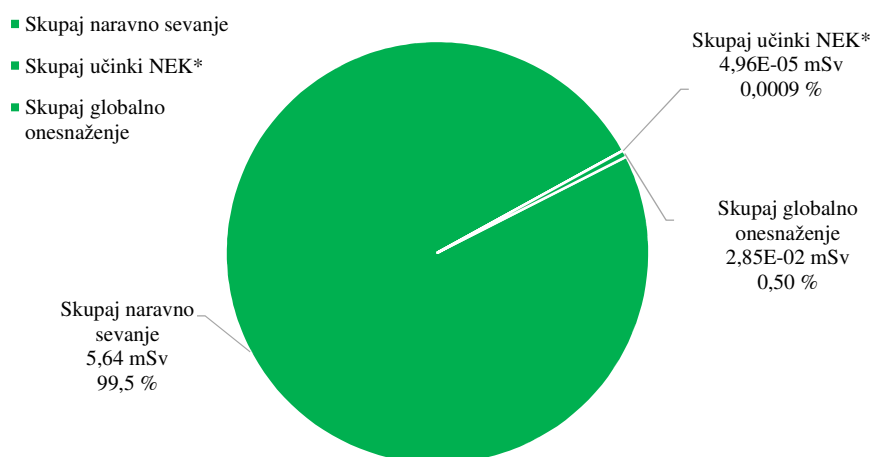
Cs-137 in Sr-90 iz jedrskih poskusov in černobilske nesreče sta bila izmerjena v sledih v posameznih vrstah hrane. Efektivna doza zaradi zaužitja te hrane je bila za leto 2023 ocenjena na $1,0 \text{ E-}4 \text{ mSv}$ na leto za Cs-137 in $3,0 \text{ E-}4 \text{ mSv}$ na leto za Sr-90, kar je skupaj $0,5 \%$ letne efektivne doze zaradi naravnih radionuklidov (brez K-40) v hrani. Ocenjena doza je primerljiva s tistimi iz prejšnjih let.

K letni efektivni dozi v hrani največ prispeva C-14, ki je v prehransko verigo prišel po naravni poti in zaradi nadzemnih jedrskih poskusov v 60. letih prejšnjega stoletja.

Povzetek letnih izpostavitv prebivalstva v okolici NEK za leto 2023 (Tabela F)

V tabeli F in na sliki I15 so predstavljeni posamezni prispevki k letni efektivni dozi zaradi emisij NEK v letu 2023 za odraslo osebo ob ograji NEK. Ocene okvirno veljajo tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja. Izjema je doza zaradi zunanjega sevanja, ki jo merijo TLD. Ob ograji NEK so med gradnjo objekta odstranili vrhno plast zemlje in nasuli prod, zaradi česar je povprečni letni okoljski dozni ekvivalent v okolici NEK za 30% višji od tistega na ograji NEK. Zaradi tega tu podajamo povprečni okoljski dozni ekvivalent za okolico NEK.

Ko seštejemo vrednosti za atmosferske in tekočinske izpuste, ugotovimo, da je učinek nadzorovanih izpustov iz NEK na prebivalstvo znatno pod avtorizirano mejo. Pri tem je treba poudariti, da gre za različne referenčne osebe (posameznike iz prebivalstva) in je zato seštevek samo konzervativna zgornja ocena letne efektivne doze.



Slika I15: Deleži ocenjenih letnih efektivnih doz posameznih referenčnih skupin zaradi emisij NEK v letu 2023, globalnega onesnaženja in naravnega sevanja


Tabela F: Povzetek letnih izpostavitv prebivalstva v okolici NEK za leto 2023

Vir	Prenosna pot	Letna efektivna doza (mSv)
naravno sevanje	– sevanje gama in neposredno ionizirajoče kozmično sevanje	0,60 ^{**}
	– kozmični nevtroni	0,06
	– zaužitje, pitje in vdihavanje (K, U, Th)	0,33 ^{***}
	– vdihavanje (kratkoživi potomci Rn-222)	4,32 ^{***}
	– gradbeni materiali – zunanje sevanje	0,44 ^{**}
	Skupaj naravno sevanje v okolici NEK[#]	5,75
NEK – neposredno sevanje ob ograji NEK	– neposredno sevanje iz objektov NEK	nedoločljivo
NEK atmosferski izpusti (na ograji NEK ^{***})	– zunanje sevanje iz oblaka	3,8 E-7
	– zunanje sevanje iz useda (Co-60, Cs-137)	5,0 E-11
	– vdihavanje iz oblaka (H-3, C-14)	2,4 E-5
	– zaužitje (C-14)	2,0 E-5
NEK tekočinski izpusti (Sava)	Odrasla referenčna oseba	
	– pretočna akumulacija HE Brežice (350 m nizvodno od jezua NEK)	2,9 E-6
	Skupaj učinki NEK[*]	5,0 E-5
černobilska kontaminacija, jedrski poskusi	– zunanje sevanje (Cs-137) ^{**}	1,4 E-2 ^{***}
	– zaužitje rastlinske in živalske hrane (brez C-14) ^{*****}	4,0 E-4
	– zaužitje rastlinske hrane (C-14) ^{*****}	1,45 E-2
	– zaužitje rib (Sr-90)	3,1 E-4
	Skupaj globalno onesnaženje v okolici NEK	2,85 E-2

* Skupna vsota prispevkov NEK je informativna, saj seštevamo prispevke za različne referenčne osebe. Pri skupni vsoti se pri prispevku tekočinskih izpustov upošteva le ocena letne efektivne doze za referenčno osebo – ribiče, ki lovijo 350 m nizvodno od jezua NEK.

** Ocena efektivne doze zunanjega sevanja iz okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ z upoštevanjem pretvorbene faktorja $E/H^*(10) = 0,84$ za fotone 600 keV [87]. Pretvorbene faktorji v območju od 100 keV do 6 MeV so v območju med 0,84 in 0,89. Upoštevali smo tudi, da se odrasla oseba (referenčna oseba) zadržuje 20 % časa na prostem in da je faktor ščitenja pri zadrževanju v zgradbah 0,9. Okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$, ki je bil ocenjen v poglavju *Zunanje sevanje*, ki je priloga tega poročila, dodatno pomnožimo s faktorjem 0,84 ([26], [42]).

*** Povzeto po poročilu [14].

**** Ocena okvirno velja tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja.

***** Del pripada kontaminaciji zaradi nadzemnih jedrskih poskusov, del pa kozmogenemu izvoru, saj C-14 nastaja v ozračju ob jedrskih reakcijah molekul dušika s hitrimi (kozmičnimi) protoni.

***** Povprečje za lokacije od 1 km od osi reaktorja in Dobovo

Povzeto po tabeli D.



Primerjava s preteklimi leti

V okolju v okolici NEK so bili izmerjeni tudi drugi radionuklidi, ki so pretežno del globalne kontaminacije (C-14, Sr-90, Cs-137), uporabe v medicini (I-131) ali kozmogenega izvora (H-3, C-14). Prispevki k letni efektivni dozi po posameznih prenosnih poteh in s tem povezanih medijih za vse umetne radionuklide, ki jo prejme prebivalstvo (odrasli) iz najbližjih naselij, oziroma referenčnih lokacij, so zbrani v tabeli G, dodana je primerjava s prejšnjimi leti. V letu 2023 je bil največji prispevek zunanjega sevanja – posledica prisotnosti Cs-137 v zemlji (globalno onesnaženje). Drugi največji prispevek je od C-14 v hrani. Ugotovimo lahko še, da se vsota prispevkov v okviru razsutja podatkov v zadnjih petih letih ne spreminja.

Tabela G: Pregled ocenjenih letnih efektivnih doz za vse umetne radionuklide po nadzorovanih medijih izpostavitve za odraslo referenčno osebo v okolici NEK (upoštevane so lokacije z najvišjimi efektivnimi dozami za posamezno prenosno pot) od leta 2019 do leta 2023 iz merskih rezultatov. Zaznani umetni radionuklidi so pretežno ali del globalne kontaminacije (C-14, Sr-90, Cs-137) ali kozmogenega izvora (H-3, C-14) ali izredne kontaminacije (Ru-106) v letu 2017 ali uporabe v medicini (I-131). Vsi sevalni učinki NEK na prebivalstvo v okolici so zanemarljivo majhni v primerjavi z globalnim onesnaženjem (tabela E) in so ocenjeni na manj kot 0,10 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in navzven.

Nadzorovani medij	Letna efektivna doza umetnih radionuklidov E (mSv)					Lokacija	Opombe
	2019	2020	2021	2022	2023		
Reka Sava	1,1 E-4 8,3 E-7 1,4 E-4	7 E-5 1,3 E-6 1,9 E-4	1,1 E-4 1,1 E-6 9,2 E-5	1,4 E-4 1,5 E-6 8,7 E-5	9,0 E-5 1,4 E-6 3,1 E-4	Brežice Brežice Brežice	pitje (H-3) kopenje (Cs-137) zaužitje rib (Sr-90)
Črpališča in vodovodi	2,8 E-5	3,2 E-5	3,1 E-5	1,4 E-5	3,4 E-5	Brege	pitje vode (H-3)
Padavine in suhi used	1,9 E-5	1,8 E-5	1,9 E-5	1,2 E-5	2,0 E-5	Brege	Zaužitje rastlinja (H-3)
Zrak	4,5 E-7	2,7 E-7	2,1 E-7	9,7 E-8	2,7 E-7	Povprečje po lokacijah	inhalacija in imerzija (Cs-137)
Zunanje sevanje**	0,015	0,017	0,014	0,016	0,014	Vse lokacije	(Cs-137)
Hrana	0,0156	0,0151	0,0157	0,0168	0,0146	Na ograji NEK***	zaužitje C-14*
	0,0010	0,0016	5,0 E-4	3,5 E-4	4,0 E-4	vse lokacije in na ograji NEK***	Sr-90, Cs-137
Skupaj	0,032	0,034	0,030	0,033	0,029		

* Del pripada kontaminaciji zaradi nadzemnih jedrskih poskusov, del pa kozmogenemu izvoru, saj C-14 nastaja v ozračju ob jedrskih reakcijah molekul dušika s hitrimi (kozmičnimi) protoni.

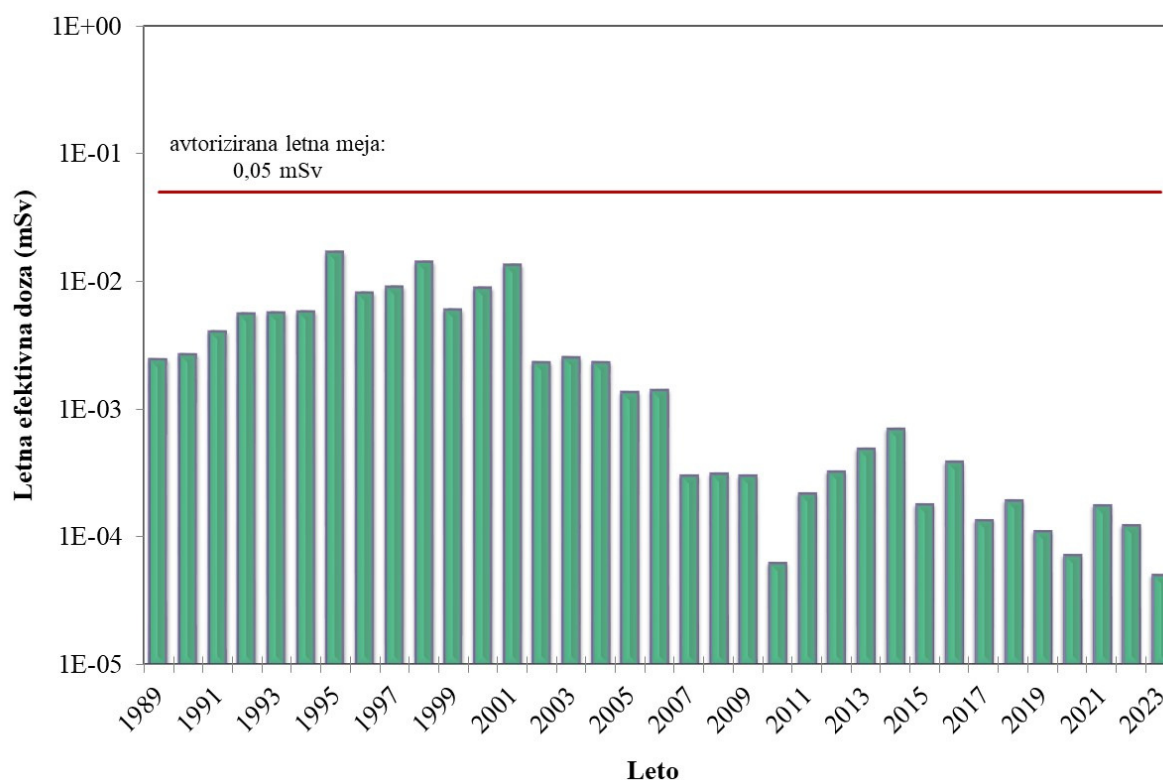
** Upoštevan je okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$.

*** Ocene okvirno veljajo tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja.



Na sliki I16 je predstavljen seštevek ocenjenih letnih efektivnih doz posameznih referenčnih oseb zaradi emisij NEK od leta 1989 do leta 2023. Posebej je označena avtorizirana letna meja 0,05 mSv. Posamezni prispevki se nanašajo na različne referenčne osebe iz prebivalstva in je zato seštevek samo groba ocena letne efektivne doze. Od leta 2001 do 2011 se seštevek znižuje, v letih od 2012 je bila letna efektivna doza na prebivalca pri ograji NEK (ocene okvirno veljajo tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja), nekoliko višja zaradi učinka C-14 na prehrabno verigo med vegetacijo, vendar še vedno dva velikostna reda pod avtorizirano mejo. Tudi v letih 2013 in 2014 lahko opazimo povišanje letne efektivne doze, lahko ga pripišemo izključno prispevku C-14 v tekočinskih izpustih, ki ga v prejšnjih letih nismo upoštevali. V letu 2023 daje seštevek nižjo vrednost v primerjavi s prejšnjimi leti. Pri tem je potrebno upoštevati, da so bili učinki zaradi tekočinskih izpustov iz NEK ocenjeni z veljavnim modelom [32]. Pri primerjanju prispevkov v posameznih letih je treba upoštevati, da se pri izračunu zunanjega sevanja iz oblaka in inhalacije iz oblaka od leta 2007 uporablja Lagrangeev model, ki daje natančnejše vrednosti izpostavitve, ter da so bile vrednosti prispevka k dozi zaradi zaužitja C-14 (iz atmosferskih izpustov) do leta 2006 ocenjene na osnovi izpustov in podatkov iz podobnih elektrarn.

Tako lahko ugotovimo, da so sevalni učinki NEK za več redov velikosti nižji od učinkov globalnega onesnaženja in učinkov uporabe radionuklidov v medicini. Ocenjena vrednost sevalnih učinkov (letne efektivne doze) NEK na prebivalstvo ob ograji NEK (in okvirno 500 m od osi reaktorja) pa znaša zgolj 0,001 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja.



Slika I16: Seštevek ocenjenih letnih efektivnih doz posameznih referenčnih skupin zaradi emisij NEK od leta 2004 do leta 2023. Označena je tudi avtorizirana letna meja (0,05 mSv). Skala je logaritemska.



SKLEPI

Povzetek izpostavitve prebivalstva v okolici NEK za leto 2023 je v tabeli F, kjer so navedeni prispevki naravnega sevanja, učinki NEK ob ograji NEK in preostali učinki černobilske kontaminacije in poskusnih vojaških jedrskih eksplozij v atmosferi:

- v letu 2023 so bili vsi sevalni učinki NEK ob ograji NEK (ocena okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja) ter 350 m nizvodno od jezua NEK na prebivalstvo v okolici ocenjeni na manj kot $5,0 \text{ E-5 mSv}$ na leto; Ocena učinkov delovanja NEK zaradi tekočinskih izpustov v tem poročilu še vedno temelji na modelu, ki je bil izdelan v letu 2003 in revidiran v letu 2009.
- ocenjena vrednost sevalnih učinkov NEK ob ograji NEK je približno 0,001 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja (ocena okvirno velja tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja);
- ocenjena vrednost sevalnih učinkov NEK je majhna v primerjavi z avtorizirano mejno dozo za prebivalstvo v okolici NEK (avtorizirana efektivna mejna doza 0,05 mSv na leto na razdalji 500 m in navzven za prispevke po vseh prenosnih poteh);
- k celotni efektivni dozi zaradi izpustov iz NEK največ prispeva zaužitje hrane (49 %). Tu ima največji delež vnos C-14, 40 %, zaradi zaužitja hrane (rastlinja);
- efektivna doza zaradi izpustov iz NEK zaradi vdihavanja prispeva k celotni efektivni dozi 47 %; med radionuklidi največ prispeva H-3;
- efektivna doza zaradi izpustov iz NEK po zunanjem sevanju k celotni efektivni dozi prispeva 4 %; med radionuklidi največ prispeva Co-58;
- vsota prispevkov efektivnih doz zaradi izpustov iz NEK, ki jih izračunamo iz meritev vzorcev iz okolja, se z leti znižuje, k čemur največ prispeva zmanjšano sevanje zaradi Cs-137 iz zemlje; to je ostanek zračnega in padavinskega useda po nesreči v jedrskem reaktorju leta 1986 v Černobilu.
- Sevalni učinki izpustov iz NEK se niso povečali po naravni ujmi v avgustu in okvari na priključnem cevovodu na reaktorsko posodo v oktobru.





S U M M A R Y

The report presents the results of regular annual measurements of natural and artificial radioactive substances and other sources of ionising radiation in the vicinity of the Krško Nuclear Power Plant (NPP), together with a calculation of the amount of ionising radiation received from these sources by the population in the vicinity of the NPP.

In 2023, measurements and calculations according to the statutory and internationally recognised methodology (ICRP and IAEA) were carried out by four authorised organisations from two countries (the Jožef Stefan Institute, the Institute for Occupational Safety, the Ruđer Bošković Institute and MEIS d.o.o) and the Krško NPP as the obligated party. The results of the measurements and calculations show that the total radiation effects from the Krško NPP from all sources and all exposure pathways on the population were in all cases less than one per cent of the authorised limit, meaning that the Krško NPP facility does not contribute to the annual effective dose to the population in its vicinity.

Like all population, the residents living in the vicinity of the Krško NPP receive a typical dose of natural ionising radiation. Exposure to natural ionising radiation in the vicinity of the Krško NPP can be determined precisely on the basis of measurements carried out by authorised organisations as part of the operational off-site radiological monitoring of the Krško NPP, since sensitive devices detect all radiation, including many natural radionuclides in the environment. Based on the measurements conducted by authorised organisations and on the analyses of the Slovenian Radiation Protection Administration, the received dose of natural ionising radiation in the vicinity of the Krško NPP has been thoroughly revised in 2023 and, using new dose conversion factors due to inhalation of radon and its progeny, a value of 5.75 mSv per year has been estimated.

The contribution of the total radiation effects of the Krško NPP on the population in the vicinity is 0.000047 mSv per year. This contribution is hundred thousand times smaller than the natural background dose, and it can therefore be concluded that the population living in the Krško-Brežice region, in settlements throughout the area around the Krško NPP and at the border of the exclusion area (500 m from the reactor axis) and beyond is not more extensively exposed to ionising radiation than the population elsewhere in Slovenia. The contribution of the radiation effects of the Krško NPP on the population is 0.1 % of the authorised annual dose limit. The authorised annual dose to the population is set at 0.05 mSv per year, which is 5 % of the annual dose limit for the total population, or less than 0.001 % of the natural background in Slovenia.

The doses received by the population in the vicinity of the Krško NPP are summarised in Table A. The table contains a conservatively rounded and simplified presentation of the measurement and calculation data, which are presented in full in Table F and in more detail in the remainder of this extract and the full report.

The total radiation effects of the Krško NPP on the surrounding population are very small, less than one thousandth of the authorised annual dose limit at the edge of the exclusion zone and outwards. The low values can be attributed to the small controlled discharges from the NPP. The credit for such low NPP radiation effects also goes to the NPP staff, who have been exemplary in their monitoring and limitation of discharges. Neither the floods in August nor the leak in the reactor vessel connection pipeline in October with the subsequent one-off refuelling outage, have increased the radiation effects of the Krško NPP on representative person and the environment.

It should be noted here that a so-called representative person is used to calculate or estimate the effective dose to the population due to discharges from a nuclear installation. The representative person for a particular exposure pathway is a hypothetical representative of the population receiving or likely to receive the highest effective dose from a particular exposure pathway.



Table A: A summary of annual exposures of the population in the vicinity of the NPP for 2023 from the data presented in more detail in Table E.

Origin	Exposure pathway	Annual effective dose (mSv)
Natural background	– Gamma-ray and direct cosmic radiation*	1,10
	– Ingestion (food, water) and inhalation**	0.33
	– Inhalation of Rn-222 and its progeny**	4.32
	Total natural background radiation (Krško NPP area)	5.75
Krško NPP	– Gama-ray and direct radiation from the buildings at the Krško NPP yard	0.000000
	– Cumulative contribution of atmospheric discharges	0.000044
	– Cumulative contribution liquid discharges	0.000003
	Total radiation effects of the Krško NPP***	0.000047
Global contamination	– Accident in Chernobyl NPP, nuclear weapon tests ...	0.0285
	Total global contamination	0.0285

* The estimate of the effective dose from external radiation is derived from the environmental dose equivalent $H^*(10)$, considering the conversion factor $E/H^*(10) = 0.84$ for 600 keV photons. Conversion factors in the range of 100 keV to 6 MeV lie between 0.84 and 0.89. It has also been taken into account that an adult representative person spends 20% of their time outdoors and that the shielding factor within buildings is 0.9. The environmental dose equivalent $H^*(10)$, which was estimated in the section *Zunanje sevanje* of this report, is further multiplied by a factor of 0.84 ([26], [42]).

** From [14].

*** The total sum of contributions from the Krško NPP discharges is informative and conservatively estimated upwards, as all the different contributions for different representative persons are added, which is not the case in reality.

For example, the representative person for the calculation of the contribution of atmospheric releases of C-14 is a person who lives directly in the vicinity of the NPP (close to the edge of the exclusion zone) and, for two months of the year, consumes only food grown at the same place (close to the edge of the exclusion zone), and for the other ten months consumes food from elsewhere in Posavje (Dobova). However, the representative person for calculating the contribution of liquid discharges to the Sava river is a fisherman along the Sava river, who spends his time at the river bank 350 m downstream of the NPP dam and consumes fish caught there. These different representative persons are added together in the total radiological impact assessment. However, as these are contributions from different representative persons, the sum of the radiation effects of atmospheric and liquid discharges from the Krško NPP is only a conservative upper estimate of the annual effective dose. Yet even such a very conservative estimate of the exposure of a hypothetical representative person receiving all possible effective dose from the Krško NPP is practically negligible compared to the values of the typical unavoidable natural background in the Republic of Slovenia.

Thus, the Krško NPP produces clean, efficient and low-carbon energy, essential for meeting the present and future energy needs of the Republic of Slovenia and addresses global climate change.



INTRODUCTION

The population of Slovenia, like populations elsewhere in the world, is exposed to natural ionizing radiation as well as to certain anthropogenic sources of ionizing radiation, which come primarily from the use of radiation sources in medicine, the residual Chornobyl contamination and the contamination generated by atmospheric nuclear tests. When it comes to residents in the surroundings of the Krško Nuclear Power Plant (Krško NPP), we could add the discharges of atmospheric and liquid radioactive substances from the Krško NPP and the direct radiation emanating from the buildings and objects inside the power plant's fenced perimeter. The Krško NPP is required to comply with *authorised limits* and other dose limits related to releases, as well as other radiation effects on the environment and population. The constraints on additional exposure of the population (representative person) was laid down already in the site plan documentation for the Krško NPP in 1974, which required the total annual effective dose from all exposure pathways to the representative person at the border of the exclusion area (500 m from the reactor axis) and beyond not to exceed 0.05 mSv. After the commissioning and start of the Krško NPP operation, this limit was supplemented with the requirement that the annual effective dose from *external radiation* from the site buildings at the border of the Krško NPP exclusion area shall not exceed 0.2 mSv per year.

The Krško NPP is required to provide evidence of compliance by performing *operational radioactivity monitoring*, the scope and method of which are prescribed by the *Rules on the monitoring of radioactivity* [8]. Operational radioactivity monitoring includes measurements of *emissions* on the premises, measurements of *imissions* in the surroundings, measurements of external radiation in the environment, evaluation of measurement results and dose estimation. The scope of monitoring is defined in Annex 4 of the above Rules (Design of the operational radioactivity monitoring programme for the nuclear power plant). The Rules also define requirements that must be met by the providers of radioactivity monitoring, minimal technical requirements for measurement and analysis equipment as well as the methods and exposure pathways that must be considered in dose evaluation. Apart from the Krško NPP, which is in charge of emission measurements, radioactivity monitoring is performed by various *independent authorised monitoring providers*.

This Report presents the results of radioactivity monitoring that was performed in 2023 by the Krško NPP – as the entity liable for monitoring, and by the authorised radioactivity monitoring providers. Summarised results of radioactivity measurements of anthropogenic and naturally occurring radionuclides are presented by different contamination media and exposure pathways in the form of assessed effective doses⁴, which are presented in Chapter "*DOSE ESTIMATE*" (*Table F*). The dose assessment is based on the methodology of ICRP and IAEA [39] [40] [41].

CHARACTERISTICS OF SAMPLING AND MEASUREMENTS

In 2023, the scope and methods of sampling and measurements remained the same as in previous years, enabling a comparison of the monitoring results with the results from previous years as well as determination of trends. Because of the construction of the Brežice hydroelectric power plant (Brežice HPP) dam, additional sampling locations were introduced in the reservoir. The characteristics of the sampling and measurements are as follows:

1) Sava river

- a) continuous sampling at four locations: (Krško – 3.2 km upstream, in front of Brežice HPP dam – 7.2 km downstream, Brežice – 8.2 km downstream, and Jesenice na Dolenjskem – 17.5 km downstream) for long-lived radionuclides; single samples of unfiltered water at Krško, left and right riverbanks in the reservoir, replacement habitat, above the Brežice HPP dam, Brežice, Jesenice na Dolenjskem and Podsused near Zagreb (Croatia, around 30 km downstream from the Krško NPP) for short-lived radionuclides;

⁴ In the purpose of protection of the public, it is necessary to characterise an individual receiving a dose that is representative of the more highly exposed individuals in the population. This individual is defined as the 'representative person' [40].



- b) quarterly single water samples from Sava at Krško and Brežice;
- c) composite quarterly samples on the left and right banks of the accumulation lake to determine the activity concentration of C-14 in the Sava river;
- d) sediment sampling at ten locations (Krško upstream, below the Krško NPP dam, Pesje, left and right riverbanks in the reservoir, in front of Brežice HPP dam, Brežice, Jesenice na Dolenjskem and Podsused in Croatia – all downstream of the Krško NPP dam);
- e) fish samples: Krško, reservoir HPP Brežice, Brežice, Jesenice na Dolenjskem, Podsused (Croatia) and Otok. Fish samples were also taken in the accumulation lake of the Brežice HPP to determine the C-14 content.

Sample measurements involved determination of the activity concentration and specific activity of gamma emitters using high resolution gamma-ray spectrometry (HRGS), the activity concentration and specific activity determination of tritium (H-3) with liquid scintillation beta spectrometry, and the determination of Sr-90/Sr-89 using radiochemical separation and counting with a proportional counter. The C-14 content in Sava river water and fish was determined by accelerator mass spectrometry (AMS).

2) Waterworks and pumping stations

- a) single water sample from Ljubljana water system (reference location);
- b) quarterly water samples from the waterworks in Krško, Brežice;
- c) monthly continuous samples from the pumping stations in Brege, Rore, Brežice and the waterworks in Spodnji Stari Grad and Brežice; monthly continuous samples from the Petruševac pumping station in Zagreb, Croatia;
- d) sampling of groundwater in the immediate vicinity of the Krško NPP (quarterly samples from the E1 borehole inside the Krško NPP perimeter fence and monthly samples from the VOP-4 borehole and two locations in Croatia (Medsave and Šibice boreholes);
- e) monthly single samples from boreholes VOP-1/06, V-7/77 in V-12/77.

The measurements were performed using the same methodology as for the Sava river samples.

3) Precipitation and dry fallout

- a) monthly composite samples from precipitation collectors in Brege, Krško and the reference locations in Dobova and Ljubljana (control location);
- b) monthly replacement of vaseline collecting plates for dry fallout at eight locations in the immediate and wider surroundings of the Krško NPP, and in Ljubljana (reference location).

Precipitation samples were analysed using high resolution gamma-ray spectrometry, liquid scintillation beta spectrometry for tritium (H-3) activity concentration determination, and radiochemical analysis for the determination of Sr-90/Sr-89. High resolution gamma-ray spectrometry was also applied on vaseline samples.

4) Air

- a) aerosol sampling comprised of continuously pumping air through aerosol filters, exchanged every fifteen days. Pumps are located at eight locations in the surroundings of the Krško NPP (Spodnji Stari Grad, Krško – Stara vas, Leskovec, Brege, Vihre, Gornji Lenart, Spodnja Libna and reference location Dobova) and Ljubljana (control location);
- b) iodine (I-131) sampling was performed with special pumps and filters at the same locations as the sampling of aerosols (except for the Dobova location);
- c) sampling for the purpose of Sr-90/Sr-89-specific measurement was performed with the pump in Stara Vas;
- d) emission measurements were performed at the Krško NPP's main plant main ventilation (stack), whereby samples for the measurement of iodine, tritium (H-3), carbon (C-14), aerosols and noble gases were collected;



- e) sampling of airborne C-14 in CO₂ was performed continuously at two locations at the Krško NPP fence which is inside the Krško NPP exclusion area (on the Krško NPP perimeter fence). In 2023, a total of fourteen samples were collected and analysed. The control measurements were performed in Zagreb (Croatia).

The measurements of aerosol filters and dedicated filters for I-131 were performed with high resolution gamma-ray spectrometry, and the Sr-90/Sr-89-specific measurement was performed using a proportional counter. Measurement of the specific activity of C-14 in atmospheric CO₂ is performed using a liquid scintillation counter. In preparation of the sample CO₂ is converted to benzene.

5) External Exposure to Radiation

External radiation

- a) external radiation dose expressed in ambient dose equivalent $H^*(10)$ (gamma radiation and the ionizing component of cosmic radiation) was measured using 57 TL dosimeters in the vicinity of the Krško NPP (the locations surrounding the plant at the distance up to 10 km) and 9 TL dosimeters at the Krško NPP perimeter fence. Data were collected from the dosimeters every six months. Ljubljana was the reference location for all external radiation measurements. Additional 10 dosimeters were located in Croatia;
- b) the external radiation dose is also measured with seven TL dosimeters on the western fence of the Krško NPP near the dry cask storage facility;
- c) measurements using 50 TL dosimeters at locations distributed throughout Slovenia were performed in parallel with the measurements in the vicinity of the Krško NPP [18], [19];
- d) 14 continuous radiation detectors are in operation in the vicinity of Krško NPP as part of the Early Warning Network. In addition to these, further 64 continuous radiation detectors (Envinet MIRA, AMES/MFM, Atomtex/MFM in Gihmm) are in operation at other locations in Slovenia, also as a part of the Early Warning Network.

For the measurement of the ambient dose equivalent $H^*(10)$, IJS uses dosimeters of type TLD-IJS-05 (made of CaF₂:Mn). Measurements of $H^*(10)$ at 10 sites in Croatia are made with thermoluminescence (LiF:Mg,Cu,P, MCP-N, CaF₂:Mn), OSL type detectors Al₂O₃:C and radiophotoluminescence (RPL) dosimeters. The data from continuous detectors are collected and processed by the Slovenian Nuclear Safety Administration.

Soil

- a) soil samples were collected at three locations on the flood plains downstream of the Krško NPP (Amerika – 3.5 km from the Krško NPP, Gmajnice – 2.5 km from the Krško NPP, and Kusova Vrbina-Trnje – 8.5 km from the Krško NPP). Sampling was performed twice a year with samples taken in layers from several depths (down to 30 cm on non-cultivated land).

Sample measurements were performed using high resolution gamma-ray spectrometry, while strontium specific activity was determined using radiochemical analysis.

6) Food

- a) sampling of food was performed in the following locations: orchard next to the Krško NPP (fruits), Pesje (milk, vegetables, fruits), Brege (milk, vegetables, meat), Vihre (vegetables), Vrbina (cereals, fruits, vegetables), Spodnji Stari Grad (meat, eggs), Žadovinek (vegetables), Trnje (vegetables), Leskovec (meat, fruit), Dolenje Skopice (milk, vegetables), Dolenja vas (vegetables), Gornji Lenart (eggs), Sevnica (meat). In 2023, 29 types of food were sampled in the vicinity of the NPP, for a total of 71 samples (milk: 36, vegetables: 20, meat: 7, fruit: 8);
- b) sampling frequency depended on food category: milk was sampled monthly or quarterly (for the Sr-90/Sr-89-specific measurements); meat, eggs and cereals were sampled annually; vegetables, crops and fruits once per season;



- c) sampling of vegetation, crops and fruits for C-14 specific activity determination took place twice in 2023 (June and September) at sixteen locations in the surroundings of the Krško NPP and in the reference location in Dobova; a total of thirty-six samples were collected and analyzed.

Measurements of specific activity of gamma emitters were performed using high resolution gamma-ray spectrometry, while Sr-90/Sr-89 specific activity determination was performed using radiochemical analysis. Activity of C-14 is determined with liquid scintillation spectrometry of absorbed CO₂.

MEASUREMENT RESULTS

Introduction

For the data interpretation and dose assessment the primary measurement $y \pm u(y)$ results obtained from gamma-ray spectrometry carried out by JSI (*Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645*) are used in the same way as in recent years. The $u(y)$ represents the combined standard deviation of the specific activity related to 68 % confidence interval (coverage factor $k = 1$). The combined standard deviation incorporates statistical fluctuation of the net signal and the uncertainties of the background signal, spectrometer calibration, nuclear data and the sample quantity. The uncertainties stemming from sampling, except for the sample quantity, are not taken into account.

If the uncertainty of the measurement result exceeds 80 % of the observed values (quantification limit), the primary measurement result is reported. Such an outcome is designated by a symbol "‡", with a footnote under the Table explaining that the result is below the quantification limit.

The annual dose is calculated as the arithmetic average of periodic measurement outcomes [60]. The uncertainty of the average could either be evaluated with a-priori uncertainty (uncertainty propagation rule) or with a-posteriori uncertainty (standard deviation divided by the square root of the number of samples).

When the detection limit is reported (usually by Pb-210, H-3, Sr-90 radionuclides) a 1/4th of the detection limit is reported in tables, as a predicted value, under the recommendation of the European Council (*European Commission recommendation on standardized information on radioactive airborne and liquid discharges into the environment from nuclear power reactors and reprocessing plants in normal operation*, Euratom Off. J. Eur. Union. 2004; pp L2:32; paragraphs 6 and 7 [62]). This value has no associated uncertainty and the uncertainty of the arithmetic average is represented with a-posteriori uncertainty. In such cases the records are designated by a symbol "x".

For non-detected radionuclides - to keep the presentation clear - the limits of detection are not provided. The empty fields in tables are taken as zero values.

Above definitions of estimators are in line with the frequentist approach to probability [61], except that instead of the term »a-posteriori uncertainty«, the term »average scattering of the mean« is used.

Definitions of these terms are given in the report *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS DP 14645*

The designation »Sr-90/Sr-89« signifies that the separation to determine the activity of Y-90 was not performed. The separation to determine the activity of Y-90 should be carried out only in cases, when the counting rate of Sr-90/Sr-89 decreased, and the difference was a result of the radioactive decay rate of Sr-89. Thus, the reported activity concentrations or specific activities of Sr-89/Sr-90 refer only to activity concentrations or specific activities of Sr-90, because the short-lived Sr-89 has not been detected in the environment since post-Chernobyl period. This is also confirmed by periodic monthly reports on atmospheric discharges from the Krško NPP, where the radionuclide Sr-89 is not detected.

1) Sava river (*Abstract from the chapter Radioaktivnost v reki Savi*)

Tritium is regularly present in liquid effluents from the NPP, and it is also detected in the Sava river. Natural tritium concentrations in rainwater range from 0.2 kBq/m³ to 1.5 kBq/m³. The annual average of activity concentration of H-3 (natural background) in the Sava River at Krško is of 0.7 kBq/m³. An overview of the monthly averages of activity concentrations of H-3 in the Sava river at stations with



continuous sampling (filtered water) upstream and downstream of the Krško NPP dam in 2023 is shown in Figure I1. The long-term average (since July 2017) of monthly activity concentrations of H-3 at the sampling station in Brežice is 3.1 kBq/m³, and in front of the Brežice HPP dam 3.3 kBq/m³. The long-term average in the Sava at Jesenice na Dolenjskem sampling station is 3.0 kBq/m³, which, in terms of data scattering, is the same as for the other sampling points downstream from the Krško NPP.

After the construction and installation of HPP Brežice, the flow of the Sava river changed. The time course of H-3 activity concentrations at sampling points in the HPP Brežice accumulation lake (left bank, right bank, in front of HPP Brežice dam) no longer follows the time course of H-3 discharges from Krško NPP. Occasional matches with daily discharges occur, taking into account the two- to three-day lag between the discharge and the sampling date. The same is true in 2023. It can be observed that the activity concentrations of H-3 in the Sava river, sampled on the left and right sides of the widest part of the reservoir, are comparable within measurement uncertainty. We can assume that the river flow is slower but more pronounced on the right side of the accumulation lake down to the broadest part of the lake, then the flow follows the river main stream down to the HPP Brežice dam. This can also be deduced from bathymetric measurements of the Sava river's depth, which were performed in the embankment above the dam of HPP Brežice [29]. Figure I2 shows the activity concentrations of H-3 at the locations upstream and downstream of the NEK dam, where single samples of unfiltered water are collected.

In 2023, C-14 was sampled in the effluents from the waste monitoring tanks (WMT). The contribution of C-14 was estimated from measurements in quarterly WMT samples carried out by the RBI. Quarterly samples are made up of individual discharges. Quarterly C-14 activities ranged from 0.003 GBq in the second quarter to 0.03 GBq in the last quarter. The total annual C-14 release of 0.041 GBq was calculated as the sum of the quarterly values. The discharges are almost an order of magnitude lower than the long-term average (1.4 GBq) since 2013.

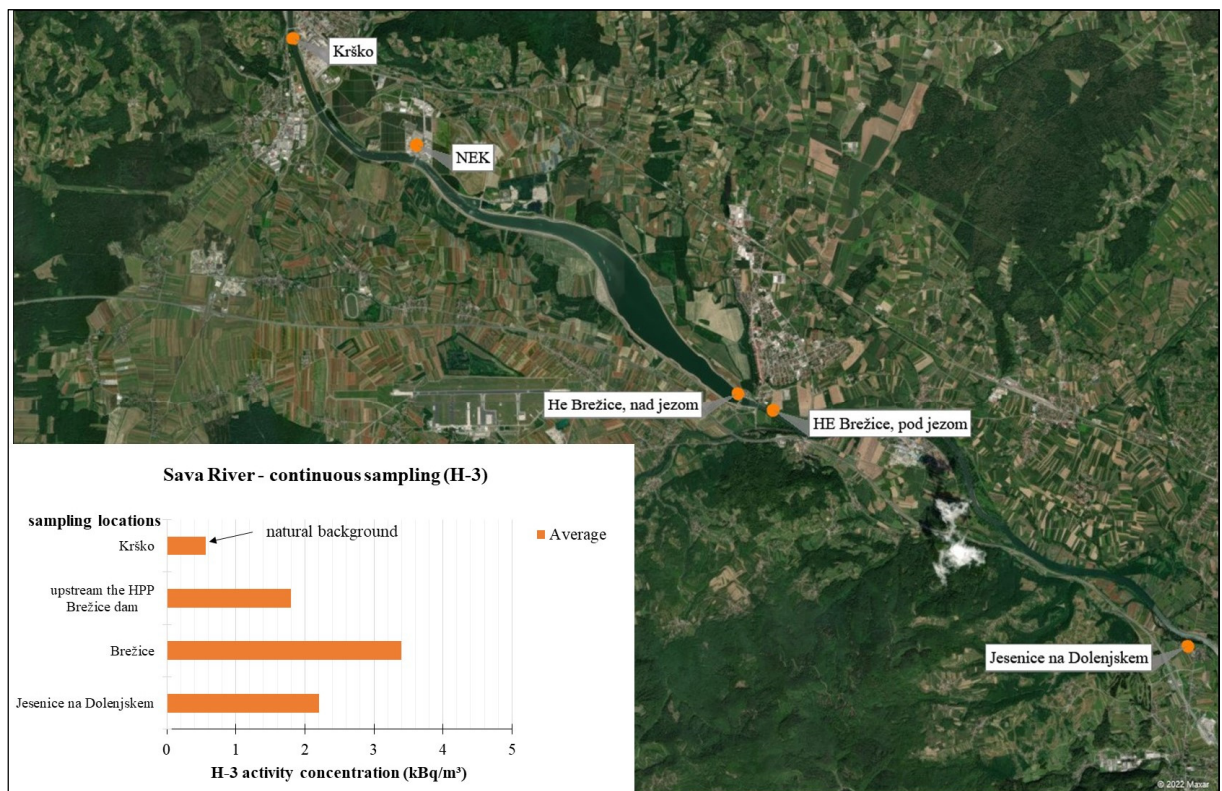


Figure I1: Overview of monthly averages of activity concentrations of H-3 in Sava river at stations with continuous sampling mode upstream and downstream of the Krško NPP dam in 2023.

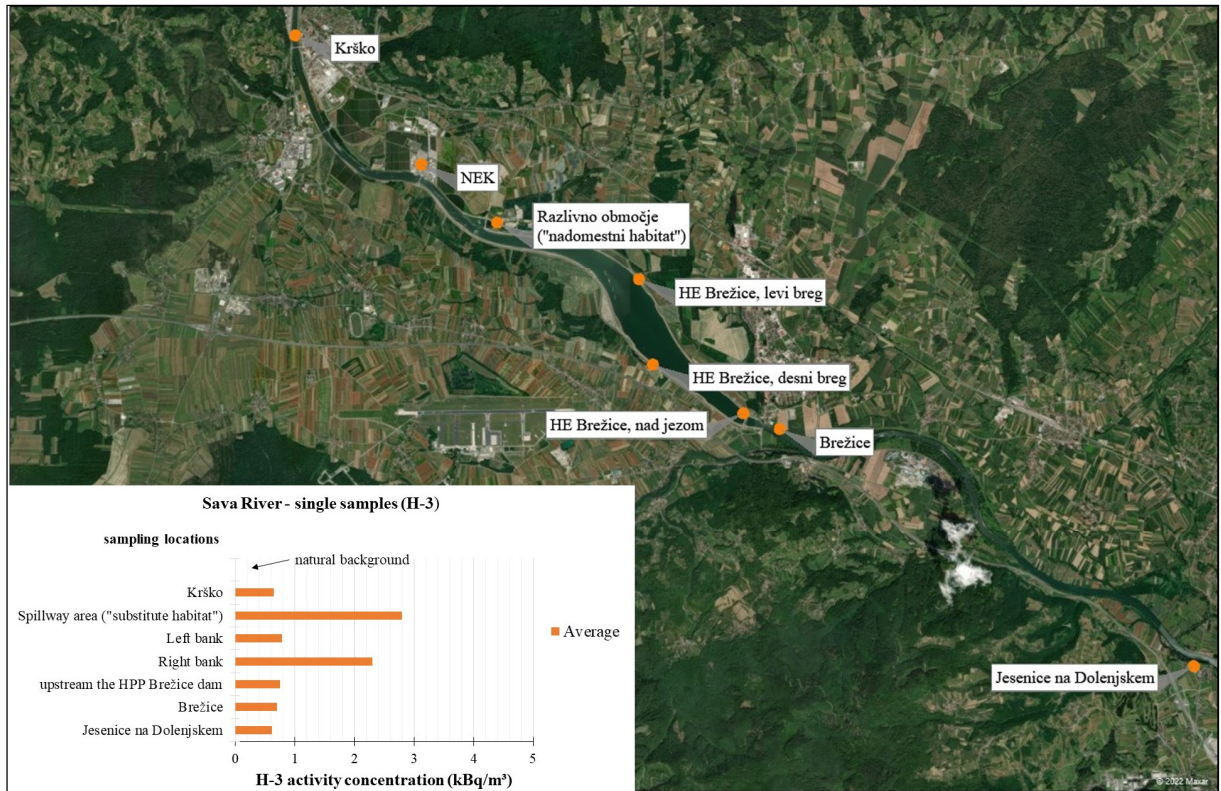


Figure I2: Review of monthly averages of activity concentrations of H-3 in the Sava river at locations upstream and downstream of the Krško NPP dam, where single (monthly or quarterly) samples are collected, in 2023.

C-14 was also measured in Sava river water and fish [21]. Composite samples were taken quarterly at the locations on the left and right banks of the lake of HPP Brežice. The average of the measured activity concentrations on the left bank in the accumulation lake was 9.7 Bq/m^3 and on the right bank 9.6 Bq/m^3 , respectively. Quarterly measured values, within the context of data scatter, do not deviate from the averages. Therefore, we cannot infer the radiation effects of the Krško NPP due to C-14 discharges. All measured specific activities are lower than the current atmospheric activities (102 pMC or 231 Bq/kg C).

The specific activities of C-14 in the Sava river and fish samples in 2023 are, in terms of measurement uncertainty, the same and are also lower than the current atmospheric activity of C-14.

Radioactive iodine (I-131), which is also used in medicine, is regularly present at all sampling locations of the Sava river, both upstream from the Krško NPP and downstream in Brežice and Jesenice na Dolenjskem. In the liquid discharges from the NPP, I-131 was detected in 2023. The annual discharge was 0.3 MBq . In 2023, the concentration of I-131 activity at all sampling sites, just like in previous years, varied significantly and was sometimes even below the detection limit. In individual samples at various sampling locations of the Sava river in Posavje, it ranged from 0 Bq/m^3 to 9.3 Bq/m^3 . The highest average in Posavje in 2023 was in the accumulation lake on the left bank, namely 2.4 Bq/m^3 . The estimated activity concentration of I-131 in the Sava river 350 m downstream from the Krško NPP dam was $8.8 \text{ E-}5 \text{ Bq/m}^3$, in Brežice $4.1 \text{ E-}5 \text{ Bq/m}^3$, and in Jesenice na Dolenjskem $2.5 \text{ E-}5 \text{ Bq/m}^3$. From this, we can conclude that the effect of I-131 discharges from the power plant into the Sava river is indeterminable or negligibly small compared to the radiation effects of liquid discharges from hospitals. The presence of I-131 in rivers across Slovenia is determined by measurements in separate environmental radioactivity monitoring in the Republic of Slovenia [18]. The highest measured activity concentration of I-131 was $(5.5 \pm 1.0) \text{ Bq/m}^3$ in the Sava river in Brežice in October 2023. The highest average of two results, 4.9 Bq/m^3 , was also calculated for samples from the Sava river in Brežice. Compared to previous years, the measured activity concentrations of I-131 in rivers in 2023 were lower. In the Sava at Laze near Ljubljana, the iodine content was five times lower than the long-term average.



The presence of radioactive iodine in rivers originates from liquid discharges from hospitals throughout Slovenia.

No I-131 was detected in fish and sediment samples at all sampling points upstream and downstream of the NEK dam, which is the same as in previous years.

The annual liquid discharge of Cs-137 from the Nuclear Power Plant Krško (NEK) into the Sava river was 1.2 MBq, which, within the context of data scatter, is comparable to discharges in previous years (2016-2022) and lower than the long-term average of 14 MBq since 2000. The presence of Cs-137 in the Sava river is attributed to global contamination, as the calculated increase in Cs-137 activity concentration 350 m downstream from the NEK dam, considering the annual liquid discharges and the average flow-rate of the Sava river, along with the assumed dilution ratio on the left bank in Brežice, is equivalent to 3.8 E-4 Bq/m^3 , and in Brežice, 1.8 E-4 Bq/m^3 . These estimated values cannot be distinguished from the globally uneven distribution of contamination.

The average monthly concentrations of activity in the filtered water of the Sava river were 0.17 Bq/m^3 at the reference site in Krško, and 0.05 Bq/m^3 in Jesenice na Dolenjskem. In Brežice and before the Brežice HPP dam, Cs-137 was not detected in any sample of the Sava water. On the left bank at the site of the largest spread of the accumulation lake, the average in unfiltered water was 0.55 Bq/m^3 , and on the right bank, it was 0.52 Bq/m^3 . In unfiltered water in Krško, the average content of Cs-137 was 1.2 Bq/m^3 , and in Brežice, 0.48 Bq/m^3 .

Measured activity concentrations of Cs-137 in rivers in Slovenia vary among sampling locations and are similar to or higher than the values measured in the Sava river in the vicinity of the Krško NPP [19]. The average activity concentration of Cs-137 in 2023 ranged from 0.06 Bq/m^3 in the Krka river to 0.96 Bq/m^3 in the Mura river. In the Soča river, the Sava near Brežice, and the Kolpa, Cs-137 was not detected in 2023. However, in the Krka river, radioactive cesium, a result of general contamination, was detected in only one sample.

Radioactive strontium (Sr-90) is regularly measured in the Krško NPP liquid effluents. In 2023, the total activity released into the Sava river was 0.11 MBq, which is similar to the last ten years and lower than the multi-year average of 0.14 MBq. Monthly samples are composed of individual discharges. The presence of Sr-90 in the Sava river is also attributed to global contamination, as the calculated increase in Sr-90 activity concentration 350 m downstream from the NPP dam, taking into account the annual liquid discharges and the average flow-rate of the Sava river, along with the assumed dilution ratio on the left bank in Brežice, is equivalent to 3.3 E-5 Bq/m^3 , and in Brežice, it is 1.5 E-5 Bq/m^3 . These contributions cannot be distinguished from the unevenly distributed global contamination.

The average activity concentration of Sr-90 in filtered water at the reference location in Krško was 1.2 Bq/m^3 , before the Brežice Hydroelectric Power Plant Dam it was 1.3 Bq/m^3 , in Brežice 1.4 Bq/m^3 , and in Jesenice na Dolenjskem 2.1 Bq/m^3 . The highest individual activity concentration was 2.7 Bq/m^3 in Brežice. Within the variability of the data, the values are comparable, considering they come from measurements conducted by different providers. The activity concentrations of Sr-90 in one-time samples of unfiltered water fall within the uncertainty range, consistent with those in continuously sampled filtered water. Across all locations, the quarterly averages ranged from 1.2 Bq/m^3 to 3.1 Bq/m^3 . The highest one-time measured value was 4.9 Bq/m^3 in the surrogate habitat.

Measurements of the Sr-90 isotope were conducted only on water samples taken from the Drava, Mura, and Sava (Ljubljana) rivers. The average annual activity concentration of Sr-90 in the Mura from 2008 to 2022 was 2.3 Bq/m^3 , in the Drava 1.3 Bq/m^3 , and in the Sava at Lazah near Ljubljana 2.1 Bq/m^3 . The measured concentrations of Sr-90 activity in Slovenian rivers in 2023 were lower than in 2022 and the previous 14 years. The uniform activity concentrations of strontium, despite data variability across all Slovenian rivers, support the hypothesis that the observed concentrations are mainly due to global contamination rather than discharges from the Krško NPP.

Most strontium is dissolved in water. The average activity concentrations of Sr-90 in filter residue at all locations (Krško, accumulation lake, Brežice, Jesenice na Dolenjskem) were at least an order of magnitude lower than in water. Generally, strontium activity concentrations in filtered river water are at least 10 times higher than for cesium.

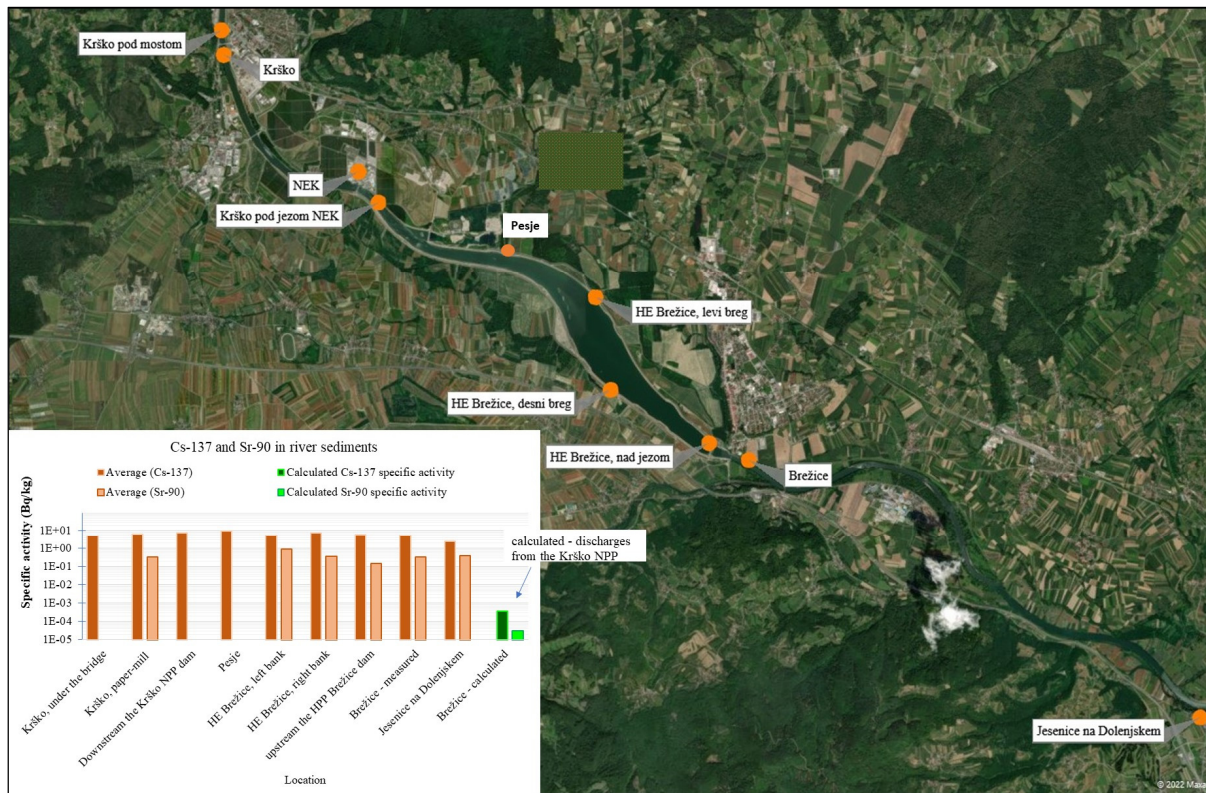


Figure I3: Specific activities of Cs-137 and Sr-90 in river sediments in 2023. The average of Sr-90 in Krško was below the detection limit. The scale is logarithmic.

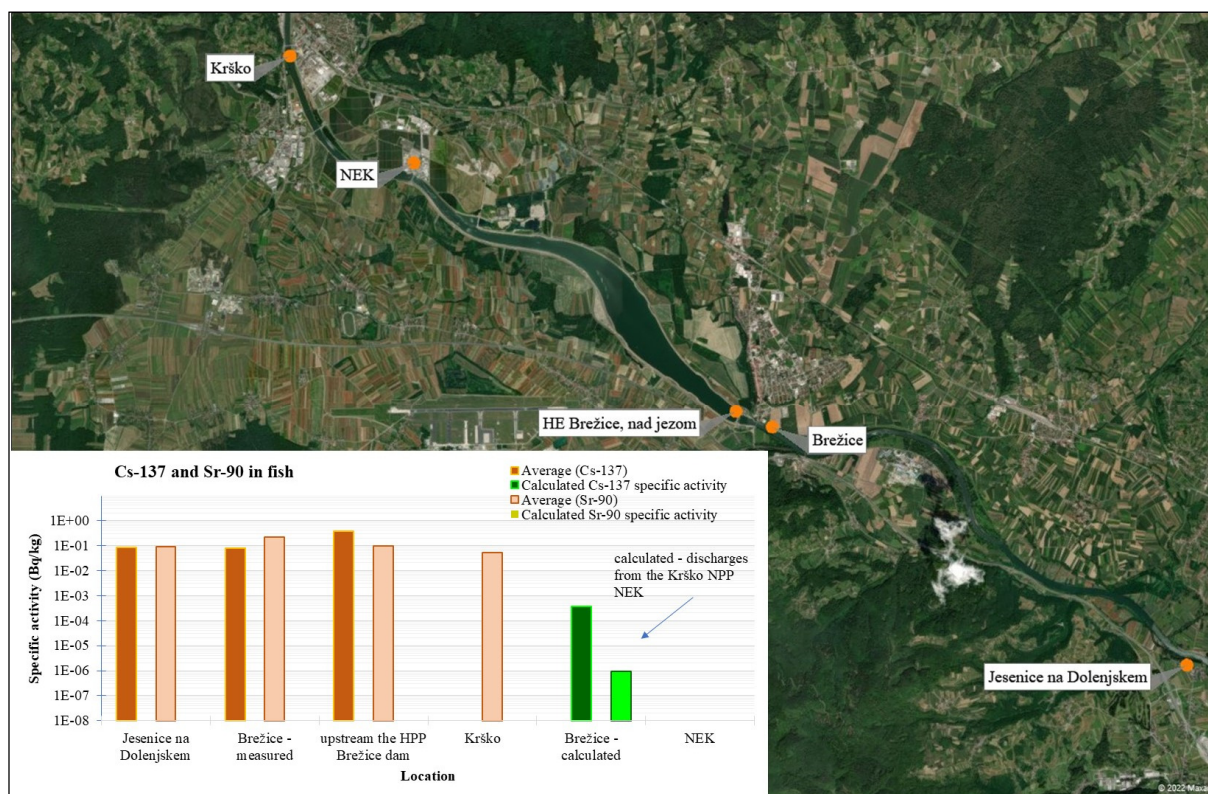


Figure I4: Specific activities of Cs-137 and Sr-90 in fish samples in 2023. The scale is logarithmic.



Graph I3 shows the average specific activities of Cs-137 and Sr-90 in riparian sediments upstream and downstream of the NPP dam. The contents of both radionuclides in sediments are attributed to global contamination, as the liquid discharges from NEK contribute a specific activity of 7.6 E-4 Bq/kg for Cs-137 and 6.5 E-5 Bq/kg for Sr-90 in bottom sediments 350 downstream of the NEK dam and 3.6 E-4 Bq/kg for Cs-137 and 3.1 E-5 Bq/kg for Sr-90 in Brežice. The estimated values are negligible compared to the average specific activities of 5.6 Bq/kg for Cs-137 and 0.3 Bq/kg for Sr-90 in 2023 in Brežice.

Graph I4 displays the average specific activities of Cs-137 and Sr-90 in fish upstream and downstream of the NPP dam. The activities are attributed to global contamination, as the contributions of radionuclides from NEK's liquid discharges, 3.7 E-4 Bq/kg for Cs-137 and 9.5 E-7 Bq/kg for Sr-90, are two to six orders of magnitude lower than the measured values, 0.08 Bq/kg for Cs-137 and 0.2 Bq/kg for Sr-90, in fish caught near Brežice. In the accumulation lake, the average specific activities of Cs-137 and Sr-90 in fish are 0.04 Bq/kg and 0.08 Bq/kg , respectively.

Other fission and activation products (Mn-54, Co-58, Co-60, Ag-110m) regularly appear in trace amounts in NPP's liquid discharges. The total activity of these radionuclides in 2023 was at least five orders of magnitude lower than that of tritium. Cs-134 was last measured in liquid discharges in 2016. In recent years, none of these radionuclides have been detected in the environment. Co-60 was last detected in 2003 and 2006 in water and sediment, and Cs-134 in sediments in 2002.

Natural radionuclides of the uranium (U-238, Ra-226, and Pb-210) and thorium (Ra-228 and Th-228) decay series were regularly detected in all water samples. In filtered Sava water, at all sampling sites, the average activity concentrations U-238 were from 1.2 Bq/m^3 to 8.7 Bq/m^3 , Ra-226 from 1.1 Bq/m^3 to 2.5 Bq/m^3 , Pb-210 from 0 Bq/m^3 to 8.7 Bq/m^3 , Ra-228 from 0.8 Bq/m^3 to 1.3 Bq/m^3 , Th-228 from 0 Bq/m^3 to 0.8 Bq/m^3 , and Be-7 from 2.6 Bq/m^3 to 115.7 Bq/m^3 . The activity concentrations of K-40 ranged from 29.5 Bq/m^3 to 43.1 Bq/m^3 . Similar averages of natural activity concentrations were also found in unfiltered water: U-238: $1.0\text{--}7.2 \text{ Bq/m}^3$, Ra-226: $1.6\text{--}3.3 \text{ Bq/m}^3$, Pb-210: $11.4\text{--}28.1 \text{ Bq/m}^3$, Ra-228: $1.3\text{--}4.8 \text{ Bq/m}^3$, Th-228: $0.8\text{--}3.2 \text{ Bq/m}^3$, Be-7: $18.2\text{--}80.6 \text{ Bq/m}^3$, and K-40: $38.9\text{--}100 \text{ Bq/m}^3$. The activity concentrations of natural radionuclides in water are thus similar to those measured in rivers throughout Slovenia.

In sediments, at all sampling locations, the average specific activities were U-238 from 25 Bq/kg to 44 Bq/kg , Ra-226 from 25 to 45 Bq/kg , Pb-210 from 31 to 85 Bq/kg , Ra-228 from 21 Bq/kg to 50 Bq/kg , and Th-228 from 18 to 35 Bq/kg . The average specific activities of K-40 were from 245 Bq/kg to 583 Bq/kg . Be-7 was occasionally detected in sediment, with a range of averages from 1.5 Bq/kg to 49 Bq/kg across all locations.

No naturally occurring radionuclides are present in the Krško NPP effluents and therefore no environmental impact is assessed.

2) Waterworks and pumping stations (*Abstract from the chapter Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi*)

The concentration of tritium in drinking water in Brege are the highest in Slovenia and are undoubtedly due to the impact of Krško NPP. However, even the highest values are still less than 2% of the European Commission's Drinking Water Directive maximum recommended values⁵. An overview of activity concentrations of H-3 in drinking water from pumping stations and waterworks in the municipalities of Krško and Brežice is shown in Figure I5. In the legend, the activity concentration of H-3 in the Ljubljana water supply system is added for comparison [20]. The concentration of tritium in drinking water in the vicinity of Krško NPP is in the same order of magnitude as elsewhere in Slovenia.

⁵ Recommended value or parametric value (in Slovenian legislation) [9] means the level of radioactivity in drinking water above which the radiation protection authority (administration) shall verify whether the presence of radioactive substances in drinking water constitutes a risk to human health to which a response must be given and, if necessary, remedial action must be taken to improve the quality of the water to such an extent that the requirements for the protection of human health from the point of view of radiation protection are met.



In order to monitor the exchange of water between Sava river and the groundwater in the Krško-Brežice field, the tritium level in boreholes has been monitored since the start of the operational radioactivity monitoring in the vicinity of the Krško NPP. The water from the boreholes is not used as drinking water or process water, it only serves for tracking discharges from Krško NPP. An overview of H-3 activity concentrations in boreholes is shown in Figure I6.

The radionuclides Cs-137 and Sr-90 are distributed inhomogeneously in our soils. They also occur in small quantities in NPP discharges, but their impact on groundwater is negligible and inseparable from global contamination.

In monthly or quarterly samples at all sampling sites in Krško and Brežice, as well as in Croatia, I-131 was not detected in drinking water or the results of measurements were below the quantification limit.

Activity concentrations of the natural radionuclide K-40 were measured at all sampling points. At Brege, the average monthly activity concentration of K-40 was 57 Bq/m³, in the Spodnji Stari Grad water supply 32 Bq/m³. At other pumping stations and waterworks, the average concentration of K-40 activity was 25 Bq/m³, which is consistent with the statistical distribution of data over the last five years. We assume that in the Krško-Brežice plain, the use of fertilisers in agricultural areas above the aquifer zones is changing [49] and with that also the direct influence of precipitation and higher water levels of the Sava river.

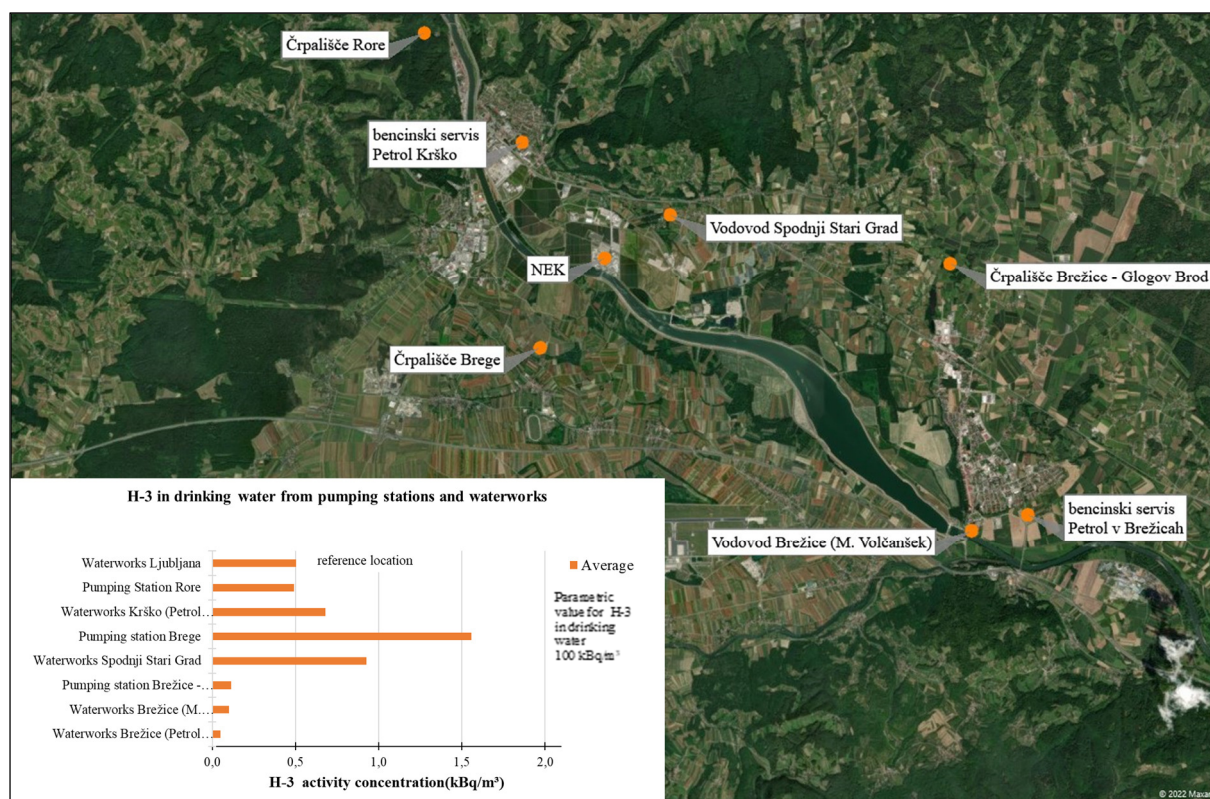


Figure I5: Review of average activity concentrations of H-3 in drinking water from pumping stations and waterworks in the municipalities of Krško and Brežice at locations where they are sampled continuously or quarterly. The activity concentration of H-3 measured at the reference location (Ljubljana) is compared with values in the vicinity of the Krško NPP.

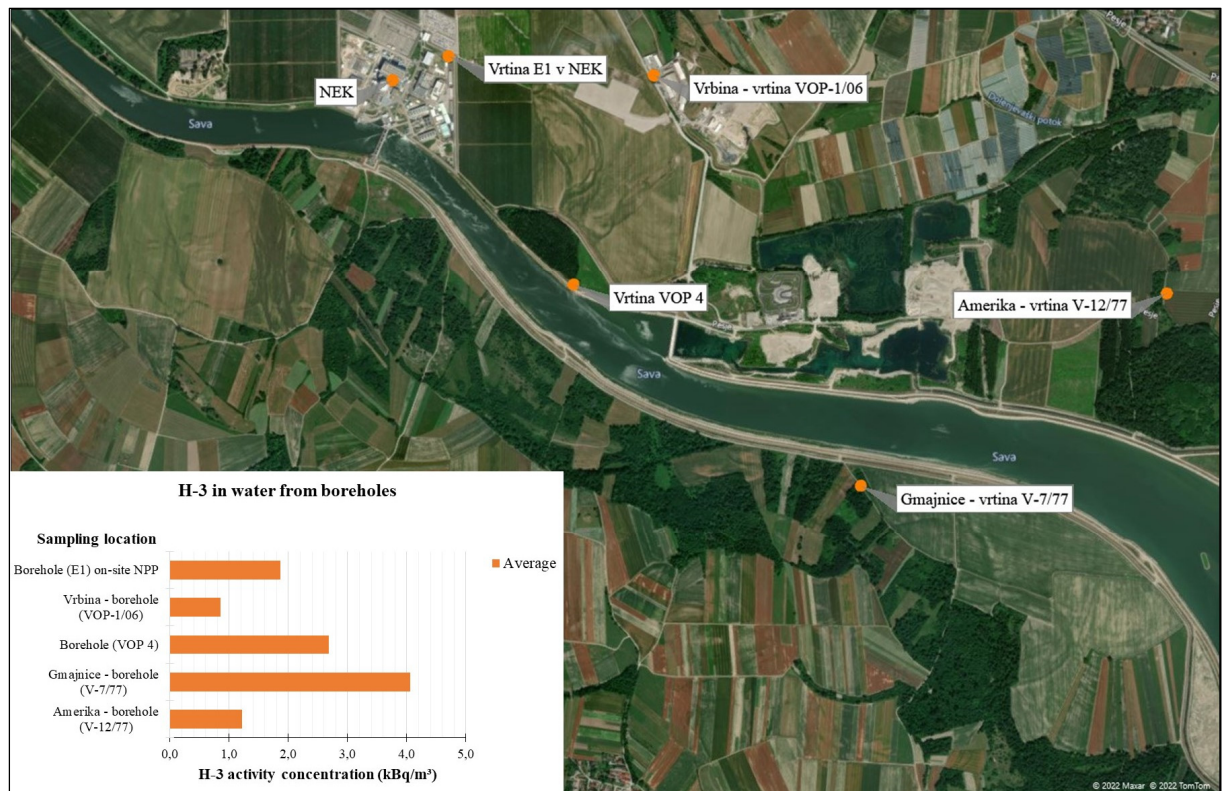


Figure I6: Review of monthly averages of activity concentrations of H-3 in water from the boreholes. The water from the boreholes is not used as drinking water or process water, but only for tracking liquid discharges from the Krško NPP.

For all sampling points of the Krško and Brežice water supply systems, the average monthly activity concentrations of natural U-238 are low, with the highest average monthly value measured at the Brežice waterworks, being 3.8 Bq/m³. The average monthly activity concentrations of Ra-226 ranged from 0.7 Bq/m³ (Brežice waterworks) to 3.1 Bq/m³ (Brege pumping station). The average monthly activity concentrations of Pb-210 varied from 2.4 Bq/m³ in water from the Brežice waterworks to 7.3 Bq/m³ in water from the Brežice pumping station. In Ljubljana, the activity concentration of Pb-210 was 0.3 Bq/m³. The average monthly activity concentrations of Ra-228 at the Brežice pumping station were 0.4 Bq/m³, at the Rore pumping station 0.6 Bq/m³, in the Spodnji Stari Grad waterworks 0.6 Bq/m³, and at Brege 0.9 Bq/m³. The average monthly activity concentrations of Th-228 ranged between 0.3 Bq/m³ (Brežice waterworks) and 0.4 Bq/m³ (Brežice pumping station). Be-7 was occasionally detected in all pumping stations and waterworks in Krško and Brežice. The average monthly activity concentration of Be-7 was 0.7 Bq/m³ in the Brežice waterworks, with the highest average being 5 Bq/m³ at the Brege pumping station.

No naturally occurring radionuclides are present in the Krško NPP effluents and therefore no environmental impact is assessed.

3) Precipitation and dry fallout (*abstract from the chapter Radioaktivnost v usedih*)

In 2023, the annual precipitation in Ljubljana was 1 827 mm, in Krško 1 344 mm, in Brege 1 355 mm, and in Dobova 1 285 mm. The annual precipitation in the vicinity of the Krško NPP was 27% lower than in Ljubljana. The precipitation amounts by location are within the data distribution range and are comparable for the last few years. The variance in annual precipitation is ±88 mm in Ljubljana and 44 mm in the Krško NPP area. The variation in precipitation by month is even more pronounced. Drought months occur almost every year, but not always in the same season. The activity concentration



of tritium in precipitation varies significantly, and only activity concentrations above 2 kBq/m³ could be attributed to discharges from NEK [55]. In 2023, the activity concentration of tritium in precipitation was higher than 2 kBq/m³ four times, specifically in Brege. Average monthly activity concentrations of H-3 in precipitation are shown in Figure I7.

The effect of the Krško NPP on the activity concentrations of tritium in precipitation in the immediate vicinity of the plant is noticeable when looking at annual averages, which are higher every year in Brege and Krško (Stara Vas) compared to Dobova and Ljubljana. The activity concentrations of tritium in Brege were higher than the average in spring and autumn, which corresponds with the highest air emissions during the year. The correlation between air emissions and the measured concentration of H-3 was observed this year in Brege and Stara Vas, while the correlation was minor or negligible in Ljubljana and Dobova.

The highest monthly fallout of H-3 of 0.45 kBq/m² was measured in Brege in January. The values and temporal trends of fallout for Ljubljana, Dobova, Krško, and Brege are comparable within the data scattering, with peaks corresponding to months with more precipitation. The highest measured values of precipitation fallout for Cs-137 were 0.03 Bq/m² in Ljubljana in July, 0.07 Bq/m² in Brege in August, 0.03 Bq/m² in Krško in June, and 0.03 Bq/m² in Dobova in July, in all cases with moderate or high amounts of precipitation. In such cases, the increase is attributed to washing out from the air and, in the winter months, also to burning solid fuels. The Cs-137 deposition at all locations is comparable to values from the pre-Chornobyl period between 1982 and 1985.

In 2023, the activity concentrations of Sr-90 were mostly below the detection limit, except during the summer and in some autumn samples where Sr-90 was detected in traces. Low atmospheric emissions of Sr-90 from the Krško NPP indicate that the presence of this radionuclide is due to wind resuspension of particles from the soil. The presence of Cs-137 along with Sr-90 in most samples further confirms that both originate from global contamination.

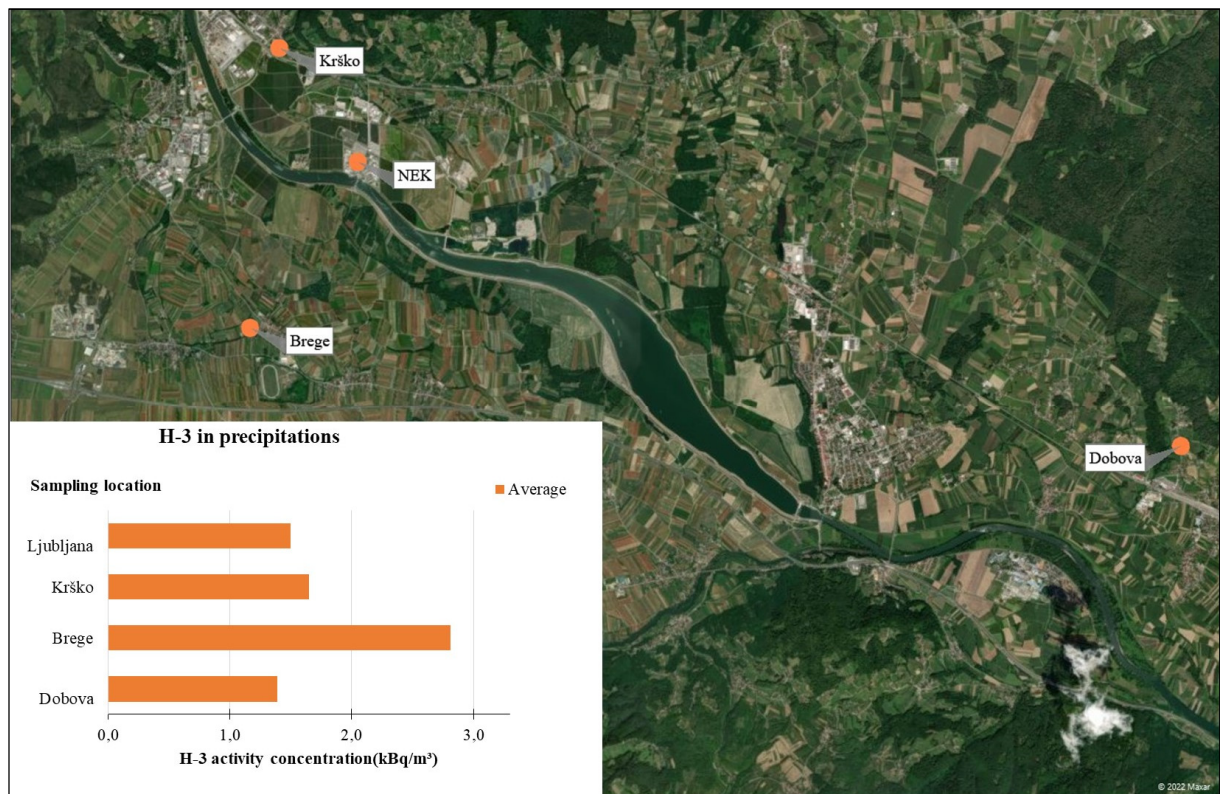


Figure I7: Review of monthly averages of activity concentrations of H-3 in precipitation at sampling locations in the vicinity of the Krško NPP. The activity concentration of H-3 obtained at the reference location (Ljubljana) is compared with values in the vicinity of the Krško NPP.



4) Air (abstract from the chapter Zrak)

In the atmospheric discharges from the Krško NPP, the highest activities are of tritium H-3 (7.4 TBq) and C-14 (0.13 TBq). The discharge activity is measured at the source (filters inside the ventilation exhaust). Their presence in the environment is assessed using an air dispersion model based on measurements at the source.

During the operation in 2023, emissions of I-131, I-133, Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Se-75, Te-127m, Cs-137, and Sr-90 were detected in NPP's ventilation exhaust. However, except for the last two (Cs-137 and Sr-90), these radionuclides were not detected at any of the seven measurement sites in the vicinity of NEK and in Ljubljana. The calculated activity concentrations of Cs-137 and Sr-90 at the sampling points are at least three orders of magnitude lower than the measured values, suggesting that Cs-137 and Sr-90 in the environment are mainly due to global contamination.

The average monthly activity concentrations of Cs-137 at sampling points around the Krško NPP in 2023 were lower than elsewhere in Slovenia. It is presumed that the presence of Cs-137 in Slovenia's air mainly results from burning of solid fuels (wood, briquettes, pellets). Figure I8 provides an overview of Cs-137 activity concentrations (measured and calculated) at locations around the Krško NPP, with a comparison value for Ljubljana.

Measurements of strontium (Sr-90) in the environment are conducted in quarterly composite samples at Stara Vas. The average activity concentration in 2023 was 1.3×10^{-4} mBq/m³. The radionuclide Sr-89 was not detected in Krško NPP atmospheric discharges in 2023.

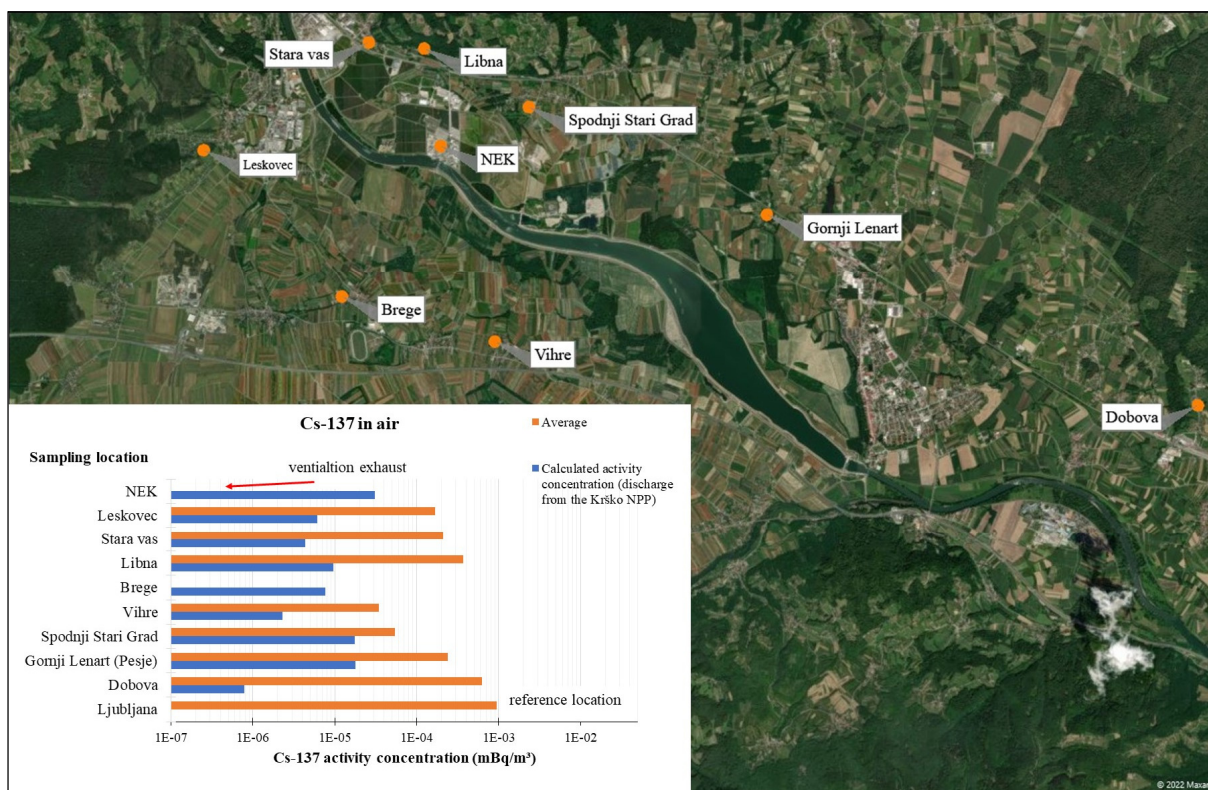


Figure I8: Review of monthly averages and calculated (estimated) activity concentrations of Cs-137 in air in the vicinity of the Krško NPP. The scale is logarithmic. The activity concentration of Cs-137 obtained at the reference location (Ljubljana) is compared with values in the vicinity of the Krško NPP.



The radionuclide I-131 was not detected in 2023 at any of the seven sampling points around the Krško NPP, where air-pumps with combined ducts with aerosol and charcoal filters are installed. Even more powerful aerosol pumps in Dobova (Krško NPP off-site environmental radioactivity monitoring) and Ljubljana (environmental radioactivity monitoring in living environment in the RS) showed no presence of I-131 in the air.

Measurements of natural radionuclides in aerosols in samples from around NEK indicate the presence of radionuclides commonly measured as part of environmental radioactivity monitoring in living environment in the RS. The average activity concentrations of Be-7 and Pb-210 in 2023 matched well within the uncertainty range at all sampling points around the Krško NPP and in Ljubljana. The average activity concentration of Be-7 in 2023 around the Krško NPP was 2.5 mBq/m³, and for Pb-210, it was 0.5 mBq/m³. In Ljubljana, the average activity concentrations were 3.6 mBq/m³ and 0.8 mBq/m³, respectively. For cosmogenic Be-7, comparable values were measured across all sampling points around the Krško NPP, in Murska Sobota, and in Ljubljana, within the averages' uncertainty range. The exception is Predmeja, where values were an order of magnitude higher, likely due to its well-ventilated area and consequently higher air concentrations. A similar pattern was observed for Pb-210. This finding is expected, especially for locations with similar precipitation regimes and similar aerosol washout from the atmosphere and the passage of air masses from higher to lower layers of the atmosphere.

Differences between individual sampling points around the Krško NPP were greater for other natural radionuclides (isotopes of the uranium and thorium decay chains and K-40). The discrepancy can be attributed to different soil compositions, proximity to cultivated fields, and not accounting for radon emanation from the sample in Ra-226 measurements for samples from Predmeja and Murska Sobota and the use of air pumps with different flows. Measurements of radionuclide activity concentrations in aerosols in Ljubljana are used as reference in comparisons due to the most powerful pump.

The Krško NPP does not discharge natural radionuclides into the atmosphere and the Sava River during its normal operation, therefore, we do not assess their effective doses to the representative person and environment.

5) External Exposure to Radiation (*abstract from the chapter Zunanje sevanje*)

External radiation

The external radiation exposure to the population around the Krško NPP includes cosmic radiation, radiation from natural radionuclides in the atmosphere (primarily decay products of radon), radiation from the radioactive plume following the release of radioactive substances from the facility into the environment, and external radiation due to the fallout that settles after the plume has passed, as well as external radiation from natural and artificial radionuclides in the soil. The network of Thermoluminescent Dosimeters (TLD) deployed in the environment (around the Krško NPP, country-wide in Slovenia) detect the total gamma-ray radiation from natural radionuclides in the environment (from soil and building material), the direct ionizing components of cosmic radiation, and the contribution from global fallout contamination by Cs-137. Since environmental TLDs do not measure the neutron component of cosmic radiation, we calculated it using the EXPACS program (references [73], [74], [75]). This software allows for the calculation of doses from individual components of cosmic radiation, including the neutron component, for any geographic longitude and latitude.

Figure I9 presents a comparison between the average annual ambient dose equivalents H*(10), measured in the vicinity of the Krško NPP, at a reference sampling point in Ljubljana, and the average ambient dose equivalents measured in Croatia as part of the radioactivity monitoring program around the Krško NPP, as well as the averages measured in the context of environmental radioactivity monitoring measurements in the living environment in the Republic of Slovenia. The measured annual ambient dose equivalents, within the scope of value dispersion, do not deviate from the multi-annual averages at individual sampling points. The lowest annual H*(10) value is found at the Krško NPP fence due to the gravel ground with the top layer of soil removed. Asphalt surfaces and building shielding inside the Krško NPP fence further attenuate the external radiation from the ground. Additionally, dosimeters at the west fence



of NEK, where the dry cask storage facility is located, showed an average annual dose equivalent of (0.58 ± 0.004) mSv, which is within the data scattering comparable to the annual ambient dose equivalent measured with TLD at the Krško NPP fence, (0.55 ± 0.03) mSv. This finding indicates that radiation effects from the NPP due to external radiation contribution to the total dose in the surrounding environment are negligible and unmeasurable.

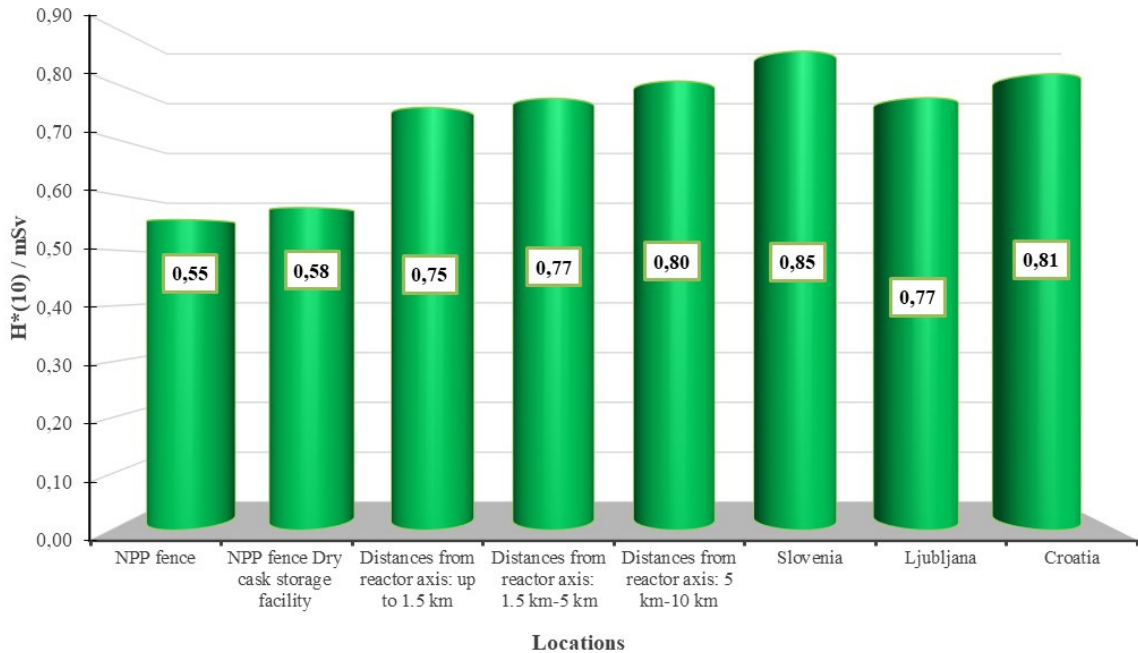


Figure I9: Comparison between average ambient dose equivalents $H^*(10)$ measured in the environment in the vicinity of the Krško NPP, fence perimeter, at the reference location in Ljubljana, and the average ambient dose equivalents measured in environments in Croatia and Slovenia.

Measurements in Slovenia indicate that the average annual ambient dose equivalent in the vicinity of the Krško NPP is systematically slightly lower than in the living environment in Slovenia. This is attributed to the diversity of the Slovenian landscape, orography, soil composition, snow cover thickness, uneven deposition of Cs-137 following the Chornobyl nuclear reactor accident, and other environmental phenomena and conditions that affect the external radiation dose. There are also certain landscape diversities in areas around the Krško NPP, and additional variations in effective doses measured with TLD at nearby sampling points are contributed to by local specifics in dosimeter sampling points in the environment (meadow, field, forest, asphalt surfaces, proximity to buildings, soil temperature, etc.). Figure I10 displays the isodose lines of $H^*(10)$ on the map of Slovenia, with the area around the Krško NPP highlighted.

Continuous $H^*(10)$ measurements with 14 continuous radiation monitors around NEK in 2023 yielded an average value of (0.8 ± 0.1) mSv per year (ranging from 0.64 mSv to 0.97 mSv), which is within the range of measurement value variance, corresponding to the annual ambient dose equivalent determined using thermoluminescent dosimeters (0.78 ± 0.10) mSv. The average annual ambient dose equivalent at 64 monitors under the supervision of the SNSA was (0.78 ± 0.16) mSv in 2023, ranging from 0.46 mSv to 1.20 mSv. This average, along with its variance, can be reliably compared to the measurements obtained using TLD across Slovenia, which stand at (0.85 ± 0.15) mSv. No statistically significant deviations have been observed in comparison to previous years.

External radiation measurements in Slovenia are in all cases characterised by decrease in the annual ambient dose equivalent, especially in the first years after the Chornobyl accident (1986). This trend continues in 2023. It is due to the decay of deposited short-lived gamma emitters, which were the major contributors to the external radiation in the initial period, and the penetration of Cs-137 deeper into the



soil. The annual ambient dose equivalents due to global Cs-137 contamination at sites in the vicinity of Krško NPP, estimated assuming a realistic depth distribution of Cs-137, are in the range between 0.003 mSv and 0.023 mSv. This is comparable to values at points where soil sampling is conducted as part of environmental radioactivity monitoring in the Republic of Slovenia, with the estimated annual dose equivalents $H^*(10)$ ranging from 0.014 mSv to 0.072 mSv.

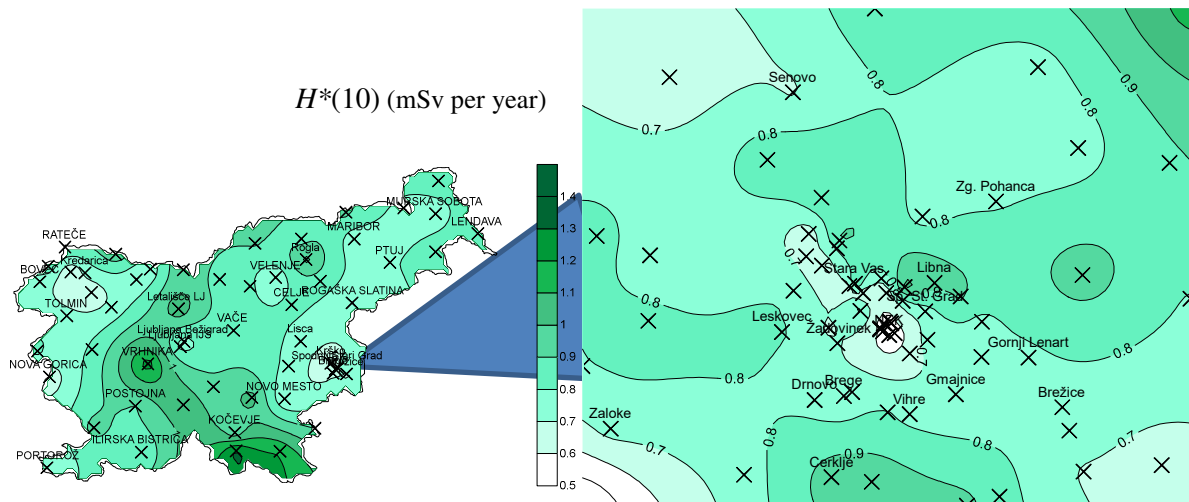


Figure I10: Average annual ambient dose equivalent $H^*(10)$ in Slovenia and in the vicinity of the Krško NPP in 2023

Soil

Soil sampling is carried out in flood-prone areas where aerosols and other particulates in the air settle to the ground, and flooding serves as the main exposure pathway through which NPP emissions can reach the representative person. During summer, on 3 and 4 August 2023, there were extensive flash floods in Slovenia, which also caused severe flooding along the Sava river. Downstream of the Krško NPP dam, the river spilt over a wide area. The high-water spillway of the Brežice HPP was also activated. The floods covered the Amerika, Gmajnice and Kusova Vrbina sampling sites.

Specific activities of Cs-137 in the soil in 2023 ranged from 2.4 Bq/kg at depths of 15–30 cm to 40 Bq/kg at depths of 5–10 cm in Gmajnice, from 15 Bq/kg at depths of 0–5 cm to 23 Bq/kg at depths of 10–15 cm in Amerika, and from 2.4 Bq/kg at depths of 5–10 cm to 4.7 Bq/kg at depths of 15–30 cm in Kusova Vrbina. Statistically, the highest specific activities of Cs-137 were found in Gmajnice and the lowest in Kusova Vrbina. The measurement results reveal significant fluctuations of specific activities of Cs-137 at micro-locations over the years, attributable to the heterogeneity of fresh deposits following the Chernobyl accident and the redistribution of fallout at micro-locations. The redistribution is due to hydrogeological processes influencing the migration of Cs-137 downward into the soil. The observed shift in the centre of gravity of the deposition at the Kusova Vrbina site gives support to this conclusion. The two distinct peaks in the depth of centre of gravity result from flooding, which caused additional deposition of fresh sand. This hypothesis explains why the migration of Cs-137 into the soil is faster than at the other two sites. The initial depth of the centre of gravity of the deposition at Kusova Vrbina, taking into account data from 1992, is correspondingly greater. In addition, it can be noted that it is only in the 10-year moving average that the local inhomogeneity of the fallout and the influence of hydrogeological processes in the upper layers can be averaged out. Figures I11 and I12 show the depth profiles of Cs-137 and Sr-90 fallouts for locations near the Krško NPP: fallouts at three sites in Slovenia are added for comparison. We can observe that the fallouts near the Krško NPP are lower than over Slovenia. We can observe that the fallout in the vicinity of the Krško NPP, in terms of data scattering, is comparable to the values obtained across Slovenia.

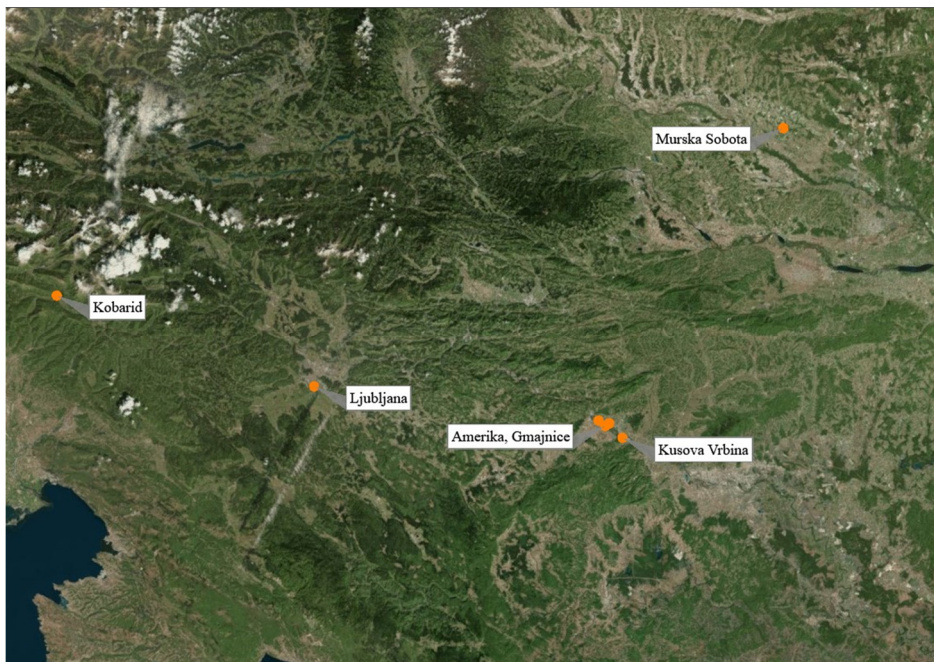


Figure I11: Sampling locations of the soil in Slovenia (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) and in the vicinity of the Krško NPP (Gmajnice, Amerika, Kusova Vrbina) in 2023

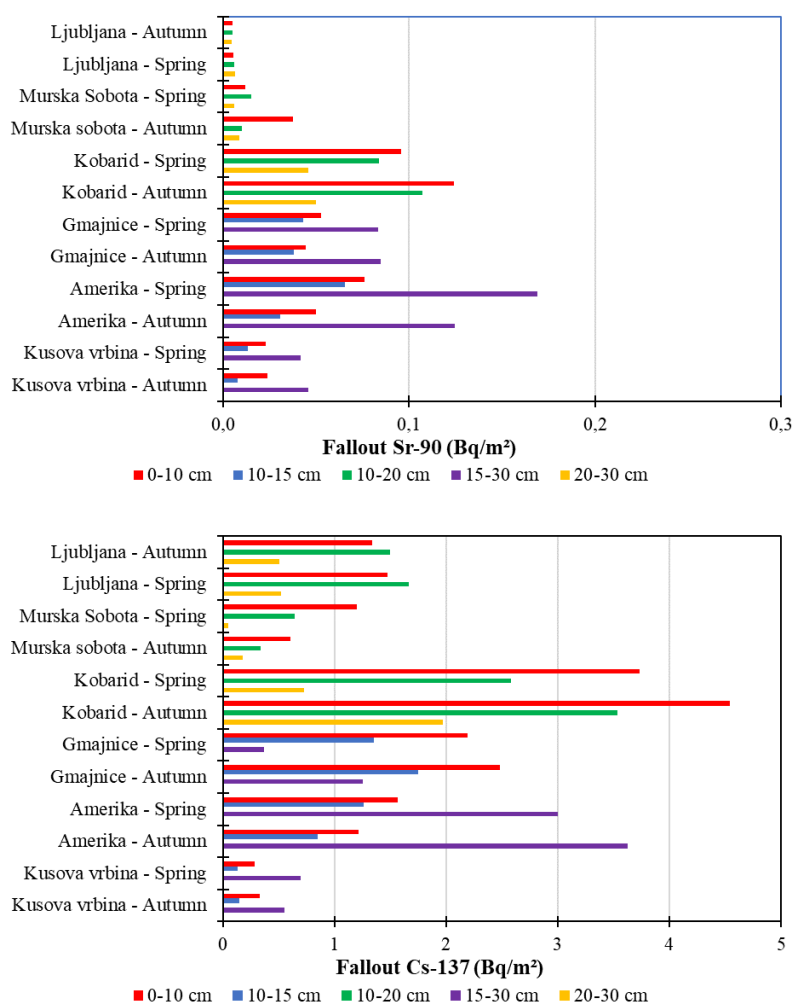


Figure I12: Fallout of Sr-90 and Cs-137 in Slovenia and in the vicinity of the Krško NPP in 2023



In addition to short-lived radionuclides, Co-57, Co-58, Co-60, Se-75, I-131, I-133, Te-127m, and Cs-137 were detected in the NPP emissions in 2023, none of which were found in soil fallouts. None of the radionuclides present in liquid discharges (Mn-54, Co-58, Co-60, Sr-90, Ag-110m, I-131, and Cs-137) were measured in soil samples, except for Sr-90 and Cs-137. However, the measured specific activities of Sr-90 and Cs-137 at locations around the NPP, compared to values at a reference location in Ljubljana and elsewhere in Slovenia, indicate that they result from global contamination rather than NPP discharges.

The natural radionuclides, the progeny of the uranium and thorium decay chains, and K-40 are evenly distributed in the soil, except for Pb-210, which settles from the air as a progeny of Rn-222. The progeny from the thorium decay chain, Ra-228 and Th-228, are in equilibrium at all depths and locations. U-238 and Ra-226 are not in equilibrium, as uranium is more soluble in water than radium and is therefore more easily leached. Measurement results show that specific activities of progeny from the uranium and radium decay series and K-40 at locations exposed to regular flooding are lower. The weighted average of specific activities of K-40 up to a depth of 30 cm was 336 Bq/kg in Kusova Vrbina, 357 Bq/kg in Gmajnice, and 428 Bq/kg in Amerika. Weighted averages for U-238 at the sampling locations ranged from 25 Bq/kg to 33 Bq/kg, for Ra-226 from 36 Bq/kg to 41 Bq/kg, and for Ra-228 and Th-228 from 27 Bq/kg in Kusova Vrbina to 34 Bq/kg in Amerika. The measurement data for the specific activities of natural radionuclides in soil (including K-40, U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228) are consistent, within the range of data variability, with the reported average specific activities—420 Bq/kg for K-40, 33 Bq/kg for U-238, and 45 Bq/kg for Th-232—as documented by UNSCEAR for countries in Southern Europe [42].

In the atmospheric and liquid effluents of the Krško NPP, natural radionuclides are not present, therefore, their contribution to the annual effective dose for the representative person is not assessed.

6) Food (*abstract from the chapter Radionuklidi v hrani*)

In the sampled food we have not detected radionuclides that are typically emitted through either atmospheric or liquid discharges from the Krško NPP. We identified C-14, Cs-137, and Sr-90, which are predominantly of cosmogenic origin or result from global contamination. Measurements of the specific activity of H-3 (in forms of OBT-Organically Bound Tritium or TFWT-Tissue Free Water Tritium) in food are not included in the environmental radioactivity monitoring program around the Krško NPP. To estimate the content of organically bound tritium in vegetation, a study was conducted in 2023 [24].

C-14 is incorporated into plants through the process of photosynthesis and enters the animal and human bodies primarily through the consumption of plant-based food. In 2023, the specific activity of C-14 was measured near the Krško NPP in corn, wheat, apples, grass, hay, and pears in June and September. There were no statistically significant differences between the average C-14 contents in food and vegetation measured in June and September at the same locations (the average ratio of specific activities of C-14 was 1.02). The highest measured specific activity of C-14, (252 ± 8) Bq per kilogram of carbon, was found in grass (location Q, at the eastern fence of the Krško NPP) in September. The measured specific activities of C-14 in food near the Krško NPP are slightly above the average. However, activities of C-14 in food produced near the Krško NPP fence are approximately two percent higher than elsewhere.

The calculated specific activities of radionuclides released into the environment through atmospheric discharges from the Krško NPP ventilation exhaust are at least four orders of magnitude lower than the measured specific activities in food. This explains why the presence of Cs-137 and Sr-90 in food is attributed to global contamination. Specific activities of radionuclides in food around the Krško NPP and throughout Slovenia vary significantly, a result of uneven global contamination, topography, soil composition, and other characteristics of the Slovenian landscape. Within the uncertainty span of averages across food groups, the specific activities of Cs-137 and Sr-90, sampled around the Krško NPP and in Slovenia, are comparable.



Among the natural radionuclides, K-40 is the most abundant in the food, entering through various exposure pathways from the soil (fertilisers and air). The radionuclides from decay schemes of U-238 and Th-232 are also present in the food.

In 2023, the specific activity of K-40 in food produced in the Krško-Brežice field ranged from 30 Bq/kg (strawberries) to 382 Bq/kg (barley), while in food sampled from other parts of Slovenia, it ranged from 12 Bq/kg (apples) to 133 Bq/kg (lettuce). In the vicinity of the Krško NPP, leafy vegetables and grains belong to the group with higher specific activities of K-40, whereas milk and fruit have lower specific activities. This finding is consistent for food sampled throughout Slovenia.

DOSE ESTIMATE

The activity concentrations of radionuclides released from the Krško Nuclear Power Plant, with the exception of H-3, into the environment remain significantly below detection limits and indistinguishable from background levels (notably C-14 and Cs-137). Consequently, their impact on humans and the environment is indirectly inferred from data pertaining to atmospheric and liquid discharges. Exposure to ionizing radiation for a hypothetical individual, termed the representative person, is assessed using sophisticated mathematical models that describe the dispersion and transport of radionuclides through various exposure pathways in the environment.

The representative person concept is used to assess the potential effects of ionizing radiation on the population that could result from discharges from a nuclear facility. This representative person is an abstract concept representing a hypothetical individual in the population who, due to their lifestyle and dietary habits, is exposed to or could be exposed to the highest effective doses of radiation from a particular radionuclide exposure pathway in the environment.

Liquid effluents (Tables B1, B2, B3)

The assessment of radiation effects on the population and the environment, particularly via the Sava river exposure pathway, involves a comparative analysis of emission measurement results—comprising sample analyses from Waste Measuring Tanks (WMTs) and Steam Generator Blowdown (SGBDs) conducted by Krško NPP laboratories—with those obtained from Sava river samples conducted by authorized laboratories. A methodology, along with a model for estimating effective doses to population, was developed in 2003 [27] and updated and revised in 2009, focusing on radiation exposure from Krško NPP's liquid discharges into the Sava river and designating a new reference location [28]. This framework pinpoints the principal transport and exposure pathways in Slovenia and Croatia, identifying representative individuals within these regions.

Dose estimates derived from liquid effluents, presented in Tables B1 and B2, are based on liquid discharge inventories, the annual Sava flow rates, and characteristics of two representative population groups: fishermen operating up to 350 meters downstream from the NPP dam and those fishing near the continuous river water sampling site in Brežice. These tables reveal that the annual effective doses for an adult representative person positioned 350 meters downstream from the NPP dam, and in Brežice, are 12.3 % and 5.8 % of the total radiation effects of the Krško NPP, respectively.

The construction of the Brežice hydroelectric power station and creation of the reservoir's has led to changes in the pathways of population exposure. In the framework of the project *Vpliv HE Brežice na NEK in Poročilo o vplivih na okolje za podaljšanje obratovalne dobe NEK* [34], and in accordance with the Technical Specification *Dose calculation and dilution modelling of a run-of-river Brežice Hydro Plant Accumulation* No. TO.RZ-5/2020, a new methodology for assessing the effects of the operation of the Krško NPP on the population and the surrounding environment due to liquid discharges into the Sava River has been proposed.



Table B1: Estimated annual effective dose of an representative person at a location 350 m downstream the NPP dam in 2023

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	groundshine (river sediment)	Co-58, Co-60	1.6E-6
Internal exposure	Ingestion (fish)	H-3, C-14	4.5E-6

Table B2: Estimated annual effective dose of an representative person at Brežice in 2023

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	groundshine (river sediment)	Co-58, Co-60	7.6E-7
Internal exposure	Ingestion (fish)	H-3, C-14	2.1E-6

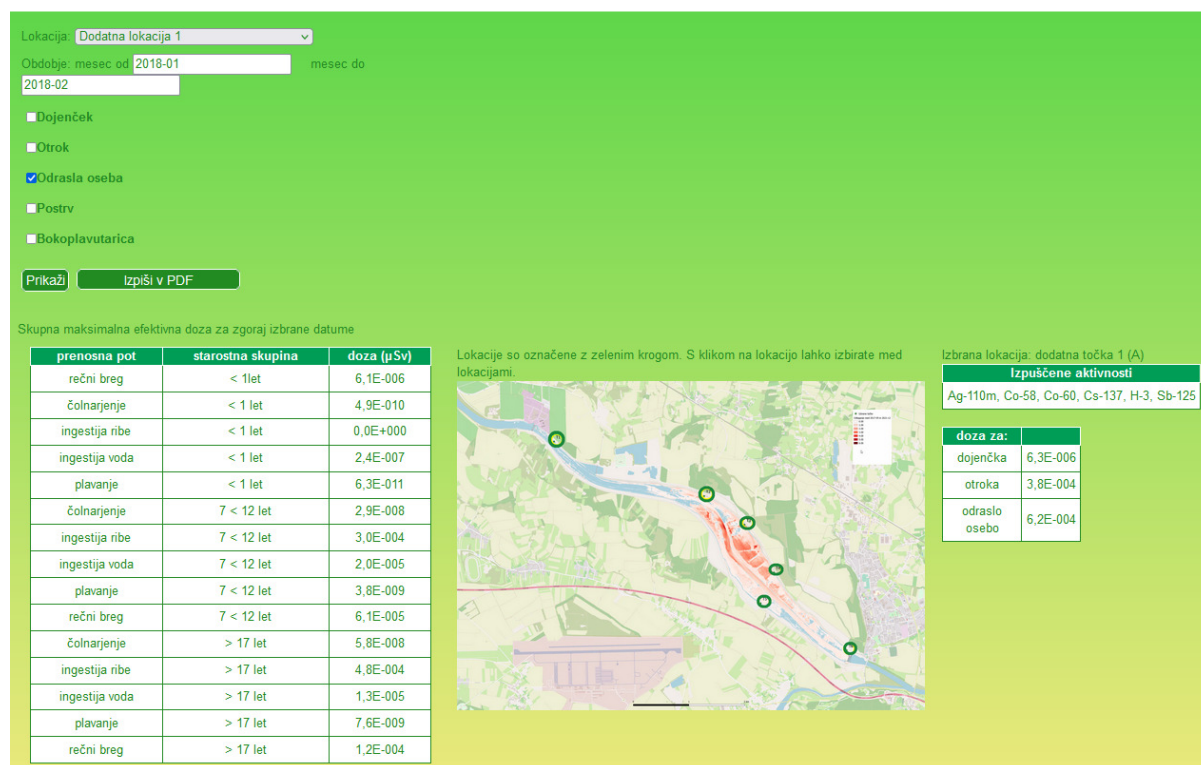


Figure I13: Example of calculated effective doses in the software - DOSENEK [34].

For the theoretical prediction of mixing and dilution, the three-dimensional hydrodynamic transport model PCFLOW3D ([31], [32], [33], [38]), developed at the Faculty of Civil Engineering and Geodesy of the University of Ljubljana (UL FGG) in cooperation with the colleagues of the company IBE (IBE d.d.), was used. The model calculations are based on realistic exposure pathways and representative persons by age groups at seven locations downstream of the Krško NPP dam to the Brežice hydroelectric power station dam.



The Effective Dose Calculation Software (DOSENEK) has been developed in the Microsoft Visual Studio integrated development environment (Figure I13). In our case, it is a web application that allows the input of data into a Microsoft SQL database, calculating effective doses according to the input data and displaying the different calculated doses according to the selected time periods.

Simulations of the Sava river flow in the accumulation lake of the Brežice HPP were carried out using the validated numerical model PCFLOW3D. Based on the simulations for different scenarios or flows rates of the Sava, dilution coefficients were estimated in the surface layer (0 m to 1 m) and the layer from 1 m to 2 m, and also at the depth of 10 m at the location of the sampling basket before the dam of the Brežice HPP. The outcomes can be considered reasonably accurate for the assumed input data. This is because the parameters in the scenarios are determined in the basis of time-averaged data. For the estimation of monthly concentrations, the following assumptions have been made:

- Sava river water is sampled continuously;
- the constant flow of the Sava river in the accumulation lake of the Brežice HPP at the time of each discharge;
- no backwash in the accumulation lake;
- the impact of a discharge is unconditionally attributed to the month in which the discharge starts;
- the uncertainty in the model values is large (maybe an order of magnitude).

As we cannot predict the mass of fish eaten or water drunk at a selected time for a single discharge and compare this with the time of exposure on the shore at the same selected time, we only provide monthly and annual effective doses in the DOSENEK software, which are also considered for a single exposure pathway.

The contribution of each discharge to the average monthly activity concentration of the radionuclide in the Sava river was determined by estimating the fraction of the effective residence time of the highest concentration of the contaminant at the selected location during the month. The effective residence time does not depend on the initial discharge concentration and the discharge volume but only on the flow of the Sava river and the selected location along the Sava. The estimated monthly activity concentration of H-3 is the weighted average of the activity concentrations in the Sava river after the NPP discharges in a given month.

Dilution coefficients were calculated at different Sava flow rates at seven different points downstream of the Krško NPP dam (in the accumulation lake):

- T1: 350 m downstream of the Krško NPP dam, left bank
- T2: spill area - surrogate habitat
- T3: additional site 1 in the Brežice HPP accumulation lake
- T4: left bank of the Brežice HPP accumulation lake
- T5: additional site 2 in the Brežice HPP accumulation lake
- T6: right bank of the Brežice HPP accumulation lake
- T7: before the dam of the Brežice HPP

To calculate the effective doses for a reference person at a single location for different age groups from the population in DOSENEK, we need to enter, among other things, data on discharges:

- date and time of the start and end of the discharge - duration of the discharge (h)
- radionuclide released and its activity (Bq)
- the volume of effluent discharged (m³)
- Sava river flow rate on the day of discharge (m³/s)

We can estimate the effective doses to representative persons and biota from these data. In the DOSENEK programme, there are three age groups of representative persons: infant (< 1 year), child (between 7 and 12 years) and adult (> 17 years). The following possible exposure pathways for these persons have been identified: staying on the river bank, swimming, boating, eating fish and drinking water. For each representative person, the characteristics or typical behavioural parameters affecting the received effective dose are identified for each T1–T7 point in the accumulation lake: time on the river bank, time swimming in the river, time boating in the river, amount of fish ingested and amount of water (unintentionally) drunk while swimming in the river. The characteristics of the representative persons for each point T1–T7 are presented in Table 1.8 in the chapter *Radioaktivnost v reki Savi*.



For an adult, Table B3 lists the effective doses received by individual exposure pathways for radionuclides detected in liquid discharges at the point T1 in the accumulation of the Brežice HPP. The point T1 coincides with the location for which the effective dose is calculated using the authorised model. At points T1 (350 meters from NEK) and T2, activities such as staying on the riverbank, drinking water, and swimming are not considered, which means that only two exposure pathways are taken into account. At T7, we have only one exposure pathway, as there is no boating. At point T3, however, all five exposure pathways are included, so for this point, a complete analysis is conducted in the chapter *Radioaktivnost v reki Savi*.

Table B3: Average annual radionuclide activity concentrations (Bq/m³) and annual doses received (μSv) for an adult for all five exposure pathways at point T1 in the accumulation lake of the Brežice HPP. The maximum effective doses for each exposure pathway are given in bold.

Radionuclide	Average annual activity concentration	Shoreline	Fish ingestion	Water drinking	Swimming	Boating	Total effective dose (radionuclide)
	(Bq/m ³)	(μSv)	(μSv)	(μSv)	(μSv)	(μSv)	(μSv)
H-3	2.0E+04	0.0E+00	2.3E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.3E-03
C-14	2.9E-02	0.0E+00	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.4E-04
Mn-54	1.1E-03	0.0E+00	3.0E-07	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-08	3.1E-07
Fe-55	2.4E-03	0.0E+00	7.1E-07	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.1E-07
Co-58	5.3E-03	0.0E+00	3.9E-06	0.0E+00	0.0E+00	1.9E-07	4.1E-06
Co-60	2.2E-03	0.0E+00	7.5E-06	0.0E+00	0.0E+00	2.0E-07	7.7E-06
Sr-90	3.1E-03	0.0E+00	3.1E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.1E-05
Ag-110m	1.9E-03	0.0E+00	8.0E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-07	2.6E-07
I-131	1.1E-03	0.0E+00	1.6E-06	0.0E+00	0.0E+00	4.3E-09	1.6E-06
Cs-137	1.6E-03	0.0E+00	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	3.3E-08	2.5E-04
Total effective dose (exposure pathway)		0.0E+00	2.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	6.2E-07	2.9E-03

Atmospheric discharges (Tables C1 and C2)

The following groups of radionuclides are included in the evaluation of the effect of atmospheric discharges:

- noble gases, which are exclusively relevant for external exposure during cloud passage;
- pure beta emitters such as H-3 and C-14, which are only biologically relevant in the case of uptake by inhalation (H-3, C-14) and ingestion (C-14);
- beta/gamma emitters in aerosols (radionuclides Co, Cs, Sr, etc.) with exposure pathways: inhalation, external radiation from fallout, ingestion of plants with deposited radionuclides, and resuspension;
- isotopes of iodine in various physical and chemical forms, relevant for inhalation during cloud passage and for intake in milk.

Tables C1 and C2 show the evaluation of the air emissions with the model calculation of the dilution factors in the atmosphere for the year 2023 and for the individual groups of radionuclides along the most important exposure pathways for the adult representative person in the settlement of Spodnji Stari Grad, which is the nearest settlement outside the exclusion zone (Table C1), and along the Krško NPP fence. Estimates are also indicative for a distance of 500 m from the reactor axis (Table C2). The official limitation on the additional exposure of the representative person at the edge of the exclusion zone (500 m from the reactor axis) is valid, together with the requirement that the total annual effective dose contribution of all transmission pathways to an individual member of the population (representative person) should not exceed 0.050 mSv. From Tables



C1 and C2 it can be seen that the contributions to the annual effective dose to an adult resident (representative person) at the NPP fence and also approximately at 500 m from the reactor axis, account for 87.7 % of the total radiation effect of the Krško NPP. Meanwhile, the contribution at Spodnji Stari Grad is 24.6 %.

Table C1: Exposure of an adult resident in Spodnji Stari Grad to ionizing radiation from atmospheric discharges from NPP in 2023

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	– cloudshine – groundshine	– noble gases (Ar-41, isotopes of Xe) – aerosols (Co-60, Cs-137)	1.9 E–7 5.4 E–12
Internal exposure	inhalation	H-3, C-14	1.2 E–5
Internal exposure	ingestion	C-14	0*

* The measurement result is lower than the measurement uncertainty

Table C2: Exposure of an adult resident (representative person) near the Krško NPP fence perimeter due to atmospheric discharges from Krško NPP in 2023. Estimates are also tentatively valid for a distance of 500 m from the reactor axis.

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	– cloudshine – groundshine	– noble gases (Ar-41, isotopes of Xe) – aerosols (Co-60, Cs-137)	3.8 E–7 5.0 E–11
Internal exposure	inhalation	H-3, C-14	2.3 E–5
Internal exposure	ingestion	C-14	2.0 E–5

Since 2007, the dilution factors for external cloud radiation and inhalation are estimated by a Lagrangian model that incorporates the terrain characteristics in the vicinity of the NPP and a larger set of meteorological variables. The model uses all measured data available in the EIS system operated by Krško NPP. For emissions, this is the gas flow through the plant main ventilation (stack). The model also requires the velocity of the exhaust gases and the cross section of the stack at the outlet. In consultation with Krško NPP, the gas temperature at the outlet was set to 25 °C. The contribution of radiation from the plume had, until 2010, also been estimated by a Gaussian model taking into account the ground discharge [3]. The estimate for the 2023 atmospheric discharges is comparable, within the range of data scattering, to results of previous years.

C-14 measurements were conducted in 2023 on samples of corn, wheat, apples, grass, hay, and pears at the Ruđer Bošković Institute in Zagreb in June and September. The results indicate a slight increase in the specific activity of C-14 in samples within a 1 km radius from the reactor axis compared to samples taken at the reference point in Dobova. The estimated annual effective dose from C-14 consumption in the vicinity of the Krško Nuclear Power Plant (NEK) (up to 1 km) is 2E–5 mSv higher than at the control point in Dobova. In calculating the dose from C-14 near the Krško NPP, it was conservatively assumed that individuals consume food grown near NEK (close to the exclusion zone boundary) for two months of the year, and food from elsewhere (Dobova) for the remaining ten months. This assumption implies that the diet includes food produced in the Krško-Brežice area (from the Krško NPP fence to Dobova).

The difference between the effective dose calculation due to C-14 and the effective dose due to intake of other radionuclides in food is that for C-14 a weighted average of the specific activity of C-14 is taken



depending on the sampling location, which is not feasible for other radionuclides due to different sampling methods. The C-14 dose refers to food in general, rather than to specific types of food, since the specific activities of C-14 (in Bq per kilogram of carbon) do not vary significantly among different food types. The ratio of C-14 to C-12 is constant in all organisms and reflects the ratio of the two isotopes in the atmosphere. However, in the case of artificial discharges of C-14, the ratio of C-14 to C-12 isotopes in the atmosphere and in organisms may change as C-14 isotope replaces C-12 isotope in organic molecules.

In 2023, organically bound tritium (OBT) was also analyzed in vegetation. The measurements were conducted at RBI [24]. The activity concentrations in all measured vegetation samples (corn and apples) ranged from (3.0 ± 1.1) Bq/L at the control location in Dobova to (17.8 ± 1.6) Bq/L near the western fence of the Krško NPP (location J). The measured values are below 100 Bq/L, the recommended level by the European Commission for H-3 in drinking water. The effective value per representative person due to OBT content in food is biologically negligible (less than $3E-2 \mu\text{Sv}$).

It is observed that all modes of population exposure (different representative persons) were negligible compared to natural radiation, dose constraints and authorised limits. Despite the floods in August and the leak in the reactor vessel connection pipeline in October, which necessitated an one-off refuelling outage, there was no increase in the radiation effects of the Krško NPP on the public and the environment.

Natural background (Table D)

Measurements of ambient radiation in the vicinity of the Krško NPP in 2023 have reaffirmed previous findings that the area exhibits typical natural background levels comparable to other regions in Slovenia and globally. The annual ambient dose equivalent $H^*(10)$ for gamma radiation and the direct ionizing component of cosmic radiation in the NPP vicinity averages 0.78 mSv outdoors, consistent within data scattering observed in previous years. Additionally, the contribution from neutron cosmic radiation, specific to the Krško NPP area, is 0.08 mSv annually. Consequently, the total dose of natural ambient radiation $H^*(10)$ around the Krško NPP for 2023 was 0.86 mSv per year. The corresponding annual effective dose, utilizing conversion factors from the publication Radiation Protection 106 [87], is calculated to be 0.72 mSv per year, which is below the global average of 0.87 mSv per year. Considering an outdoor occupancy factor of 0.2 and a building shielding factor of 0.1, the effective dose is reduced to 0.66 mSv. In environmental radioactivity monitoring programme in the living environment of Republic of Slovenia for 2023 [15] the annual ambient dose equivalent $H^*(10)$ for gamma radiation was estimated at 0.85 mSv or the corresponding annual effective dose at 0.71 mSv (see chapter *Zunanje sevanje*).

Table D: Effective doses E due to natural radiation sources in the vicinity of Krško NPP in 2023

Source	Annual effective dose <i>E</i> (mSv)
– gamma radiation and the directly ionizing component of cosmic radiation [#]	0.60
– neutron component of cosmic radiation [42]	0.06
Building materials – external radiation (residential living area)	0.44
Ingestion (food, water) and inhalation (natural radionuclides)	0.33
Inhalation of Rn-222 and its progeny	4.32
Total natural radiation	5.75

Notes: [#] The estimate of the effective dose from external radiation is derived from the environmental dose equivalent $H^*(10)$, considering the conversion factor $E/H^*(10) = 0.84$ for 600 keV photons. Conversion factors in the range of 100 keV to 6 MeV lie between 0.84 and 0.89. It has also been taken into account that an adult representative person spends 20% of their time outdoors and that the shielding factor for occupancy within buildings is 0.9. The environmental dose equivalent $H^*(10)$, which was estimated in the section *Zunanje sevanje* of this report, is further multiplied by a factor of 0.84 ([26], [42]).

^{##} From [14].



A 2023 study [14] assessed contributions from external radiation due to building materials at 0.44 mSv, the effective dose from ingestion of food and water, and inhalation at 0.33 mSv, and the significant contribution of short-lived radon progeny to the effective dose at 4.32 mSv. These individual contributions to the natural radiation dose are summarized in Table D and Figure I14. The total annual effective dose was estimated at 5.75 mSv, markedly higher than in previous years (2.35 mSv) and the global average of 2.4 mSv per year. This estimate also exceeds the typical effective dose observed in Europe, as reported in [26].

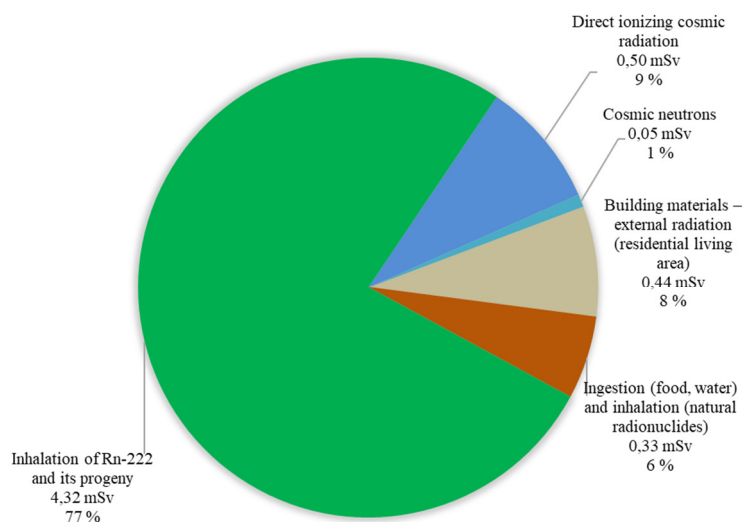


Figure I14: Breakdown of the annual effective dose due to natural ionizing radiation. The data are summarized from the study [14], except for the contributions of direct ionizing radiation and neutron dose (see Chapter *Zunanje sevanje*).

Natural radionuclides

The measured activities of natural radionuclides (uranium and thorium series, K-40, Be-7) do not significantly deviate from the values recorded in other regions of Slovenia or those reported in the literature. This consistency is observed across various matrices, including the Sava river, groundwater, public water supplies, sediments, as well as in the air and food. Moreover, these values are comparable to those obtained in previous years. Further details can be found in [14].

Global contamination (Table E)

In 2023, as in previous years, Cs-137 and Sr-90, originating from the Chernobyl accident and experimental nuclear explosions, were the most prominent anthropogenic radionuclides in soil. The effect of radionuclides released into the atmosphere after the 2011 accident at the Fukushima nuclear power plant in Japan was not detectable in 2023.

The contribution of Cs-137 to the external radiation was estimated to be less than 0.014 mSv per year, which is 1.6 % of the average annual external dose from natural radiation in the vicinity of Krško NPP. The estimate is comparable to previous years in terms of data scattering.

The estimated effective dose due to inhalation of radionuclides resulting from global contamination (Cs-137 and Sr-90) for an adult individual (representative person) is estimated at $2.7 \text{ E}-7$ mSv per year.

Cs-137 and Sr-90 from nuclear tests and the Chernobyl accident have been measured in trace amounts in various individual foodstuffs. The annual effective dose from ingestion of these foods was estimated for 2023 at $1.0 \text{ E}-4$ mSv for Cs-137 and $3.0 \text{ E}-4$ mSv for Sr-90, totalling to 0.5 % of the annual effective dose from naturally occurring radionuclides (excluding K-40) in food. The estimated effective dose is comparable to those of previous years.

The main contributor to the annual effective dose in food is C-14, which enters the food chain naturally and as a result of above-ground nuclear testing in the 1960s.



Table E: Effective doses E due to global contamination in the vicinity of the Krško NPP in 2023

Contribution	Annual effective dose E (mSv)
External radiation (Cs-137 in soil)	0.014
Inhalation (Sr-90 and Cs-137 in air)	2.7 E-7
Ingestion (Sr-90 and Cs-137 in food)	4.0 E-4
Ingestion (Sr-90 in fish)	4.0 E-4
Ingestion (C-14 in food)	1.45 E-2
Total global contamination in the vicinity of the Krško NPP	0.0285

Summary of annual exposures of the representative person in the vicinity of Krško NPP for 2023 (Table F)

Table F presents the individual contributions to the annual effective dose from the discharges from the Krško Nuclear Power Plant in 2023 for an adult representative person at the NPP fence. These estimates are also approximately valid for a distance of 500 meters from the reactor axis. An exception is the dose from external radiation measured by TLDs. During the construction of the facility, the top layer of soil was removed and gravel was piled at the NEK fence, resulting in the average annual ambient dose equivalent in the vicinity of the NPP being 30% higher than that at the fence. Consequently, this document presents the average ambient dose equivalent for the area surrounding the NPP. The sources of ionizing radiation are also depicted in Figure I15.

When summing the values for atmospheric and liquid discharges, it is evident that the impact of controlled discharges from NEK on the population is significantly below the authorized limit. It is important to note that these calculations pertain to different representative individuals (members of the population) and, therefore, the aggregate is merely a rough estimate of the annual effective dose.

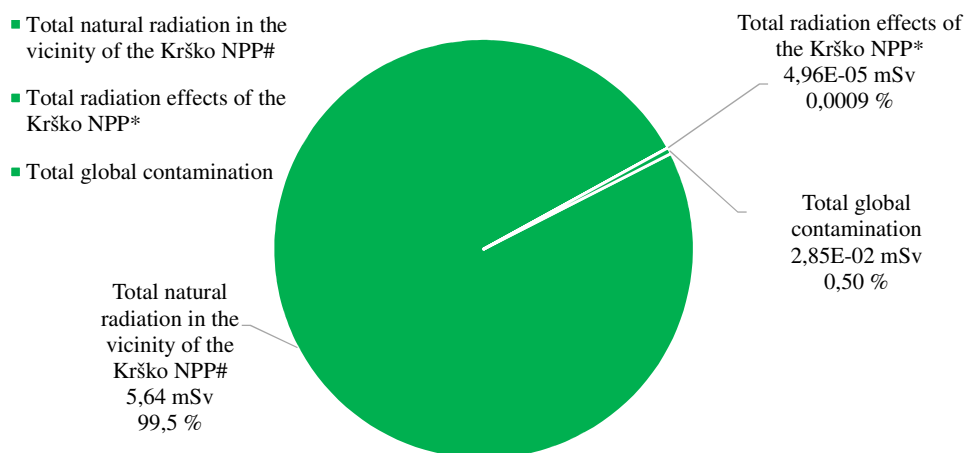


Figure I15: Estimated annual effective dose for an adult representative person due to NPP radiation effects in 2023, global contamination, and natural radiation.


Table F: Summary of annual exposures of the representative person in the vicinity of Krško NPP for 2023

Source	Exposure pathway	Annual effective dose (mSv)
Natural radiation	– gamma radiation and the directly ionizing component of cosmic radiation	0.60 ^{**}
	– neutron component of cosmic radiation	0.06
	– Building Materials – External Radiation (residential living area)	0.44
	– Ingestion (Food, Water) and Inhalation (Natural Radionuclides)	0.33
	– Inhalation of Rn-222 and its progeny	4.32
	Total natural radiation in the vicinity of the Krško NPP[#]	5.75
Krško NPP - direct radiation at the fence of the Krško NPP	– direct irradiation from the Krško NPP buildings	indeterminable
Krško NPP atmospheric discharges (representative person at the Krško NPP fence ^{***})	– external dose (air immersion) – groundshine (Co-60, Cs-137) – inhalation (H-3, C-14) – ingestion (C-14)	3.8 E-7 5.0 E-11 2.3 E-5 2.0 E-5
Krško NPP Liquid effluent (Sava)	- adult representative person at 350 m downstream from the Krško NPP dam	6.1 E-6
	Total radiation effects of the Krško NPP[*]	5.0 E-5
Chernobyl accident, nuclear-weapons tests	- external dose ^{**} - ingestion of vegetable and animal food (without C-14) ^{*****} - ingestion of vegetable food (C-14) ^{*****} - ingestion of fish	1.4 E-2 ^{***} 4.0 E-4 1.45 E-2 3.1 E-4
	Total global contamination in the vicinity of the Krško NPP	2.85 E-2

* The total sum of NPP's contributions is informative, as we add up the contributions that are not necessarily additive since the population groups (representative persons) are not the same. In the total sum, only the estimate of the annual effective dose for the representative person - fishermen fishing 350 m downstream of the Krško NPP dam - is taken into account in the contribution of liquid discharges.

** The estimate of the effective dose from external radiation is derived from the environmental dose equivalent $H^*(10)$, considering the conversion factor $E/H^*(10) = 0.84$ for 600 keV photons. Conversion factors in the range of 100 keV to 6 MeV lie between 0.84 and 0.89. It has also been taken into account that an adult representative person spends 20% of their time outdoors and that the shielding factor for occupancy within buildings is 0.9. The environmental dose equivalent $H^*(10)$, which was estimated in the section *Zunanje sevanje* of this report, is further multiplied by a factor of 0.84 ([26], [42]).

*** From [14].

**** The estimate can approximately be applied at the distance of 500 m from the axis of the reactor.

***** C-14 is a radionuclide with global occurrence, partly of natural origin in the upper atmosphere by a reaction of neutrons from cosmic rays with nitrogen and, to a lesser extent, with oxygen and carbon.

***** Average for locations 1 km off the reactor axis and Dobova

Summarized according to the Table D.



Comparison with previous years (Table G)

Other radionuclides have also been measured in the environment around Krško NPP, mainly as part of global contamination (C-14, Sr-90, Cs-137) or medical use (I-131), or of cosmogenic origin (H-3, C-14). The contributions to the annual effective dose by contamination media for all artificial radionuclides received by the population (adult representative person) from the nearest settlements, or reference sites, and a comparison with previous years are summarised in Table G. The largest contribution in 2023 was due to external radiation - the presence of Cs-137 in soil. The second largest contribution is due to C-14 in food (global contamination, cosmogenic origin). It can also be noted that the sum of the contributions decreases in the course of years, mainly due to the decrease in the estimate due to Cs-137 radiation from soil.

Table G: Overview of annual effective doses for all artificial radionuclides delivered to adult representative person in the vicinity of Krško NPP through various contamination media from 2016 to 2023 (locations with the highest effective doses for each exposure pathway are considered). The detected artificial radionuclides are mainly due to global contamination (C-14, Sr-90, Cs-137), accidental release (Ru-106), or use in medicine (I-131). The ionizing radiation effects of the Krško NPP on the representative person in the immediate surroundings are small compared to the global contamination (Table E): they are estimated at 0.10 % of the authorized dose limit at the border of the Krško NPP exclusion area and beyond.

Contamination medium	Annual effective dose of artificial radionuclides <i>E</i> (mSv)					Location	Remarks
	2019	2020	2021	2022	2023		
Sava river	1.1 E-4	7 E-5	1.1 E-4	1.4 E-4	9.0 E-5	Brežice	drinking (H-3)
	8.3 E-7	1.3 E-6	1.1 E-6	1.5 E-6	1.4 E-6	Brežice	swimming (Cs-137)
	1.4 E-4	1.9 E-4	9.2 E-5	8.7 E-5	3.1 E-4	Brežice	fish ingestion (Sr-90)
Waterworks, pumping stations	2.8 E-5	3.2 E-5	3.1 E-5	1.4 E-5	3.4 E-5	Brege	drinking (H-3)
Precipitation and dry fallout	1.9 E-5	1.8 E-5	1.9 E-5	1.2 E-5	2.0 E-5	Brege	Ingestion of the vegetation (H-3)
Air	4.5 E-7	2.7 E-7	2.1 E-7	9.7 E-8	2.7 E-7	Location average	Inhalation and imersion (Cs-137, Ru-106 (2017))
External radiation**	0.015	0.017	0.014	0.016	0.014	All locations	(Cs-137)
Food	0.0156	0.0151	0.0157	0.0168	0.0145	At the Krško NPP fence***; All locations and at the Krško NPP fence***	ingestion C-14*
	0.0010	0.0016	5.0 E-4	3.5 E-4	4.0 E-4		Sr-90, Cs-137
Total	0.032	0.034	0.030	0.033	0.029		

* C-14 is a radionuclide with global occurrence, partly of natural origin in the upper atmosphere by a reaction of neutrons from cosmic rays with nitrogen and, to a lesser extent, with oxygen and carbon. Smaller doses, yet persisting for about 10 000 years will be delivered by the C-14 (half-life 5730 years), produced during nuclear weapons tests in the atmosphere in concentrations about twice higher than the cosmogenic levels.

** The ambient dose equivalent $H^*(10)$ is used.

*** Valid approximately also at the distance of 500 m from the axis of the reactor.



Figure I16 presents the sum of the estimated annual effective doses of the representative persons due to the Krško NPP emissions from 1989 to 2023. The authorized annual limit of 0.05 mSv is marked. The contributions refer to different representative persons (population groups), so the sum is only a rough estimate of the annual effective dose. From 2001 to 2011, the sum decreases, but in the years since 2012, the annual effective dose of the representative person at the NPP fence (estimates are also tentatively valid for a distance of 500 m from the reactor axis) rose slightly due to the effect of C-14 on the food chain during vegetation: yet it is still two orders of magnitude below the authorised limit. An increase in the annual effective dose can also be observed in 2013 and 2014, but this can be attributed solely to the contribution of C-14 in liquid discharges, which was not taken into account in previous years. In 2023, the summed is lower than in previous years. The low values can be attributed to the low controlled discharges from the Krško NPP. When comparing the contributions in consecutive years, it should also be borne in mind that the Lagrangian model, which gives lower exposure values, has been used since 2007 for the calculation of external cloud radiation and cloud inhalation, and that the dose contribution values due to ingestion of C-14 (from atmospheric releases) up to 2006 were estimated on the basis of releases and data from similar power plants.

Thus, it can be concluded that the radiological effects of NPPs are an order of magnitude lower than those from global contamination and the use of radionuclides in medicine. Moreover, the estimated value of the radiation effects (annual effective dose) of Krško NPP on the representative person along the Krško NPP fence and also at a distance of approximately 500 m from the reactor axis is about 0.001 % of the typical unavoidable natural background.

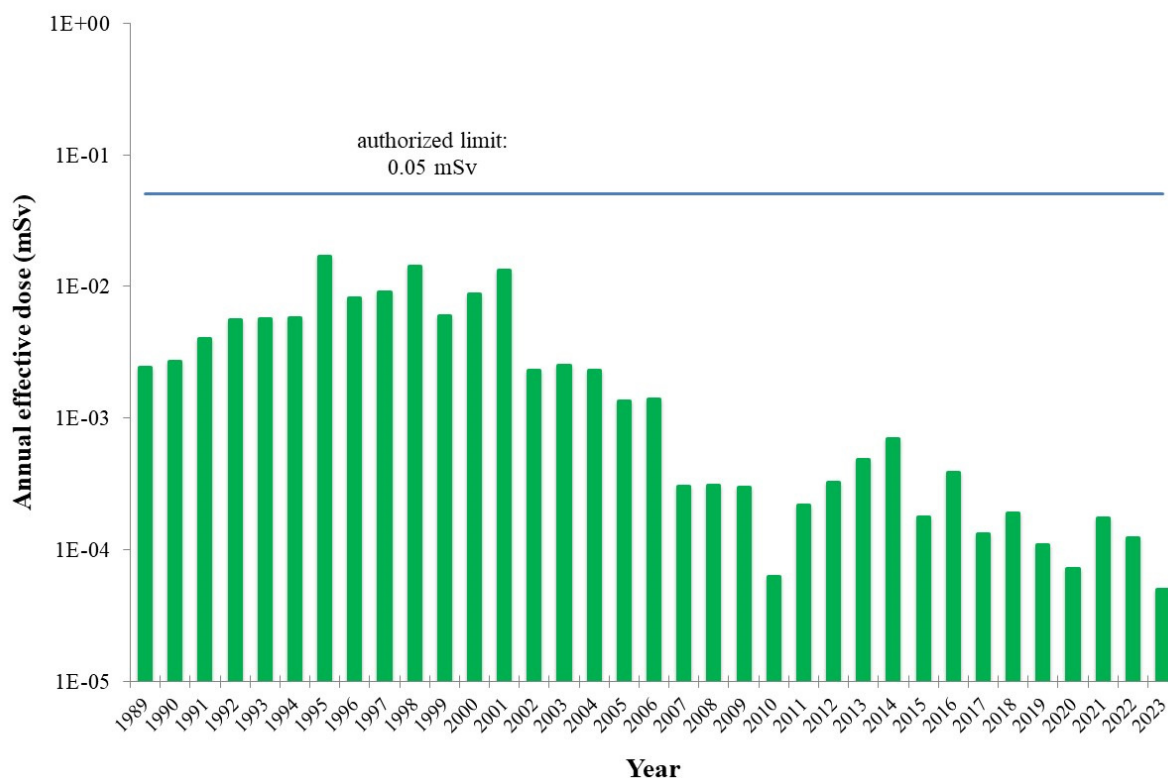


Figure I16: The sum of the estimated annual effective doses of the representative persons - individuals from different population groups - due to the Krško NPP emissions from 1989 to 2023. The authorized annual limit (0.05 mSv) is also marked. The total sum of NPP's contributions is informative, as we add up contributions that are not necessarily additive since the population groups are not the same. The scale is logarithmic.



CONCLUSION

A summary of the radiation effects on the population (representative person) living in the vicinity of Krško NPP for the year 2023 is given in Table F, which lists the contributions from natural radiation, the radiation effects of Krško NPP at the fence perimeter, which is in the exclusion zone, and the residual effects of Chernobyl contamination and nuclear test explosions:

- in 2023, all radiation effects of Krško NPP at the fence perimeter (the estimate is also tentatively valid for a distance of 500 m from the reactor axis) and 350 m downstream of the Krško NPP dam on the (representative person) were estimated to be less than $5.0 \text{ E-}5$ mSv per year;
- the estimated value of the radiation effects of Krško NPP is small compared to the authorised dose limit for the (representative person) in the vicinity of the NPP (effective dose of 0.05 mSv per year at a distance of 500 m and outwards for contributions via all exposure pathways);
- the estimated value of the radiation effects of Krško NPP at the fence perimeter is approximately 0.001 % of the typical unavoidable natural background. The estimate is also tentatively valid for a distance of 500 m from the reactor axis;
- the most significant contributor to the total effective dose is food ingestion (49 %), with C-14 from atmospheric discharges being the major contributor among radionuclides;
- inhalation effective dose due to Krško NPP operation contributes 47 % to the total effective dose. Among the radionuclides, H-3 from atmospheric discharges is the major contributor;
- the effective dose due to Krško NPP operation from external radiation contributes 4 % to the total effective dose. Among the radionuclides, Co-60 from liquid discharges is the major contributor;
- The radiation effects of the emissions from the Krško NPP did not increase following the natural disaster in August and the leakage of the reactor vessel connection pipeline in October.

The sum of the effective dose due to Krško NPP operation contributions calculated from measurements of environmental samples has been decreasing over the years, with the main contributor being the decrease in the estimate due to Cs-137 radiation from the ground (soil). Cs-137 in soil is a residue of airborne and precipitation fallout from the 1986 nuclear reactor accident at Chernobyl, Ukraine.



NEODVISNI NADZOR POOBLAŠČENIH IZVAJALCEV

POVZETEK

Opravljen je bil primerjava rezultatov meritev iz programa neodvisnega nadzora obratovalnega nadzora med laboratoriji NEK, IJS, IRB in ZVD za leto 2023 za izbrane emisijske vzorce tekočinskih izpustov iz odpadnih merilnih rezervoarjev WMT ter za imisijske vzorce iz okolja – posamične vzorce trave in zemlje z lokacije Gmajnice ter podtalnice iz vrtine E1 iz okolice NEK. V letu 2022 je bil program nadzora plinastih emisij spremenjen in sicer je po novem treba določiti vsebnost radionuklidov v štirih vzorcih brisov ali filtrov s povečano aktivnostjo, ki jih zagotovi RZ NEK. Opravljena je bila tudi statistična primerjava vseh rezultatov meritev različnih vzorcev iz okolja v obdobju 2017–2023. Glede na kompleksnost postopkov vzorčenja, priprave vzorcev in meritev lahko ocenimo, da so ujemanja med sodelujočimi laboratoriji dobra, predvsem pri vzorcih, kjer sta vzorčenje in priprava enostavna. Ponovno predlagamo, da bi sočasno sodelovali obe neodvisni inštituciji – IJS in ZVD – pri neodvisnem nadzoru meritev vsebnosti umetnih radionuklidov v vzorcih tekočih in plinastih emisij (WMT in filtri ali brisi), ki vsebujejo merljive vsebnosti umetnih radionuklidov.

UVOD

Na podlagi sklepov verifikacijske komisije po 35. členu pogodbe EURATOM iz leta 2007 in v skladu z *Zakonom o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti* [6] ter *Pravilnikom o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8] se izvaja neodvisni nadzor meritev obratovalnega nadzora NE Krško, ki ga razpiše in vodi upravni organ (URSJV). Skladno z zakonodajo lahko meritve iz programa obratovalnega nadzora in meritve neodvisnega nadzora izvajajo le pooblašчени laboratoriji. Neodvisnost preverjanja je zagotovljena s tem, da izvajalec, ki izvaja meritve v sklopu obratovalnega nadzora, ne more izvajati enakih meritev v okviru neodvisnega nadzora. Projektna naloga *Neodvisni nadzor obratovalnega monitoringa NE Krško za leto 2023* [13] obsega tri sklope. Sklopa 1 in 2 obravnavata nadzor emisij (tekoči in plinasti izpusti), medtem ko sklop 3 obravnava nadzor meritev v okolju – primerjavo vzorčenja in meritev izbranih vzorcev (imisijske meritve). V tabelah 1–3 je prikazan program meritev v vseh treh sklopih. Od leta 2010 do 2019 je bil nabor vzorcev v programu teh meritev stalen in se ni spreminjal, v letih 2020 in 2021 je URSJV izbral drugačen nabor vzorcev iz okolja (imisijskih meritev). V letu 2022 pa je URSJV spremenil tudi program emisijskih meritev.

V letu 2023 je program meritev emisij v tekočinskih izpustih obsegal meritve enkratno odvzetih vzorcev vode iz izpustov iz odpadnih merilnih rezervoarjev (WMT) za določitev vsebnosti radionuklidov z visokoločljivostno spektrometrijo gama, kjer sta sodelovala laboratorij NEK kot izvajalec obratovalnega nadzora in laboratorij ZVD kot izvajalec neodvisnega nadzora. Vsebnosti tritija v okviru neodvisnega nadzora je določal IJS, Odsek O-2. Ta del neodvisnega nadzora se izvaja na enak način kot prejšnja leta. IJS in ZVD se kot izvajalca neodvisnega nadzora izmenjujeta z letno periodo. Za razliko od leta 2022 so se na vzorcih vode iz WMT letos ponovno določale koncentracije aktivnosti H-3 in ne C-14 kot v letu 2022. V skladu s pogodbo in pripadajočo projektno nalogo mora odvzem vzorcev za redne meritve NEK in neodvisni nadzor potekati istočasno pod nadzorstvom predstavnika URSJV v vnaprej dogovorjenih terminih. Vsi izvajalci (IRB, ZVD, IJS in NEK) nato opravijo meritve prevzetih vzorcev po svojih postopkih. ZVD je tako prejel enkratne vzorce vode iz WMT za meritve vsebnosti radionuklidov z visokoločljivostno spektrometrijo gama, IJS Odsek O-2 pa je prejel vzorce za določitev vsebnosti H-3.



Pri neodvisnem nadzoru emisij – plinastih izpustov smo do leta 2022 analizirali vzorce filtrov iz glavnega izpuha RM-24, pri čemer sta sodelovala laboratorija IJS kot izvajalec obratovalnega nadzora in ZVD kot izvajalec neodvisnega nadzora. Običajno v teh filterih ni umetnih radionuklidov nad mejo detekcije, zato primerjave niso prinesle nobene dodane vrednosti. Tako so v letu 2022 program nadzora plinastih emisij spremenili in sicer je po novem treba določiti vsebnost radionuklidov v brisih ali filterih s povečano aktivnostjo, ki jih zagotovi RZ NEK. Opravljena je bila primerjava rezultatov med NEK kot izvajalcem rednih meritev in ZVD kot izvajalcem meritev v okviru neodvisnega nadzora.

Tabela 1: Program nadzora emisij – tekočinski izpusti (sklop 1) za leto 2023

VRSTA IN OPIS MERITVE	VZORČEVALNO MESTO	VRSTA VZORCA	POGOSTOST VZORČENJA	LETNO ŠT. MERITEV
Izotopska analiza sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama	Odpadni merilni rezervoarji (WMT)	Enkratni vzorec, odvzet hkrati za NEK, za izvajalca primerjalnih meritev	4-krat letno (četrtletno)	4 (brez joda in žlahtnih plinov)
Specifična analiza, scintilacijska spektrometrija H-3	Odpadni merilni rezervoarji (WMT)	in za neodvisni nadzor (manj kot 0,5 L vode)	4-krat letno (četrtletno)	4 (brez joda in žlahtnih plinov)

Tabela 2: Program nadzora emisij – plinasti izpusti (sklop 2) za leto 2023

VRSTA IN OPIS MERITVE	VRSTA VZORCA	POGOSTOST VZORČENJA	LETNO ŠT. MERITEV
Izotopska analiza sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama	Bris ali filter s povečano aktivnostjo (zagotovi RZ NEK)	4-krat letno	4
Alfa aktivnosti		1-krat letno*	1

* Za meritev aktivnosti alfa se med filtri ali brisi izbere tistega, za katerega RZ NEK oceni, da je najbolj primeren.

Tabela 3: Program nadzora imisij (sklop 3) za leto 2023

VRSTA IN OPIS MERITVE	VZORČEVALNO MESTO	VRSTA VZORCA	LETNO ŠT. MERITEV
Izotopska analiza sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama	Gmajnice	Zemlja (neobdelana)*	4
	Vrtina E-1	Podtalnica	1
Specifična analiza, določitev koncentracije Sr-90	Gmajnice	Zemlja (neobdelana)*	4
	Vrtina E-1	Podtalnica	1
Specifična analiza, določitev koncentracije H-3	Vrtina E-1	Podtalnica	1

* trava, 0–5 cm, 5–10 cm, 10–15 cm



V letih 2010–2019 sta se pri neodvisnem nadzoru imisij (okoljskih vzorcev) 2-krat letno istočasno vzorčila sediment in savska voda iz rednega nadzora radioaktivnosti na dveh lokacijah v okolici NEK (Krško in Brežice). V letu 2020 je URSJV program imisijskih meritev spremenil in predpisal primerjavo enkratnih sezonskih vzorcev sadja in žitaric, v letu 2021 so se primerjali rezultati meritev vsebnosti radionuklidov v vzorcih mleka in H-3 v padavinah. V letu 2022 so bile v okviru neodvisnega nadzora opravljene primerjave rezultatov meritev z visokoločljivostno spektrometrijo gama in stroncija Sr-90 dveh vzorcev sadja (jabolka in hruške) ter dveh vzorcev poljščin (feferoni in paprika). Pri teh meritvah sta sodelovala ZVD in IJS, pri vzorcih sadja je IJS opravil redne meritve in ZVD neodvisni nadzor, pri vzorcih poljščin pa obratno. V letu 2023 so bile za neodvisni nadzor izbrane primerjave meritev trave, zemlje z globin 0–5 cm, 5–10 cm, 10–15 cm in podtalnice iz vrtine E1. Pri teh primerjavah sta sodelovala IJS kot izvajalec rednih meritev in ZVD kot izvajalec meritev v okviru neodvisnega nadzora. Vsebnosti tritija v okviru neodvisnega nadzora je določal IJS, Odsek O-2. Vsi izvajalci, IJS in ZVD, so pripravili vzorce in opravili meritve po svojih postopkih.

REZULTATI MERITEV S ČASOVNIMI POTEKI

Primerjava rezultatov meritev za leto 2023

Rezultate ($y + u(y)$) rednih meritev izvajalcev obratovalnega nadzora in meritev neodvisnega nadzora smo primerjali z ζ -preskusom, ki je definiran kot:

$$\zeta\text{-preskus} = \frac{y_{\text{LAB}_1} - y_{\text{LAB}_2}}{\sqrt{u(y)_{\text{LAB}_1}^2 + u(y)_{\text{LAB}_2}^2}}$$

kjer sta LAB_1 in LAB_2 okrajšavi za prvi in drugi laboratorij, ki sodelujeta v primerjavi. Prednost ζ -preskusa je, da v medsebojni primerjavi poleg rezultatov posameznih laboratorijev vključuje tudi pripadajoči merilni negotovosti s faktorjem pokritja $k = 1$ ter da v primerjavi z u -preskusom (preskus absolutnih vrednosti ζ) prikaže tudi sistematska odmikanja. Rezultate smo primerjali za vsak radionuklid posebej, vendar le tiste rezultate meritev, o katerih sta poročala oba laboratorija. V primeru, ko je bil en rezultat označen kot meja kvantifikacije ali detekcije, ζ -preskusa nismo naredili. Pri ovrednotenju rezultatov smo uporabili merila, definirana v standardu *ISO/IEC 17043:2010 Conformity assessment – General requirements for proficiency testing*. Rezultati so med seboj primerljivi, ko je $|\zeta| \leq 2$.

V tabelah od 4 do 9 so prikazani rezultati neodvisnih meritev izvajalcev obratovalnega nadzora in rednih meritev ter njihove medsebojne primerjave. **S krepkim tiskom na sivi podlagi so označene vse vrednosti ζ -preskusa, ki so po absolutni vrednosti večje od 2.**

V tabeli 4 so podane primerjave med rezultati ZVD in NEK meritev vod iz odpadnih merilnih rezervoarjev WMT (sklop 1). Sporočeni in primerjani so le rezultati za umetne radionuklide. Ker NEK pri rednih meritvah poroča o svojih rezultatih s 95-odstotno zanesljivostjo (faktor pokritja $k = 2$), so bile vse negotovosti v tabeli 4 preračunane na 68-odstotno zanesljivost (faktor pokritja $k = 1$). V skladu s priporočili EURATOM-a (2004/2/Euratom) poroča NEK za posamezne ključne neizmerjene radionuklide aktivnosti, izračunane na podlagi ene četrte meje detekcije (MDA). Te aktivnosti so v primerjalnih tabelah obarvane modro in jih nismo primerjali z rezultati ZVD. V vzocih, ki so bili vključeni v primerjave za neodvisni nadzor v letu 2023, NEK ni določil nobene aktivnosti sevalcev gama nad mejo detekcije, zato ne moremo med seboj primerjati nobenega rezultata meritev z visokoločljivostno spektrometrijo gama. Opravimo lahko le primerjavo rezultatov določitve vsebnosti H-3, ki sta ga določila oba sodelujoča laboratorija (NEK in IJS, Odsek O-2) v vseh 4 vzorcih. Vsi ti rezultati so med seboj primerljivi z ζ -preskusi med $-0,19$ in $0,17$.



Tabela 4: Primerjava rezultatov emisijskih meritev tekočinskih izpustov iz WMT *

Vzorč. mesto	WMT											
	IJS, Odsek F-2 (gama spektrometrija), Odsek O-2 (C-14)				NEK				ζ-preskus			
Datum vzor.	16. 3. 2022	28. 6. 2022	28. 8. 2022	13. 12. 2022	16. 3. 2022	28. 6. 2022	14. 9. 2022	13. 12. 2022	Prvi vzorec	Drugi vzorec	Tretji vzorec	Četrti vzorec
Kol. vzorca (L)	0,30	0,26	0,25	0,27	1,0	1,0	1,0	1,0				
Koda vzorca	KI22WWM31	KI22WWM61	KI22WWM91	KI22WWMC1	16.03.2022 WMT#2	28.06.2022 WMT#2	14.09.2022 WMT#2	13.12.2022 WMT#2				
IZOTOP	KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI (Bq/m ³)											
Na-22												
Cr-51												
Mn-54	3,5E+02 ± 1E+02			2,7E+02 ± 1E+02				< 3,4E+02				
Fe-59								< 4,5E+02				
Co-57												
Co-58	7,6E+02 ± 1E+02	1,7E+02 ± 8E+01		7,7E+03 ± 5E+02	< 5,5E+2	< 3,0E+2	< 2,9E+02	8,1E+03 ± 7E+02				-0,47
Co-60	3,6E+03 ± 6E+02	1,4E+03 ± 1E+02	6,4E+02 ± 6E+01	3,7E+03 ± 2E+02	< 5,0E+3	< 5,7E+2	< 5,5E+02	3,8E+03 ± 4E+02				-0,31
Zn-65												
Sr-85												
Y-88												
Y-92												
Zr,Nb-95												
Zr-95												
Nb-95												
Nb-97												
Mo-99												
Tc-99m												
Ru-103												
Ru-106												
Ag-110m	2,8E+03 ± 2E+02	6,7E+02 ± 1E+02	5,8E+02 ± 7E+01	1,4E+03 ± 2E+02	< 8,6E+2	< 4,5E+2	< 3,7E+02	1,7E+03 ± 3E+02				-0,91
Sn-117m												
Sb-124												
Sb-125	5,7E+02 ± 2E+02	9,2E+03 ± 6E+02	4,4E+02 ± 9E+01					< 9,6E+02				
Te-123m												
Te-125m	4,2E+03 ± 6E+02	1,9E+03 ± 4E+02	1,9E+03 ± 4E+02									
Te-127m	9,2E+03 ± 1E+03			8,2E+03 ± 2E+03								
Te-129m												
Te-132												
I-131												
I-133												
Cs-134												
Cs-137	3,5E+02 ± 8E+01	2,0E+02 ± 1E+02	1,2E+02 ± 6E+01		< 9,1E+2	< 4,5E+2	< 4,4E+02	< 5,7E+02				
Ba-140												
La-140												
Ce-141												
Ce-144												
Fe-55												
C-14	9,5E+04 ± 4E+03	2,7E+05 ± 1E+04	1,2E+05 ± 1E+04	7,0E+04 ± 5E+03								



Vzorč. mesto	WMT											
Pooblaščenca organizacija	ZVD (spektrometrija gama) IJS, Odsek O-2 (H-3)				NEK				ζ-preskus			
Datum vzor.	4. 3. 2023	15. 6. 2023	8. 9. 2023	7. 12. 2023	4. 3. 2023	16. 6. 2023	8. 9. 2023	7. 12. 2023	Prvi vzorec	Drugi vzorec	Tretji vzorec	Četrti vzorec
Kol. vzorca (L)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
Koda vzorca	RV0590323	RV2220623	RV4020923	RV5141223	4.3.2023 WMT#2	16.6.2023 WMT#2	8.9.2023 WMT#2	13.12.2022 WMT#2				
IZOTOP	KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI (Bq/m ³)											
Na-22												
Cr-51												
Mn-54												
Fe-59												
Co-57												
Co-58	1,8E+02 ± 3E+01	4,1E+02 ± 7E+01	1,6E+03 ± 9E+01	2,6E+03 ± 2E+02	< 6,5E+02	< 6,5E+02						
Co-60	4,3E+02 ± 4E+01	1,1E+03 ± 7E+01	3,3E+02 ± 5E+01	3,3E+02 ± 5E+01	< 6,3E+02	< 6,4E+2	< 6,4E+02	< 9,8E+02				
Zn-65												
Sr-85												
Y-88												
Y-92												
Zr,Nb-95												
Zr-95												
Nb-95												
Nb-97												
Mo-99												
Tc-99m												
Ru-103												
Ru-106												
Ag-110m	1,8E+02 ± 3E+01		3,8E+02 ± 5E+01		< 5,8E+02	< 8,4E+2	< 6,4E+02	< 9,1E+02				
Sn-117m												
Sb-124												
Sb-125		2,3E+03 ± 2E+02	2,0E+03 ± 1E+02				< 9,1E+02					
Te-123m												
Te-125m												
Te-127m												
Te-129m												
Te-132												
I-131												
I-133												
Cs-134												
Cs-137			8,5E+02 ± 8E+01		< 7,3E+02	< 9,1E+2	< 8,5E+02	< 1,0E+03				
Ba-140												
La-140												
Ce-141												
Ce-144												
Fe-55												
H-3	1,2E+09 ± 1E+07	6,8E+09 ± 6E+07	2,2E+10 ± 2E+08	1,4E+10 ± 1E+08	1,2E+9 ± 2E+08	6,7E+9 ± 9E+08	2,2E+10 ± 3E+09	1,4E+10 ± 2E+09	0,00	0,17	-0,19	0,11

* Vse negotovosti so podane s faktorjem pokritja $k = 1$ (interval z 68-odstotno zanesljivostjo). Z modro barvo so označeni tisti rezultati, ki jih je NEK izračunal na podlagi $\frac{1}{4}$ MDA.



Tabela 5: Rezultati in primerjava emisijskih meritev zračnih izpustov*

Vzorč. mesto	NEK Krško									
Pooblaščenca organizacija	ZVD		NEK		ζ-preskus	ζ-preskus				
Vrsta vzorca	bris		bris							
Datum vzorčevanja	8. 5. 2023	24. 7. 2023	8. 5. 2023	24. 7. 2023	prvi bris	drugi bris				
Kol. vzorca (kg)	vzorec		vzorec							
Koda vzorca	RV2540723	RV2810723	Bris Co-Cs	680-23						
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/vzorec)									
Cr-51										
Mn-54										
Co-56										
Co-57										
Co-58										
Co-60	4,5E+01	2E+00	7,3E+00	2E-01	5,2E+01	5E+00	8,2E+00	1E+00	-1,39	-0,67
Zn-65			6,0E+00	2E-01			6,9E+00	1E+00		-0,80
Br-82										
Y-88										
Zr-95			8,7E+00	2E-01			7,2E+00	1E+00		1,04
Nb-95			1,6E+01	5E-01			1,3E+01	2E+00		1,85
Ru-106										
Cd-109										
Sn-113										
I-131										
Cs-134										
Cs-137	1,6E+02	4E+00			1,4E+02	1E+01			1,56	
Ce-139										
Ag-110m										
Alfa aktivnost	< 6,8E-01									

* Vse negotovosti so podane s faktorjem pokritja $k = 1$ (interval z 68-odstotno zanesljivostjo).

Tabela 6: Rezultati in primerjava emisijskih meritev zračnih izpustov*

Vzorč. mesto	NEK Krško					
Pooblaščenca organizacija	ZVD		NEK		ζ-preskus	ζ-preskus
Vrsta vzorca	bris		bris			
Datum vzorčevanja	30. 10. 2023	30. 10. 2023	30. 10. 2023	30. 10. 2023	tretji bris	četrti bris
Kol. vzorca (kg)	vzorec		vzorec			
Koda vzorca	RV4791023	RV4801023	1025-23	1026-23		
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/vzorec)					
Cr-51						
Mn-54	1,8E+01 ± 1E+00			1,9E+01 ± 4E+00		-0,10
Co-56						
Co-57	1,3E+01 ± 9E-01	3,0E+00 ± 3E-01	1,8E+01 ± 3E+00			-1,76
Co-58	1,9E+03 ± 5E+01	4,2E+02 ± 1E+01	2,0E+03 ± 1E+02	4,0E+02 ± 2E+01		-0,60
Co-60	7,7E+02 ± 3E+01	2,1E+02 ± 8E+00	8,5E+02 ± 5E+01	2,0E+02 ± 1E+01		-1,36
Zn-65	6,2E+00 ± 2E+00					0,55
Br-82						0,50
Y-88						
Zr-95	7,9E+00 ± 1E+00					
Nb-95	6,7E+01 ± 4E+00		7,6E+01 ± 6E+00	6,1E+00 ± 2E+00		-1,18
Ru-106	1,0E+02 ± 1E+01					
Cd-109						
Sn-113						
I-131						
Cs-134						
Cs-137						
Ce-139						
Ag-110m	3,5E+02 ± 6E+00	4,0E+00 ± 3E-01	3,6E+02 ± 2E+01			-0,47
Alfa aktivnost	< 6,8E-01					

* Vse negotovosti so podane s faktorjem pokritja $k = 1$ (interval z 68-odstotno zanesljivostjo).



Tabela 7: Primerjava rezultatov meritev vsebnosti radionuklidov v vzorcih trave in zemlje *

Vzorč. mesto	Gmajnice						
Pooblaščen organizacija	ZVD			IJS		trava	zemlja 0-5 cm
Vrsta vzorca	trava poročani rezultati	trava preračunano	zemlja (0-5 cm)	trava	zemlja (0-5 cm)		
Datum vzorčevanja	26. 9. 2023	26. 9. 2023	26. 9. 2023	26. 9. 2023	26. 9. 2023		
Kol. vzorca (kg)	0,50	0,50	0,41	0,16	0,32	ζ-preskus	ζ-preskus
Koda vzorca	RV4100923	RV4100923	RV4070923	K23ZN11T91	K23ZN11AB91		
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)						
U-238			3,6E+01 ± 7E+00	‡ 1,2E+00 ± 1E+00	3,0E+01 ± 5E+00		0,79
Ra-226	5,7E-01 ± 3E-02	1,6E+00 ± 2E-01	3,4E+01 ± 9E-01	7,7E+00 ± 4E+00	4,3E+01 ± 4E+00	-1,60	-2,10
Pb-210	1,6E+01 ± 1E+00	6,4E+01 ± 6E+00	7,8E+01 ± 7E+00	5,1E+01 ± 4E+00	2,7E+01 ± 2E+01	1,87	2,54
Ra-228	3,9E-01 ± 6E-02	1,7E+00 ± 2E-01	3,4E+01 ± 1E+00	1,0E+00 ± 5E-01	3,2E+01 ± 1E+00	1,30	1,12
Th-228	6,6E-01 ± 3E-02	5,0E-01 ± 2E-01	1,9E+01 ± 6E+00	1,9E+00 ± 4E-01	3,2E+01 ± 9E-01	-3,35	-2,40
Th-230							
K-40	1,2E+02 ± 6E+00	4,4E+02 ± 3E+01	4,1E+02 ± 1E+01	6,4E+02 ± 2E+01	3,8E+02 ± 1E+01	-5,62	1,31
Be-7	1,5E+02 ± 5E+00	5,5E+02 ± 3E+01	1,2E+01 ± 1E+00	5,4E+02 ± 2E+01	1,6E+01 ± 2E+00	0,23	-1,66
I-131							
Cs-134							
Cs-137	1,0E-01 ± 1E-02	3,9E-01 ± 6E-02	3,7E+01 ± 1E+00	1,4E+00 ± 2E-01	3,7E+01 ± 2E+00	-5,99	0,10
Co-58							
Co-60							
Cr-51							
Mn-54							
Zn-65							
Nb-95							
Ru-106							
Sb-125							
Sr-90	5,4E-01 ± 1E-01	5,4E-01 ± 1E-01	5,7E-01 ± 2E-01	6,0E-01 ± 5E-02	7,0E-01 ± 9E-02	-0,41	-0,75

* Vse negotovosti so podane s faktorjem pokritja $k = 1$ (interval z 68-odstotno zanesljivostjo). S krepkim tiskom na sivi podlagi je označen ζ-preskus, ki je po absolutni vrednosti večji od 2.
 (‡) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije.

Tabela 8: Primerjava rezultatov meritev vsebnosti radionuklidov v vzorcih zemlje*

Vzorč. mesto	Gmajnice					
Pooblaščen organizacija	ZVD		IJS		zemlja 5-10 cm	zemlja 10-15 cm
Vrsta vzorca	zemlja (5-10 cm)	zemlja (10-15 cm)	zemlja (5-10 cm)	zemlja (10-15 cm)		
Datum vzorčevanja	26. 9. 2023	26. 9. 2023	26. 9. 2023	26. 9. 2023		
Kol. vzorca (kg)	0,52	0,57	0,39	0,39	ζ-preskus	ζ-preskus
Koda vzorca	RV4080923	RV4090923	K23ZN11C91	K23ZN11D91		
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)					
U-238	4,2E+01 ± 8E+00	3,6E+01 ± 6E+00	3,0E+01 ± 4E+00	3,6E+01 ± 3E+00	1,32	0,08
Ra-226	3,6E+01 ± 7E-01	3,4E+01 ± 8E-01	4,1E+01 ± 4E+00	2,7E+01 ± 8E+00	-1,25	0,90
Pb-210	7,2E+01 ± 6E+00	6,0E+01 ± 5E+00	3,1E+01 ± 1E+01	5,9E+01 ± 4E+00	3,26	0,17
Ra-228	3,5E+01 ± 8E-01	3,6E+01 ± 9E-01	3,2E+01 ± 1E+00	3,5E+01 ± 1E+00	2,35	0,41
Th-228	2,9E+01 ± 4E+00	3,3E+01 ± 1E+00	3,1E+01 ± 9E-01	3,4E+01 ± 1E+00	-0,46	-0,14
Th-230			‡ 1,8E+01 ± 4E+01	1,0E+02 ± 4E+01		
K-40	4,2E+02 ± 1E+01	4,2E+02 ± 1E+01	3,8E+02 ± 1E+01	3,9E+02 ± 1E+01	1,80	1,19
Be-7						
I-131						
Cs-134						
Cs-137	4,2E+01 ± 1E+00	4,4E+01 ± 2E+00	4,0E+01 ± 2E+00	3,9E+01 ± 1E+00	0,66	2,19
Co-58						
Co-60						
Cr-51						
Mn-54						
Zn-65						
Nb-95						
Ru-106						
Sb-125						
Sr-90	5,0E-01 ± 1E-01	3,6E-01 ± 2E-01	6,8E-01 ± 7E-02	8,6E-01 ± 2E-01	-1,31	-1,79

* Vse negotovosti so podane s faktorjem pokritja $k = 1$ (interval z 68-odstotno zanesljivostjo). S krepkim tiskom na sivi podlagi je označen ζ-preskus, ki je po absolutni vrednosti večji od 2.
 (‡) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije.


Tabela 9: Primerjava rezultatov meritev vsebnosti radionuklidov v vzorcu podtalnice*

Vzorč. mesto	Vrtina E1		
Pooblaščenca organizacija	ZVD (spektrometrija gama, Sr-90) IJS, Odsek O-2 (H-3)	IJS	ζ-preskus
Vrsta vzorca	podtalnica		
Datum vzorčevanja	26. 9. 2023	26. 9. 2023	
Kol. vzorca (kg)	52,78	50,87	
Koda vzorca	RV4110923	K23VRE191	
IZOTOP	KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI (Bq/m ³)		
U-238		5,4E+00 ± 4E+00	
Ra-226	9,3E-1 ± 3E-01	3,3E+00 ± 8E-01	-2,69
Pb-210	2,4E+1 ± 3E+00	‡ 8,4E-01 ± 1E+00	
Ra-228	2,3E+0 ± 6E-01	2,4E+00 ± 4E-01	-0,13
Th-228	5,5E-1 ± 5E-01	9,9E-01 ± 3E-01	-0,74
Th-230			
K-40	7,1E+1 ± 5E+00	1,0E+02 ± 4E+00	-4,79
Be-7	1,9E+1 ± 1E+00	1,8E+00 ± 1E+00	9,58
I-131			
Cs-134			
Cs-137	< 1,2E+00	‡ 3,1E-02 ± 1E-01	
Co-58			
Co-60			
Cr-51			
Mn-54			
Zn-65			
Nb-95			
Ru-106			
Sb-125			
Sr-90	1,2E+00 ± 2E-01	3,7E+00 ± 2E-01	-7,50
H-3	1,4E+03 ± 9E+01	1,6E+03 ± 1E+02	-1,82

* Vse negotovosti so podane s faktorjem pokritja $k = 1$ (interval z 68-odstotno zanesljivostjo). S krepkim tiskom na sivi podlagi je označen ζ-preskus, ki je po absolutni vrednosti večji od 2.

(‡) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije.

V tabelah 5 in 6 so rezultati meritev emisijskih meritev zračnih izpustov, ki sta jih opravila ZVD in NEK. V okviru neodvisnega nadzora sta ZVD in NEK opravila meritve štirih brisov, vzorčenje je opravil NEK. Prvi bris je bil vzorčen 8. 5. 2023, drugi 24. 7. 2023 (glede na oznake v poročilu NEK je bil prvi vzorec bris Cs-Co, drugi pa ni imel nobene specifične oznake), zadnja dva pa 30. 10. 2023 (glede na oznake v poročilih NEK je bil vzorec 1025-23 bris iz cevovoda SI-53, vzorec 1026-23 pa zračni filter iz bazena Rx). Ker NEK pri rednih meritvah poroča o svojih rezultatih s 95-odstotno zanesljivostjo (faktor pokritja $k = 2$), so bile vse negotovosti v tabeli 6 preračunane na 68-odstotno zanesljivost (faktor pokritja $k = 1$). Pri brisih, vzorčenih maja in julija, sta oba laboratorija poročala o istem naboru radionuklidov s statistično primerljivimi rezultati. Največja vrednost ζ-preskusa 1,85 je bila pri Np-95 v julijskem vzorcu brisa. V oktobrskih vzorcih je ZVD poročal o večjem naboru radionuklidov: o Zn-65, Zr-95 in Ru-106 v vzorcu brisa iz cevovoda SI-53 ter o Co-57 in Ag-110m v vzorcu zračnega filtra iz bazena Rx. Večina teh rezultatov (razen za Ru-106) je za okoli velikostni red nižja od ostalih radionuklidov, ki sta jih določila oba laboratorija. Vsi rezultati, ki jih poročata oba laboratorija, so med seboj primerljivi z ζ-preskusi manjšimi od 1,36.

V tabeli 7 in 8 so prikazani rezultati meritev IJS in ZVD za vzorce trave in zemlje iz globin 0–5 cm, 5–10 cm in 10–15 cm. Vzorčenje je opravil IJS za oba laboratorija 26. 9. 2023 na lokaciji Gmajnice. Izvedbo vzorčenja je nadziral predstavnik URSJV. Na teh vzorcih so bili določeni sevalci gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama, poleg tega je bila opravljena radiokemijska analiza za določitev specifične aktivnosti Sr-90. Redne meritve je opravil IJS po svojih postopkih, meritve v okviru neodvisnega nadzora pa ZVD.

V uradnem poročilu za neodvisni nadzor je ZVD za vzorec trave poročal rezultate, preračunane na maso sveže snovi, IJS pa preračunane na maso suhe snovi. Ker ti rezultati niso primerljivi med seboj in ker se v okviru nadzora radioaktivnosti v okolici NEK poroča rezultate meritev suhe trave, je ZVD naknadno posredoval svoje rezultate, preračunane na suho snov. Slednje rezultate smo uporabili pri primerjavi.



V teh štirih vzorcih lahko med seboj primerjamo 33 rezultatov, od teh ima 9 rezultatov $|\zeta|$ -preskus > 2 . Pripomniti velja, da so vsi rezultati, razen za K-40 v vseh vzorcih in Be-7 v vzorcu trave, nizki in blizu mej detekcije, kar ima velik vpliv na kakovost primerjave. Ključna je razlika pri K-40 v vzorcu trave, kjer je IJS poročal za 45 % višje rezultate (ζ -preskus = $-5,62$). K tej razliki lahko prispeva vrsta trave, suhost vzorca ali priprava vzorca. Ker so v preostalih treh vzorcih zemlje vsi rezultati za K-40 med seboj primerljivi, ocenjujemo, da merska metoda ni vzrok za razhajanje. Velika razlika je bila tudi pri določitvi Cs-137 v vzorcu trave (ζ -preskus = $-5,99$), vzrok je predvsem nizka specifična aktivnost in posledično je rezultat blizu meje detekcije. Podoben zaključek velja tudi za ostale naravne radionuklide, kjer je ζ -preskus večji od 2. V splošnem so nabori radionuklidov v poročilih obeh izvajalcev podobni, rezultati pa primerljivi.

Dodatno je bila opravljena še primerjava rezultatov vsebnosti radionuklidov v vzorcu podtalnice iz vrtnice E1 v NEK. Vzorčenje je bilo opravljeno 26. 9. 2023, na isti dan kot vzorčenje zemlje. Tudi pri tem vzorčenju je bil prisoten predstavnik URSJV. Določiti je bilo treba vsebnost sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama ter vsebnost H-3 in Sr-90. Redne meritve je opravil IJS, Odsek F-2 (spektrometrija gama ter določitev H-3) in Odsek O-2 (določitev Sr-90), meritve v okviru neodvisnega nadzora pa ZVD (spektrometrija gama in določitev Sr-90) ter IJS, Odsek O-2 (določitev vsebnosti H-3). Rezultati so zbrani v tabeli 9.

Nabor poročanih rezultatov je pri obeh pooblaščenih inštitucijah podoben. Med seboj lahko primerjamo 7 rezultatov, ki so nad mejo kvantifikacije, od teh imajo le trije ζ -preskus manjši od 2. Velike razlike so pri K-40 (ζ -preskus = $-4,79$, IJS je poročal za 44 % višje vrednosti), Be-7 (ζ -preskus = $9,58$, ZVD je poročal za 10-krat višje vrednosti) ter Sr-90 (ζ -preskus = $-7,50$, IJS je poročal za 3-krat višje vrednosti). Pri tem velja poudariti, da so vsi ti rezultati, razen za K-40, blizu mej detekcije.

Primerjava rezultatov meritev različnih vzorcev iz okolja

Pooblaščeni laboratoriji redno in v primernem obsegu sodelujejo pri mednarodnih primerjalnih meritvah, kjer z naborom različnih vzorcev pokrivajo vse ključne matrike vzorcev iz programa nadzora radioaktivnosti. Ti rezultati so zbrani na priloženi zgoščenci v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško - Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645, marec 2024* v poglavju *Tabele rezultatov primerjalnih meritev*. Ob rezultatih so navedena tudi ovrednotenja in ocene uspešnosti, kot so jih podali izvajalci primerjalnih meritev. V skladu z zahtevami standarda ISO/IEC 17025:2017, po katerem so vsi izvajalci akreditirani za svoje dejavnosti, morajo akreditirani laboratoriji svoje rezultate primerjalnih meritev ovrednotiti ter v primeru razlik poiskati vzroke in uvesti ustrezne korektivne ukrepe in voditi zapise. Kakovost izvajanja primerjalnih meritev ocenjujejo akreditacijske službe kot pogoj za vzdrževanje obsega akreditacije.

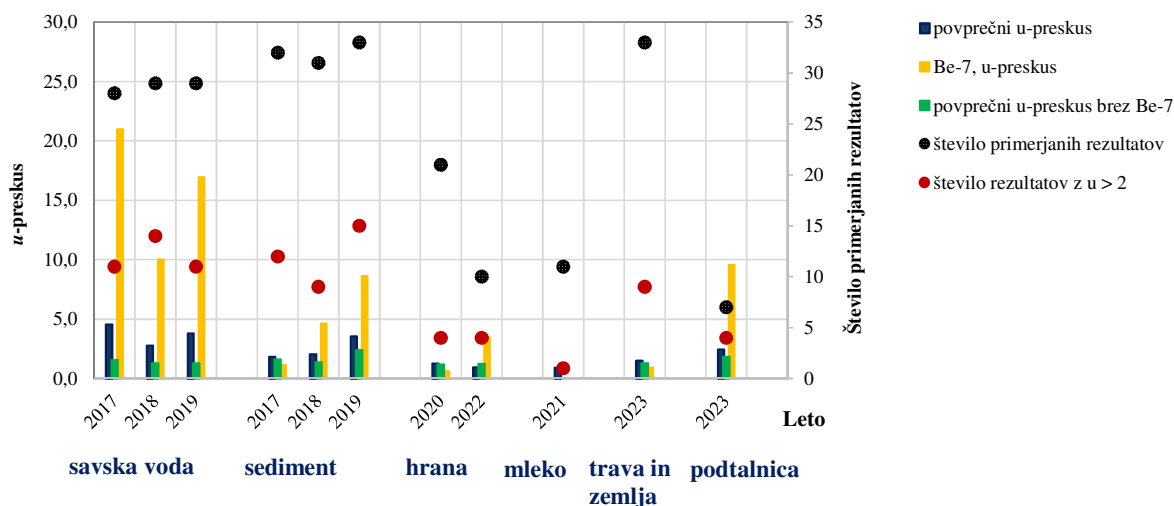
Med primerjalnimi meritvami in neodvisnim nadzorom je ključna razlika. Pri mednarodnih medlaboratorijskih primerjavah **laboratoriji dobijo v analizo pripravljene vzorce z dobro definiranimi referenčnimi vrednostmi, določenimi na neodvisen način.** Vzorčenja ni, v laboratoriju opravijo le zadnjo fazo priprave vzorcev – skladno s svojimi postopki pripravijo merjence v ustreznih geometrijah ter izmerijo vsebnosti radionuklidov. **Pri neodvisnem nadzoru pa laboratoriji opravijo tudi vzorčenje in celotno pripravo vzorcev, ki med drugim vključuje tudi sušenje in homogenizacijo. Neodvisni nadzor torej daje primerjavo celotnega postopka, ki vključuje vzorčenje, pripravo, meritve in izračun aktivnosti detektiranih radionuklidov;** vsaka faza vpliva na končni rezultat, prinese svoj prispevek k merilni negotovosti in zmanjša primerljivost rezultatov.

Primerjava celotnega postopka od vzorčenja do meritev vzorcev iz okolja je zelo kompleksna in zahteva zelo podrobno obravnavo, če želimo ovrednotiti kvaliteto rezultatov meritev. Okoljski vzorci so nehomogeni, poleg tega je tudi matrika vzorca slabo definirana. Po vzorčenju se vzorci obdelajo v laboratorijih in pripravijo za analizo. Ker so postopki vzorčenja in priprave vzorcev za analizo v pooblaščenih laboratorijih različni, lahko pričakujemo dodatno neujemanje med merskimi rezultati.

Zgornje trditve potrjuje tudi statistična analiza rezultatov imisijskih meritev savske vode in sedimenta z visokoločljivostno spektrometrijo gama v okviru neodvisnega nadzora v letih od 2017 do 2019 ter primerjava s statistično analizo hrane v letih 2020–2022 ter letošnjih meritev trave, zemlje in podtalnice. Rezultati te analize so prikazani na sliki 1. Za vsako leto je bil določen povprečen u -preskus ($|\zeta|$ -preskus v



absolutnem merilu) in glede na to, da je bila v preteklem obdobju večina razlik pri Be-7, še povprečen u -preskus posebej za Be-7 in za druge radionuklide brez Be-7. V vzorcih mleka v letu 2021 Be-7 ni detektiral noben laboratorij. Na levi osi so prikazane vrednosti u -preskusa, na desni pa število primerjanih rezultatov in število rezultatov z vrednostjo u -preskusa nad 2. Rezultati meritev H-3 v savski vodi in padavinah s tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo v tej analizi niso upoštevani. S slike lahko razberemo, da so največji odmiki pri savski vodi in podtalnici ter najmanjši pri vzorcih hrane in zemlje (sadje, poljščine, mleko, trava in zemlja). K visokim povprečnim vrednostim u -preskusa v savski vodi, podtalnici in tudi v sedimentih prispeva predvsem Be-7, kar je lahko posledica vzorčenja ali priprave vzorcev. Za razliko od vzorčenja in priprave savskih vod, podtalnice in sedimentov, je vzorčenje hrane in zemlje iz istega območja bolj določeno in enolično, kar se posledično kaže s skladnimi rezultati in manjšimi vrednostmi u -preskusov.



Slika 1: Statistična obdelava rezultatov meritev savske vode in sedimentov v Krškem in Brežicah za obdobje 2017–2019, hrane in mleka v letih 2020–2022 ter trave, zemlje in podtalnice v letu 2023

DISKUSIJA IN SKLEPI

Pri neodvisnem nadzoru emisijskih in imisijskih meritev je sedanjí izbor in število primerjanih vzorcev premajhno za zanesljivo statistično obdelavo rezultatov meritev pooblaščenih izvajalcev. V tem obsegu daje le zelo grobo oceno sprejemljivosti rezultatov meritev v poročilih.

V letu 2022 je URSJV spremenil obseg neodvisnega nadzora emisijskih meritev plinastih izpustov. Namesto primerjav meritev vsebnosti radionuklidov v aerosolnih filtrih, vzorčenih v dimniku pred RM-24, kjer je vsebnost izmerjenih umetnih radionuklidov premajhna, da bi lahko opravili kakršno koli primerjavo, so predpisali meritve vsebnosti radionuklidov v filtrih ali brisih, ki vsebujejo umetne radionuklide nad mejo detekcije. Te meritve so v letošnjem letu pokazale, da so pri višjih aktivnostih rezultati meritev na istih vzorcih primerljivi. Poudariti je treba, da teh vzorcev pred meritvijo ni treba dodatno pripraviti.

V vzorcih tekočinskih izpustov iz WMT so prisotni različni umetni radionuklidi v merljivih koncentracijah, kar bi omogočalo bolj kakovostno primerjavo med posameznimi pooblaščenimi izvajalci. Vendar se pri neodvisnem nadzoru opravlja primerjava med NEK, ki ima visoko postavljene meje detekcije in ZVD ali IJS, ki imata nižje detekcijske meje. Zaradi tega IJS in ZVD običajno poročata o mnogih radionuklidih nad detekcijsko mejo, pri čemer jih NEK ne detektira. **Zato tako kot v predhodnih letih ponovno predlagamo, da bi pri neodvisnem nadzoru vzorcev WMT sočasno obe neodvisni inštituciji – IJS in ZVD - opravljali visokoločljivostno spektrometrijo gama.** S tem bi pridobili dodatno primerjavo med IJS in ZVD pri vzorcih, ki imajo povišane vsebnosti radionuklidov. Ker nobena od obeh institucij ne



opravlja rednih meritev teh vzorcev, bi laboratorija pridobila dodatne dragocene izkušnje pri analizi spektrov s povišano vsebnostjo umetnih radionuklidov ter s tem izboljšala usposobljenost in pripravljenost na morebitne izredne dogodke. Letos smo pri neodvisnem nadzoru emisijskih meritev tekočih izpustov ponovno merili vsebnosti H-3, kar je bil edini radionuklid nad mejo detekcije. Primerjava med rezultati NEK in IJS, Odsek O-2, je pokazala zelo dobro ujemanje pri vseh 4 vzorcih.

Primerjava rezultatov meritev vsebnosti radionuklidov v vzorcih iz programa neodvisnega nadzora imisijskih meritev kaže, da ocena merilne negotovosti znatno prispeva k oceni primerljivosti rezultatov. Poleg tega se je pri analizi rezultatov pokazalo, da pri poročanju rezultatov za travo manjka ključen podatek – ali se rezultati nanašajo na suho snov ali na začetno maso. V splošnem so nabori radionuklidov v poročilih obeh izvajalcev za vzorce trave in zemlje podobni, rezultati pa primerljivi. Večja razhajanja so bila pri rezultatih meritev podtalnice, kjer so bila ponovno velika razhajanja pri rezultatih za Be-7, podobno kot v savski vodi in sedimentih v letih 2018 in 2019. Na podlagi teh rezultatov sklepamo, da pri teh vzorcih vzorčenje in priprava vzorcev ključno vplivata na poročane rezultate.

Na podlagi statistične primerjave vseh rezultatov v okviru neodvisnega nadzora v obdobju od 2010 do 2023 poudarjamo naslednje sklepe:

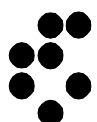
- tako kot prejšnja leta predlagamo, da pri neodvisnem nadzoru tekočinskih izpustov (WMT) vsako leto sodelujeta oba laboratorija (IJS in ZVD); tako bi pridobili dodatno primerjavo med IJS, ZVD in NEK pri vzorcih, ki imajo povišane vsebnosti radionuklidov; s tem bi oba neodvisna laboratorija pridobila dodatne izkušnje pri analizi spektrov s povišano vsebnostjo umetnih radionuklidov in izboljšala usposobljenost in pripravljenost na morebitne izredne dogodke;
- sprememba programa meritev pri neodvisnem nadzoru plinastih izpustov v letu 2022 je omogočila primerjavo na vzorcih, ki vsebujejo merljive vsebnosti radionuklidov, na podlagi katerih smo lahko potrdili, da oba pooblaščenata laboratorija NEK in ZVD poročata statistično primerljive rezultate meritev; predlagamo, da se v primerjavo vzorcev plinastih izpustov v bodoče vključi tudi IJS in da se redno vsako leto opravljajo primerjave na istih vzorcih med NEK, ZVD in IJS;
- spreminjanje izbora okoljskih vzorcev, ki ga je uvedel URSJV v letu 2020, omogoča kompleksnejšo analizo rezultatov in dodatne sklepe, zato predlagamo in podpiramo, da tudi v prihodnje URSJV nadaljuje s tem pristopom in vsako leto izbere za neodvisni nadzor drug nabor okoljskih vzorcev in meritev iz programa obratovalnega nadzora; na ta način lahko odkrijemo šibke točke v delovnem procesu ter bolje ocenimo, kje so potrebne izboljšave pri delu pooblaščenih izvajalcev.



**CELOVITA ANALIZA SEVALNIH UČINKOV
NADZOROVANIH IZPUSTOV V OKOLJE IZ NEK
NA PREBIVALSTVO IN OKOLJE**



Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija





CELOVITA ANALIZA SEVALNIH UČINKOV NADZOROVANIH IZPUSTOV V OKOLJE IZ NEK NA PREBIVALSTVO IN OKOLJE

Odgovorni za izdajo: doc. dr. Benjamin Zorko

Uredniki: doc. dr. Benjamin Zorko, mag. Denis Glavič – Cindro in dr. Helena Fajfar

Recenzija: prof. dr. Alojz Kodre, mag. Matjaž Koželj, mag. Borut Breznik

Lektoriral: prof. dr. Alojz Kodre

Monografija je lektorirana po mednarodnem standardu ISO 80000.

POGLAVJE

AVTORJI

Radioaktivnost v reki Savi

Matija Škrlep, mag. prof. fiz., ZVD
doc. dr. Benjamin Zorko, IJS

Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi

dr. Jasmina Kožar Logar, IJS

Radioaktivnost v usedih

dr. Toni Petrovič, IJS

Zrak

dr. Marko Giacomelli, ZVD

Zunanje sevanje

Klara Poiškruh, mag. med. fiz., IJS
Boštjan Črnič, mag. med. fiz, IJS

Radionuklidi v hrani

prof. dr. Katarina Vogel Mikuš, BF

Založil: Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, Ljubljana

Prva izdaja: april 2024

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

621.311.25 (497.4Krško)
539.16:502.175 (497.4)

CELOVITA analiza sevalnih učinkov nadzorovanih izpustov v okolje iz NEK na prebivalstvo in okolje / [uredniki Benjamin Zorko, Denis Glavič-Cindro in Helena Fajfar ; avtorji Matija Škrlep ... et al.]. - 1. izd. - Ljubljana : Institut "Jožef Stefan", 2024

ISBN 978-961-264-287-7
COBISS.SI-ID 189565955

Vse pravice pridržane. Noben del monografije ne sme biti reproduciran, shranjen ali prepisan v kateri koli obliki oziroma na kateri koli način, bodisi elektronsko, mehansko, s fotokopiranjem, snemanjem ali kako drugače, brez predhodnega privoljenja Nuklearne elektrarne Krško ©. Avtorska dela so intelektualna last Instituta "Jožef Stefan".

Naklada: 50 izvodov



VSEBINA

Predgovor urednika

1	Radioaktivnost v reki Savi	5 / 126
2	Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi	31 / 126
3	Radioaktivnost v usedih	49 / 126
4	Zrak	63 / 126
5	Zunanje sevanje	89 / 126
6	Radionuklidi v hrani	105 / 126
7	Reference	121 / 126





PREDGOVOR UREDNIKA

Monografija *Celovita analiza sevalnih učinkov nadzorovanih izpustov v okolje iz NEK na prebivalstvo in okolje* obravnava stanje v okolju v okolici jedrske elektrarne Krško (NEK) v letu 2023 v 33. gorivnem ciklusu delovanja jedrske elektrarne. V oktobru je bil izredni remont po okvari priključnega cevovoda do reaktorske posode. Monografija je samostojna priloga poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2023*, interna oznaka 15/2024. Monografijo sta neodvisno recenzirala ("peer review") prof. dr. Alojz Kodre in mag. Matjaž Koželj.

Recenzent prof. dr. Alojz Kodre, zaslužni profesor Univerze v Ljubljani, je diplomiral iz fizike leta 1966, magistriral leta 1971 in doktoriral leta 1974. Po diplomi se je zaposlil kot asistent na Oddelku za fiziko FNT in dopolnilno na IJS. Leta 1975 je bil habilitiran za docenta za fiziko, leta 1981 za rednega profesorja. Predaval je matematično fizikalne predmete (Matematična fizika I in II, Modelska analiza), kot raziskovalec se je ukvarjal z fiziko notranjih atomskih lupin. V domačem laboratoriju je razvijal absorpcijsko rentgensko spektroskopijo, leta 1989 pa so v skupini sodelavcev prvi v Sloveniji začeli z meritvami s sinhrotronsko svetlobo na sinhrotronu DESY v Hamburgu, pozneje tudi na sinhrotronih LURE v Orsayu in ESRF v Grenoblu ter Elettra v Bazovici pri Trstu. V letih 1977 in 1978 je kot »Fulbright research fellow« obiskal University of N. Carolina v Chapel Hillu, v letih 1989 in 1990 pa kot »Fulbright visiting professor« University of Oregon v Eugeneu. V času tega obiska je sodeloval v eksperimentih na sinhrotronih v Brookhavnu in Stanfordu. Njegova bibliografija obsega prek petsto enot, od tega prek dvesto osemdeset znanstvenih člankov. V soavtorstvu z I. Kuščerjem je objavil učbenik *Mathematik in Physik und Technik* (Springer-Verlag 1993) in v slovenščini *Matematika v fiziki in tehniki* (DMFA 1994).

Mag. Matjaž Koželj ima več kot dvajsetletne izkušnje na področju jedrske tehnologije in varstva pred sevanji. Pri vrednotenju učinkov NE Krško na okolje in prebivalstvo sodeluje že več kot deset let. Je pooblaščen izvedenec varstva pred sevanji za področje izpostavljenosti prebivalcev zaradi izvajanja sevalnih dejavnosti in za področje varstva pred sevanji v jedrskih objektih, industriji, raziskovalnih in izobraževalnih ustanovah. Je predavatelj v Izobraževalnem centru za jedrsko tehnologijo Instituta "Jožef Stefan", kjer sodeluje pri izvedbi predavanj na področju varstva pred sevanji, jedrske in reaktorske fizike ter instrumentacije in regulacije. Mag. Matjaž Koželj je avtor ali soavtor več kot osemdeset izvirnih znanstvenih in strokovnih člankov, znanstvenih prispevkov na konferencah, samostojnih znanstvenih in strokovnih sestavkov, poročil in elaboratov. V preteklosti je kot ekspert in predavatelj sodeloval pri več tečajih, ki jih je organizirala Mednarodna agencija za atomsko energijo. Skoraj petnajst let je že član, zadnja leta pa tudi vodja ene izmed strokovnih skupin za oceno doz v skupini za obvladovanje izrednega dogodka pri Upravi RS za jedrsko varnost. Je tudi član Izvršilnega odbora Društva Slovenije za varstvo pred sevanji.

V monografiji obravnavamo merske izide in modelske izračune za ugotavljanje radioaktivnosti v okolju, ki je posledica prvobitne radioaktivnosti, splošne onesnaženosti zaradi jedrskih poskusov in nesreč v jedrskih objektih ter nadzorovanih zračnih in tekočinskih izpustov iz jedrske elektrarne Krško. Nprekinjeno zbiranje in vrednotenje merskih podatkov (obdobna povprečja) omogoča prikazovanje časovnih teženj in s tem tudi podporo pri trajni umestitvi jedrskega objekta v življenjski prostor. Za to uporabljamo prikladne modele s kompleksnimi matematičnimi in numeričnimi algoritmi, ki ustrezajo fizikalnim procesom. Tako izračunamo predvidene koncentracije aktivnosti ali specifične aktivnosti izbranih radionuklidov v tistih medijih, prek katerih se radioaktivnost vnese v človekovo telo (zaužitje, inhalacija) ali pa človekovo telo obdaja (zunanje sevanje). Z upoštevanjem porabe ali časa zadrževanja v izbranem mediju lahko ocenimo letne efektivne doze ali okoljski dozni ekvivalent zračnih in tekočinskih izpustov iz NEK na referenčne osebe iz različnih starostnih skupin (odrasli, otroci in dojenčki), ki živijo v neposredni bližini jedrske elektrarne (500 m od osi reaktorja in dalje). Z leti smo v raziskavah našli ustrezne načine računanja in poročanja o majhnih vrednostih [60]. Predvidene koncentracije aktivnosti ali specifične aktivnosti radionuklidov nato primerjamo z izmerjenimi vrednostmi v vzorcih iz okolja na istih lokacijah v okolici NEK. Rezultati meritev v okolju v okolici NEK se še kritično primerjajo z rezultati meritev na izbrani referenčni ali kontrolni lokaciji (Ljubljana, Dobova) ter drugod po Sloveniji.



Monografija *Celovita analiza sevalnih učinkov nadzorovanih izpustov v okolje iz NEK na prebivalstvo in okolje* obsega sedem poglavij, v katerih kritično obravnavamo značilne prenosne poti razširjanja radionuklidov po vodi, zraku, zemlji, pri uživanju hrane in ob direktnem zunanjem obsevanju. Poglavja se vsebinsko dopolnjujejo in prepletajo. V prvem poglavju *Radioaktivnost v reki Savi* tako razlagamo učinek tekočinskih izpustov NEK na okolico in referenčno osebo iz različnih starostnih skupin, vse do vnosa radionuklidov v telo (efektivna doza zaradi notranjega obsevanja) in tudi zunanjega sevanja (efektivna doza zaradi zunanjega obsevanja). Za računanje ефективne doze zaradi učinkov tekočinskih izpustov iz NEK je bil vpeljan nov model, ki temelji na teoretični napovedi mešanja in redčenja z uporabo tridimenzionalnega hidrodinamičnega transportnega modela. Tekočinski izpusti lahko vplivajo na pitno vodo zaradi mogočega stika Save s podtalnico, kar se obravnava v drugem poglavju *Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi*. Ker so nekatera črpališča na krško-brežiškem področju plitva, zemljina pa prepustna, je mogoč vpliv na podtalnico tudi po zračni prenosni poti s padavinami. Used lahko vodi do zunanjega in notranjega obsevanja, saj se delci v zraku posedajo na tla in lahko preko listov značilno pridejo v rastlinje, ki ga prebivalci uživajo (*Radioaktivnost v usedih*). Če se takšen used zadrži v tleh, so prebivalci lahko izpostavljeni še zunanjemu sevanju. Transport in razširjanje plinov in aerosolov obravnava poglavje *Radioaktivnost v zraku*, kjer je glavno orodje za ocenjevanje učinkov napredni numerični model. Le-ta realno opisuje razširjanje radioaktivnih snovi od točke izpusta na razgibanih in zahtevnih terenih ter območjih, kjer je hitrost vetra majhna. V petem poglavju *Zunanje sevanje* obravnavamo izpostavitve referenčne osebe zunanjemu ionizirajočemu sevanju. Poglavje *Radionuklidi v hrani* opisuje in razlaga učinke na prebivalstvo zaradi zaužitja hrane, ki je pridelana na krško-brežiškem polju. Merski izidi se kritično primerjajo s podatki po Sloveniji. Obravnavo smo dopolnili s statistično analizo, kar je dopolnitev kritične presoje podatkov in s tem dodana vrednost k celotni monografiji. V zadnjem poglavju so zbrane vse reference, uporabljene v monografiji *Celovita analiza sevalnih učinkov nadzorovanih izpustov v okolje iz NEK na prebivalstvo in okolje*.

Avtorji poglavij v monografiji so znanstveniki in/ali strokovnjaki s področja jedrske fizike, kemije in biologije ter tudi strokovnjaki s področij jedrske varnosti in zaščite pred ionizirajočimi sevanji. Svoje prispevke so pripravili na izviren in znanstveno-strokovno način, s katerim so kritično komentirali merske izide in druge spremljajoče pomembne podatke. Oceno učinkov izpustov iz jedrske elektrarne na okoliško prebivalstvo so ugotavljali z računanjem letne effektivne doze, pri čemer so upoštevali tri starostne skupine. Če povzamemo izsledke poglavij, lahko sklenemo, da prebivalci, ki živijo na krško-brežiškem polju, v vaseh v celotnem okrožju v okolici NEK in na robu izključitvenega območja, niso nič bolj izpostavljeni ionizirajočemu sevanju kot prebivalci drugod po Sloveniji. Ocenjujemo, da je prispevek NEK zaradi zračnih in tekočinskih izpustov zanemarljiv tako z biološkega kot tudi statističnega vidika. Sevalni učinki izpustov iz NEK se niso povečali po naravni ujmi v avgustu in okvari na priključnem cevovodu na reaktorsko posodo v oktobru.

Obravnava emisijskih in imisijskih rezultatov meritev in izračun letnih effektivnih doz izpostavljenosti ionizirajočemu sevanju ima podlago v slovenski zakonodaji jedrske in sevalne varnosti, ki zahteva takšno ovrednotenje (pravilnik *JV 10* [8]), ter v znanstvenem in strokovnem izražanju, saj le tako lahko v realnih razmerah preverimo različne znanstvene metode in načine ovrednotenja merskih podatkov. Avtorji obravnavajo problematiko izpustov iz jedrske elektrarne ter morebitne učinke na ljudi v bližnji in širši okolici NEK ter skladno z zakonodajo podajajo neodvisna in znanstveno-strokovno utemeljena mnenja.

Skupina za meritve ionizirajočega sevanja Instituta "Jožef Stefan" (IJS) je močno vpeta v metrološko stroko, saj imamo edini v regionalnem področju v radiju nekaj 100 km potrjene in usklajene predloge najboljših merskih zmoglosti (CMC) na ravni regionalnih metroloških organizacij in Mednarodnega biroja za mere in uteži (BIPM) za aktivnosti (Bq/kg). S tem lahko dokazujemo visoko znanstveno-raziskovalno ter strokovno usposobljenost tako za izvedbo meritev kot tudi za njihovo objavo in ovrednotenje.

B. Zorko

doc. dr. Benjamin Zorko, odgovorni urednik



1 RADIOAKTIVNOST V REKI SAVI

POVZETEK

V poglavju so predstavljeni in ovrednoteni rezultati meritev radioaktivnosti v reki Savi (rečna voda, sedimenti, ribe) in ocena učinkov na prebivalstvo tako iz meritev tekočinskih izpustov iz NEK v reko Savo in z uporabo modelov, kot tudi iz meritev koncentracij aktivnosti radionuklidov in okoljskih vzorcev. V letu 2023 je bila skupna aktivnost tekočinskih izpustov v okolje primerljiva s prejšnjimi leti. Največ je prispeval tritij, edini umetni radionuklid, ki ga redno merimo v reki Savi in je zagotovo vsaj delno posledica tekočinskih izpustov NEK. Pri vseh drugih umetnih radionuklidih je učinek NEK v okolju nemerljiv oziroma nedoločljiv. Vsebnosti cezija in stroncija v okoljskih vzorcih nizvodno od NEK zelo verjetno nista posledica učinkov NEK na okolje, ampak posledica neenakomerne globalne kontaminacije. Prisotnost joda v reki Savi je posledica uporabe tega radionuklida v terapevtski in diagnostični rabi v bolnišnicah.

Izpostavitev prebivalstva smo ocenili iz neposrednih meritev izpustov (emisij) in z uporabo modela, ki je bil izdelan v letu 2003 in revidiran v letu 2009. Za modelno oceno obremenitev, ki bi jih lahko prinesle zgolj po Savi potekajoče prenosne poti, je bila kot referenca izbrana skupina brežiških športnih ribičev in članov njihovih družin, ki lovijo do 350 m nizvodno od jezua NEK. Letna efektivna doza zaradi zadrževanja na obrežju zaradi zunanjega sevanja in zaužitja rib za referenčno skupino prebivalstva po savski prenosni poti je nižja ali enaka 0,0061 μSv na leto.

Zaradi gradnje HE Brežice 7,2 km nizvodno od NEK in nastanka pretočnega akumulacijskega jezera je prišlo do sprememb pri načinih in poteh izpostavitve prebivalstva sevanju. Vpeljan je bil nov model, ki temelji na teoretični napovedi mešanja in redčenja z uporabo tridimenzionalnega hidrodinamičnega transportnega modela PCFLOW3. V okviru projektne naloge je bila izdelana tudi spletna platforma DOSENEK, po kateri se vnaša merske in druge podatke in se na podlagi računskih postopkov izračuna efektivne doze za tri različne starostne skupine ljudi in dve vrsti vodnih organizmov v pretočni akumulaciji HE Brežice. Pod jezom HE Brežice se efektivna doza za referenčno osebo oceni iz rezultatov analiz okoljskih vzorcev pod jezom in ocenjenih efektivnih doz nad jezom. Letna efektivna doza po petih obravnavanih prenosnih poteh za odraslo referenčno osebo v pretočni akumulaciji HE Brežice (obravnavane lokacije) po savski prenosni poti ocenjena po novem modelu je nižja ali enaka 0,0029 μSv na leto. Ocenjeni vrednosti po veljavnem modelu iz leta 2009 in novim modelom sta primerljivi po vrednosti. Novi model upošteva dodatne poti izpostavitve, nove porabe in čase zadrževanj na bregu in jezeru ter za računanje parametrov (koncentracija aktivnosti radionuklidov v pretočni akumulaciji) uporablja tridimenzionalni transportni model.

UVOD

Nadzorni program vzorčenj in meritev za ugotavljanje radioaktivnosti v reki Savi obsega analize vzorcev iz okolja (imisije) in meritve tekočinskih izpustov na samem viru v NEK (emisije). Meritve v okolju omogočajo splošno oceno stanja na območju okoli NEK, oceno morebitnih učinkov nizvodno od elektrarne in tudi učinkov zunanjih dogodkov, kot je bila černobilska nesreča. Program obsega vzorčenje in meritve vode, suspendiranih snovi v vodi, sedimentov in vodne biote. Lokacije vzorčenja so postavljene nizvodno in vzvodno od NEK, tako da je mogoče ločiti med drugimi zunanjimi vplivi in dejanskimi učinki elektrarne.

NEK pri normalnem obratovanju občasno kontrolirano izpušča v okolje tekočine iz izpustnih rezervoarjev. Tekočine z nizkimi aktivnostmi radionuklidov se izpuščajo v reko Savo skozi kanal bistvene oskrbne vode (ESW – Essential Service Water), ki je nad jezom jedrske elektrarne. Skozi kanal se tako izpuščajo radioaktivne tekočine iz odpadnih merilnih rezervoarjev (WMT) in sistema za kaluženje uparjalnikov (SGBD). Izpuščena radioaktivnost je zaradi redčenja s savsko vodo na lokacijah vzorčenja, razen za tritij, skoraj vedno pod detekcijsko mejo meritev v okolju.

V reki Savi so tudi naravni radionuklidi uranove in torijeve razpadne verige ter radioaktivni kalij (K-40).



V vzorcih je vedno berilij (Be-7), ki je kozmogene narave, ter tritij (H-3) in radioaktivni ogljik (C-14), ki sta tako kozmogene kot antropogene narave. Poleg naravnih in kozmogonih radionuklidov sta zaradi globalne kontaminacije povsod v okolju tudi umetna radionuklida: stroncij (Sr-90) in cezij (Cs-137). Zaradi uporabe v medicini je v reki Savi še jod (I-131).

Učinke na prebivalstvo ocenjujemo iz neposrednih meritev izpustov (emisij) in z uporabo modela, ki je natančneje opisan v poročilu *Izpostavitve referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo (IJS-DP-10114)* [28]. Model, ki temelji na enodimenzionalni projekciji rešitve parcialne diferencialne enačbe za opis transporta in razširitve oblaka izpuščenih tekočin, upošteva najpomembnejše prenosne poti in načine izpostavitve referenčne skupine iz prebivalstva (referenčne osebe). Ocena učinka na okolje ne vključuje ovrednotenja prejetih doz zaradi naravnih radionuklidov, saj ti niso del izpustov NEK.

Za primerjavo smo učinke na prebivalstvo ocenili tudi z uporabo modela, ki je natančneje opisan v poročilu *Program za računanje učinkovitih doz zaradi tekočinskih izpustov iz NEK, verzija 3.0* [34]. Model PCFLOW3D ([32], [33]), ki temelji na tridimenzionalni simulaciji transporta in razširitve oblaka izpuščenih tekočin po reki Savi, upošteva najpomembnejše prenosne poti in načine izpostavitve referenčne skupine iz prebivalstva (referenčne osebe). Razvit je bil v skladu s tehnično specifikacijo *Dose Calculation and dilution modelling of run-of-river Brežice hydro plant accumulation* št. TO RZ-5/2020 [30]. Izdelana je bila programska oprema DOSENEK, ki omogoča izračun prejetih učinkovitih doz na različne referenčne osebe in organizme za 7 lokacij na območju pretočne akumulacije HE Brežice. Potreba po novi metodologiji se je pokazala po izgradnji HE Brežice, ko so na tem območju Save nastopile nove hidravlične razmere, ki jih ne poznamo dobro. Tudi pri novem modelu ocena učinka na okolje ne vključuje ovrednotenja prejetih učinkovitih doz zaradi naravnih radionuklidov, saj ti niso del izpustov NEK.



Slika 1.1: Izhod bistvene oskrbne vode (ESW), kjer se izpuščajo radioaktivne tekočine iz odpadnih merilnih rezervoarjev (WMT) in sistema za kaluženje uparjalnikov (SGBD). Fotografija na desni je posneta z jezua NEK.

V okviru projektne naloge je bila predlagana tudi eksperimentalna študija sledenja vsebnosti tritija v reki Savi nizvodno od jezua NEK, ki se bo uporabila za primerjavo med teoretičnimi napovedmi koncentracij aktivnosti tritija v reki Savi in izmerjenimi vrednostmi. Hidrodinamske in hidravlične razmere so bile razdelane v ločeni študiji s simulacijo širjenja toplotnega onesaženja nizvodno od jezua NEK [35], hidravlične lastnosti reke Save pa so bile dodatno podkrepljene z batigrafskim slikanjem globine [36].

Neodvisno od radiološkega nadzora NEK se izvaja tudi nadzor drugih rek po Sloveniji v okviru programa nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji [20]. Na Savi v Ljubljani, Krki, Savi pri Brežicah, Dravi, Muri in Kolpi se polletno jemljejo vzorci vode. Rezultati teh meritev se uporabljajo za splošno oceno stanja v Sloveniji, obenem pa jih uporabljamo kot referenčne vrednosti za oceno učinka NEK.

OKOLJSKI VZORCI

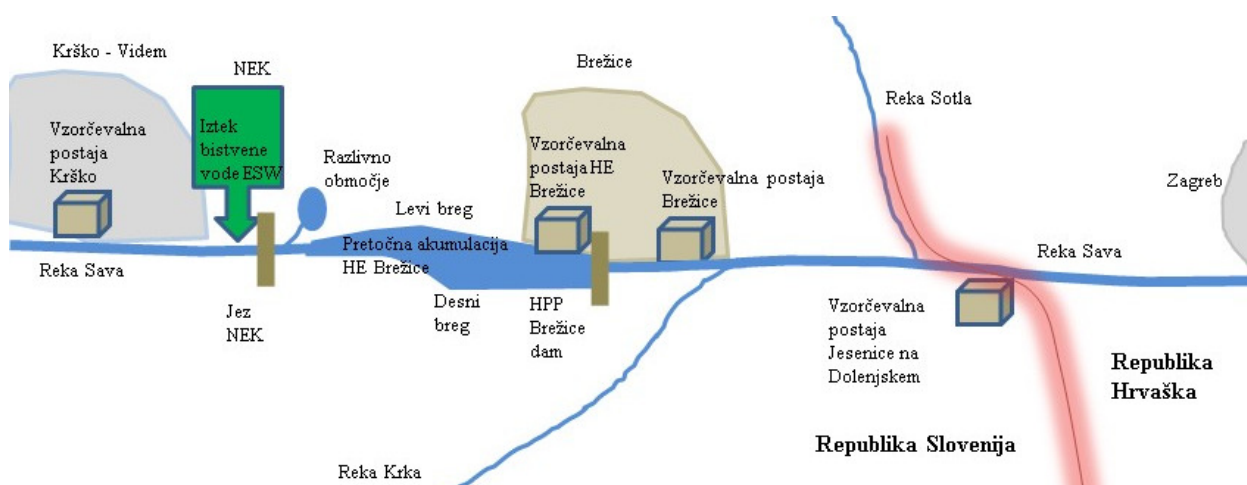
Značilnosti vzorčenja

Neprekinjeno vzorčenje reke Save je potekalo v rečni matici na štirih lokacijah (slika 1.2), in sicer v Krškem pred papirnico (3,2 km vzvodno od NEK), pri HE Brežice (nad jezom, 7,2 km nizvodno od NEK), v Brežicah (8,2 km nizvodno od NEK in 400 m nizvodno od starega mostu) in v Jesenicah na Dolenjskem (17,5 km nizvodno od NEK). Vzorčevalnik za neprekinjeno vzorčenje na referenčnem odvzemnem mestu Krško (v črpalni postaji za tehnološko vodo papirnice Vipap) deluje tako, da se zbirajo in merijo vzorci četrtletno, razen za tritij, ki se vzorčuje mesečno. Po izgradnji jeza HE Brežice je bila v letu 2017 zgrajena nova avtomatska vzorčevalna postaja HE Brežice, ki je na levem bregu Save 100 m nad jezom (sliki 1.2 in 1.3). Košara za zajem vode je na sredini jezusa HE Brežice v najnižjem delu v rečni matici (na globini 10 m). Tudi vzorčevalna postaja v Brežicah je na levem bregu, rečna voda se neprekinjeno zajema iz rečne matice. Na vzorčevalnih postajah HE Brežice in Brežice delujeta enaka vzorčevalnika z avtomatskim dnevnim zajemom vode. Voda se črpa v prelivno zbirno posodo. Iz prelivne posode manjša črpalka neprekinjeno črpa vodo in jo naliva v eno izmed štirih zbirnih posod. Voda se pretaka prek filtrov, tako da se ločeno zbira filtrski ostanek. V vsaki posodi se zbira dnevni vzorec, ki omogoča tudi odvzem enodnevnega vzorca v primeru izrednega dogodka. Na dan se nabere nekaj litrov vode. Vzorčevalec nato na tri dni iz vsake zbirne posode natoči 1,6 litra vode v vzorčevalno posodo (mesečni vzorec 50 litrov). Na podoben način poteka odvzem vzorcev v Jesenicah na Dolenjskem, kjer se enako zbirajo mesečni vzorci. Postaja je tam na desnem bregu. Košara za zajem rečne vode blizu rečne matice je bližje desnemu bregu.

Vzorčenja na postajah je opravljal NEK, meritve vzorcev pa so opravljal pooblaščen organizacije ZVD, IRB in IJS. Neprekinjena vzorčenja sestavljenih dnevnih vzorcev savske vode so namenjena predvsem za ugotavljanje povprečne koncentracije aktivnosti dolgoživih radionuklidov. Pri tem se ločeno merita voda in filtrski ostanek, ki se kot groba suspendirana snov predhodno odstrani iz vode s filtriranjem.

Neprekinjeno vzorčenje ne omogoča ovrednotenja kratkoživih radionuklidov. Zato se neodvisno izvaja tudi kvartalno ali mesečno vzorčenje posamičnih vzorcev nefiltrirane vode (50-litrski vzorci). Iz rezultatov teh meritev lahko ugotovljamo koncentracije aktivnosti kratkoživega joda (I-131).

Ločen odvzem posamičnih vzorcev vode je tako potekal na osmih lokacijah in sicer v Krškem, v razlivnem območju ("nadomestni habitat" 1,7 km nizvodno od NEK), na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice (4,5 km in 5,5 km od NEK), neposredno nad jezom HE Brežice (ob avtomatski postaji), v Brežicah pod starim mostom, v Jesenicah na Dolenjskem in v kraju Podsused pri Zagrebu (okrog 30 km nizvodno od NEK). Lokacija na razlivnem območju je namenjena spremljanju vode za zapornim jezom HE Brežice, ki je na levem bregu in omogoča razlivanje reke pri zelo visokih vodostajih. Vzorčenje posamičnih vzorcev vode sta opravila ZVD in IRB.



Slika 1.2: Shematski prikaz vseh vzorčevalnih postaj za neprekinjeno vzorčenje ob reki Savi po izgradnji akumulacijskega jezera HE Brežice



Slika 1.3: Avtomatska vzorčevalna postaja HE Brežice (7,2 km nizvodno od NEK), kjer poteka neprekinjen zajem vzorcev vode

Za ovrednotenje učinkov po savski prenosni poti se kvartalno in mesečno spremlja tudi radioaktivnost v sedimentih. Pri teh učinkih je pomemben dolgoletni časovni potek, povezan z globalno kontaminacijo. To je tudi informacija o ničelnem stanju v primeru, da bi prišlo do resnejših izpustov iz NEK. Vzorčenje sedimentov je potekalo na 9 lokacijah in sicer vzvodno od NEK pod mostom (na levem bregu), pod jezom v NEK (desni breg), pri Pesju (na levem bregu), na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice, neposredno nad jezom HE Brežice (ob avtomatski postaji), pri Brežicah (na levem bregu), pri Jesenicah na Dolenjskem (na desnem bregu) in na Hrvaškem v kraju Podsused pri Zagrebu. Vzorčenje sedimentov sta opravila ZVD in IRB. Opažamo, da se tri lokacije vzorčenja podvajajo in da je glede na obliko brežine akumulacijskega jezera HE Brežice težko pridobiti reprezentativni vzorec sedimenta na bregovih akumulacije.

Poleg spremljanja radioaktivnosti površinskih vod in sedimentov je pomemben indikator kontaminacije v Savi tudi vodna biota (ribe). Ulov rib je potekal na šestih lokacijah v Krškem, na akumulacijskem jezeru HE Brežice, v Brežicah, Jesenicah na Dolenjskem ter v Republiki Hrvaški v krajih Podsused in Otok. Četrtno vzorčenje rib v Sloveniji je opravil ZVD, na Hrvaškem pa IRB.

Značilnosti meritev okoljskih vzorcev

Pri vzorcih vode, sedimentov in rib ločeno potekajo meritve sevalcev gama in čistih sevalcev beta (H-3, C-14 in Sr-90). Vsebnost sevalcev gama v vzorcih reke Save se je določala z visokoločljivostno spektrometrijo gama po postopku izvajalca meritev, ki vključuje pripravo vzorca s sušenjem (izparevanje v sistemu s prisilno ventilacijo) in homogenizacijo. S tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo (LSC) je bila merjena koncentracija aktivnosti tritija (H-3) v destilatu savske vode. Z metodo LSC je bila merjena tudi vsebnost C-14. Aktivnost Sr-90 se je določala z radiokemično separacijo in štetjem na proporcionalnem števcu po postopku izvajalca meritve. Merska metoda za določanje stroncija ne omogoča ločenega merjenja radionuklidov Sr-90 in Sr-89, zato izmerek pomeni skupno aktivnost Sr-90/Sr-89. Ker pa je bila koncentracija aktivnosti kratkoživega Sr-89 v tekočinskih izpustih NEK pod mejo detekcije, se koncentracija aktivnosti Sr-90/Sr-89 dejansko nanaša le na Sr-90. Poleg tega je zaradi kratke razpolovne dobe Sr-89, ki bi bil posledica globalne kontaminacije, že v celoti razpadel.

Vzorčenje in meritve na savski prenosni poti razlikujemo glede na vrsto vzorcev:

- vzorčenje vode skupaj z grobo suspendirano snovjo (količina vzorca vode je 50 litrov) in ločene meritve sušine vzorcev vode in filtrskega ostanka vode, ki se kot groba suspendirana snov predhodno odstrani iz vode s filtriranjem;
- vzorčenje talnih sedimentov, ki v glavnem vsebujejo fini pesek (količina vzorca od 100 g do 500 g); vzorčenje gibljivih sedimentov, ki vsebujejo več organske snovi, se od leta 2005 ne izvaja več;
- vzorčenje in meritve rib vrst klen, podust, krap, som, mrena, štopser, babuška, plotica in bolen z maso od 90 g do 672 g; pred pripravo vzorcev se odstranijo repi in glave rib.

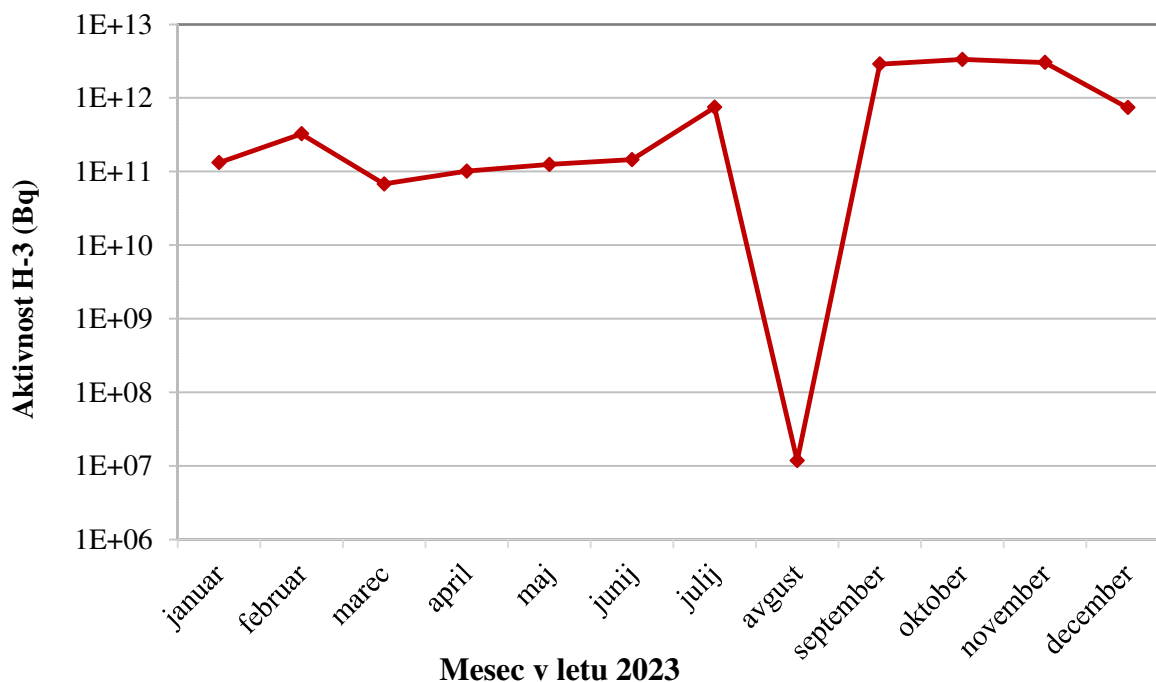


REZULTATI MERITEV IN TIPIČNI ČASOVNI POTEKI

Seznam meritev, pogostost posameznih meritev, merski rezultati in izvajalci meritev so navedeni v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645, marec 2024*, ki so na priloženi zgoščenki v poročilu. Tabele z merskimi podatki o vodah in sedimentih so: T-1 do T-4 (ZVD, H-3 – IJS), T-5, T-6 (IRB); T-7, T-9, T-10, T-12, T-13, T-14 (ZVD, H-3 – IJS); T-11, T-15/p, T-16/p1, T-16/p2, T-16/p3, T-17/p, T-18 (IRB), T-HE 1 do T-HE 9 (ZVD, H-3 – IJS). Tabele z merskimi podatki o ribah so: T-19, T-21, T-22 (ZVD); T-22/p1, T-24, T-25 (IRB), T-HE 10, T-HE 11 (ZVD).

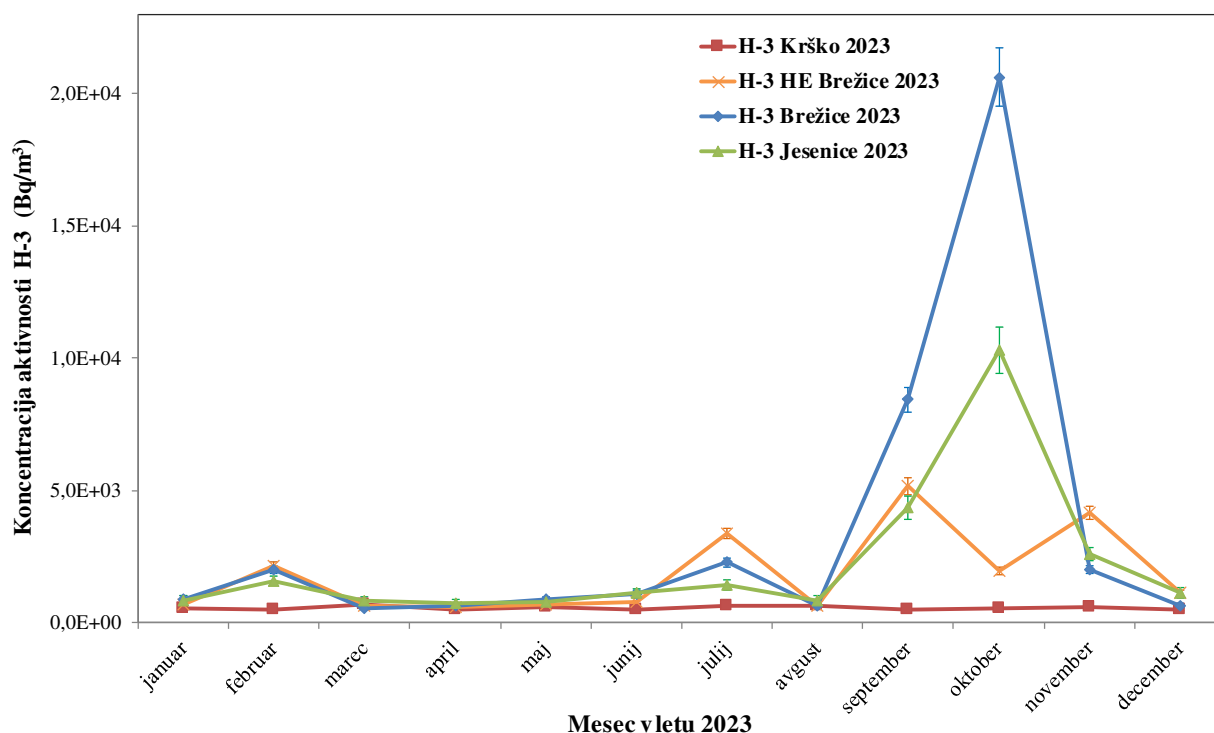
Tritij (H-3)

V vseh jedrskih elektrarnah je prisoten radioaktivni izotop vodika tritij (H-3) v tekočinskih in atmosferskih izpustih. Kot kozmogeni radionuklid nastaja tudi v zgornji plasti atmosfere pri jedrskih reakcijah visokoenergijskega kozmičnega sevanja z dušikom. Tritij se veže v molekulo vode (HTO) in z dežjem pride do zemeljske površine. Večina tritija je razredčena v oceanih. Poskusne jedrske eksplozije v petdesetih in šestdesetih letih prejšnjega stoletja so naravni inventar tritija povečale za dva velikostna reda. Tako je njegova koncentracija aktivnosti v deževnici na severni polobli narasla z $0,6 \text{ kBq/m}^3$ na 150 kBq/m^3 v letu 1963 [25]. Do danes se je zaradi radioaktivnega razpada in prehoda v oceanske vode koncentracija aktivnosti H-3 v deževnici znižala na prvotnih $0,6 \text{ kBq/m}^3$. Tritij je edini radionuklid, ki ga je mogoče sistematično spremljati v okolju kot nedvomno posledico izpustov NEK. Zato je uporaben kot sledilec in z njegovo razredčitvijo ocenimo tudi koncentracije drugih radionuklidov, ki jih v okolju navadno ne zaznamo [28].



Slika 1.4: Mesečne aktivnosti tekočinskih izpustov H-3 iz NEK v letu 2023. Skala je logaritemska.

Tritij je redno prisoten v tekočinskih efluentih NEK. Po podatkih NEK so bili največji mesečni tekočinski izpusti H-3 opravljani v oktobru (3,35 TBq, slika 1.4). Skupni letni izpust v letu 2023, 11,7 TBq, je bil opazno nižji od skupnega izpusta v letu 2022 (24,3 TBq) in primerljiv s povprečjem letnih aktivnosti H-3 v tekočinskih izpustih od 1999 do 2022 (12,5 TBq). Na sliki 1.5 je prikazana primerjava koncentracij aktivnosti tritija v savski vodi na lokacijah Krško, nad jezom HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem v letu 2023.



Slika 1.5: Primerjava koncentracij aktivnosti tritija v savski vodi na lokacijah Krško, HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem. Lokacija Krško je v toku Save nad elektrarno in je zato referenčna. Na tej lokaciji je bilo v letu 2023 povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 0,56 kBq/m³.

Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 nad jezom HE Brežice (1,8 kBq/m³) je višje od koncentracij aktivnosti na referenčnem odvzemnem mestu Krško (0,6 kBq/m³). V Brežicah (za jezom HE Brežice) je povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti 3,4 kBq/m³ nekoliko nižje od dolgoletnega povprečja 4,0 kBq/m³ za zadnjih 19 let. Izmerjeno povprečje koncentracij aktivnosti v Jesenicah na Dolenjskem (letno povprečje 2,2 kBq/m³) je zaradi vmesnega sotočja z reko Krko pričakovano nižje kot v Brežicah.

Izmed lokacij, kjer se voda vzorčuje neprekinjeno (filtriran vzorec), je bila nad jezom HE Brežice najvišja vrednost izmerjena v mesecu septembru (5,2 kBq/m³ ± 0,3 kBq/m³), v Brežicah v mesecu oktobru (20,6 kBq/m³ ± 1,1 kBq/m³) in v Jesenicah na Dolenjskem v mesecu oktobru (10,3 kBq/m³ ± 0,9 kBq/m³). V Krškem je bila najvišja vrednost tritija izmerjena v marcu (0,7 kBq/m³ ± 0,1 kBq/m³).

Tabela 1.1: Vrednosti korelacijskega koeficienta med koncentracijami aktivnostmi H-3 in aktivnostjo tekočinskih izpustov H-3 iz NEK

Vrednost korelacijskega koeficienta	Primerjava med izpusti in vzorčevalni lokacijami
-0,16	levi breg pretočne akumulacije HE Brežice
-0,11	desni breg pretočne akumulacije HE Brežice
0,76	nad jezom HE Brežice
0,75	Brežice
0,81	Jesenice na Dolenjskem



V tabeli 1.1 prikazujemo moč povezanosti mesečnih izmerjenih koncentracij aktivnosti na vzorčevalnih mestih nizvodno od jezua NEK in mesečnimi aktivnostmi H-3 v tekočinskih izpustih iz NEK. Merilo za korelacijo (povezanost med spremenljivkama) je vzorčni korelacijski (Pearsonov) koeficient [53], ki je predstavljen v tabeli 1.2. Iz tabele 1.1 lahko ugotovimo, da je povezanost med izpuščenimi aktivnostmi H-3 ter izmerjenimi aktivnostmi na vzorčevalnih postajah nad jezom HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem močna. Nasprotno je povezanost med izpuščenimi aktivnostmi H-3 ter izmerjenimi aktivnostmi na vzorčevalnih postajah na levem in desnem bregu pretočne akumulacije neznatno negativna.

Tabela 1.2: Merila moči povezanosti spremenljivk⁶ v odvisnosti od absolutne vrednosti korelacijskega koeficienta

Vrednost korelacijskega koeficienta	Moč povezanosti
0,00	ni povezanosti
0,01–0,19	neznatna povezanost
0,20–0,39	nizka/šibka povezanost
0,40–0,69	srednja/zmerna povezanost
0,70–0,89	visoka/močna povezanost
0,90–0,99	zelo visoka/zelo močna povezanost
1,00	popolna (funkcijska) povezanost

Tabela 1.3: Vrednosti korelacijskega koeficienta za primerjavo med koncentracijami aktivnostmi H-3 na vzorčevalnih lokacijah nizvodno od jezua NEK

Vrednost korelacijskega koeficienta	Primerjava med vzorčevalni lokacijami
0,87	levi breg–desni breg pretočne akumulacije HE Brežice
–0,27	levi breg–nad jezom HE Brežice
–0,01	levi breg–Brežice
–0,01	levi breg–Jesenice na Dolenjskem
–0,20	desni breg–nad jezom HE Brežice
0,02	desni breg–Brežice
0,02	desni breg–Jesenice na Dolenjskem
0,33	nad jezom HE Brežice–Brežice
0,37	nad jezom HE Brežice–Jesenice na Dolenjskem
0,99	Brežice–Jesenice na Dolenjskem

⁶ Povzeto po https://sl.wikipedia.org/wiki/Pearsonov_koeficient_korelacije

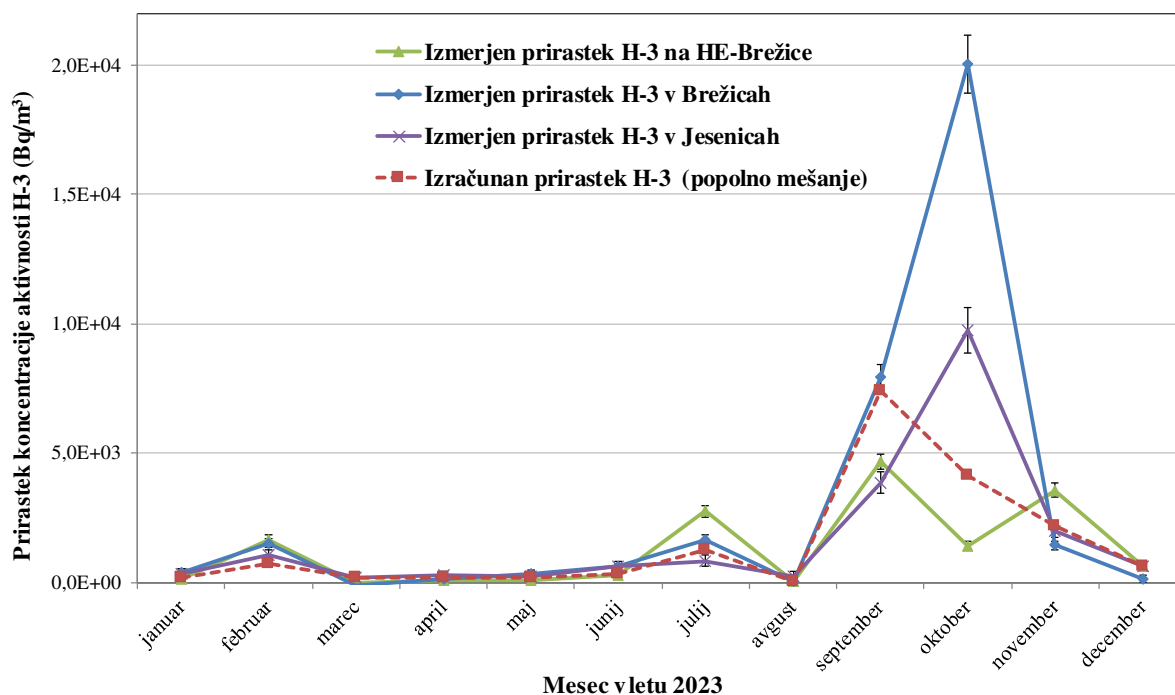


V tabeli 1.3 prikazujemo moč povezanosti izmerjenih mesečnih koncentracij aktivnosti na vzorčevalnih mestih nizvodno od jezua NEK. Ugotavljamo, da so povezanosti močne ali zelo močne med vzorčevalnimi postajami levi breg – desni breg ter Brežice – Jesenice na Dolenjskem. Zmerna ali šibka povezanost je med postajami nad jezom HE Brežice – Brežice ter nad jezom HE Brežice – Jesenice na Dolenjskem. Ostale kombinacije vzorčevalnih postaj so neznatno ali negativno povezane.

Pri tem je pomembno, da se na lokacijah največje razširitve v pretočni akumulaciji reka Sava vzorči enkratno mesečno. V primerjavi z vzorčevalnimi mesti, kjer se vzorči neprekinjeno (nad jezom HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem), lahko na levem in desnem bregu največje razširitve pretočne akumulacije HE Brežice predpostavimo možnost vpliva časovnega poteka dnevnih izpustov na izmerjene koncentracije aktivnosti H-3 v reki Savi. Ugotavljamo, da so korelacijski koeficienti med lokacijami z enakim vzorčenjem (kontinuirano – kontinuirano ali enkratno – enkratno) v splošnem višji kot korelacijski koeficienti med lokacijami z različnim vzorčenjem (kontinuirano – enkratno).

Najvišja koncentracija aktivnosti H-3 na levem bregu je bila v letu 2023 izmerjena junija ($2,2 \text{ kBq/m}^3 \pm 0,3 \text{ kBq/m}^3$). Tudi na desnem bregu pretočne akumulacije je bila najvišja koncentracija tritija zaznana v juniju ($18,3 \text{ kBq/m}^3 \pm 1,0 \text{ kBq/m}^3$). Tako visokih izmerjenih koncentracij ne moremo pojasniti s sovpadanjem vzorčenja in izpustov iz NEK, saj v drugi polovici maja (obdobje dveh tednov pred junijskim vzorčenjem vode) ni bilo večjih izpustov H-3. Koncentracija aktivnosti H-3 v razlivnem področju ("nadomestni habitat" 1,7 km nizvodno od NEK) je bila najvišja v četrtem četrtletju ($5,0 \text{ kBq/m}^3 \pm 0,2 \text{ kBq/m}^3$). Površinska voda iz razlivnega območja ni neposredno povezana s tekočo vodo iz Save. Sklepamo, da so povišane koncentracije aktivnosti najverjetneje posledica preteklih izpustov.

V drugih rekah v Sloveniji je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 kot v preteklih letih, večinoma pod 1 kBq/m^3 [19]. Iz časovnega poteka na sliki 11 v [19] lahko opazimo zmanjševanje povprečja koncentracije aktivnosti H-3 v rekah. Pojavljajo se občasne anomalije, kot je bilo na primer v letih 2013, 2020 in 2022 v reki Savi pri Brežicah, kar je bila posledica tekočinskih izpustov iz NEK. Leto 2022 v tem pogledu močno odstopa od preostalih let, saj so bile povprečne izmerjene vrednosti H-3 precej višje [1]. V letu 2023 so se izmerjene koncentracije aktivnosti H-3 vrnile na pričakovane vrednosti.

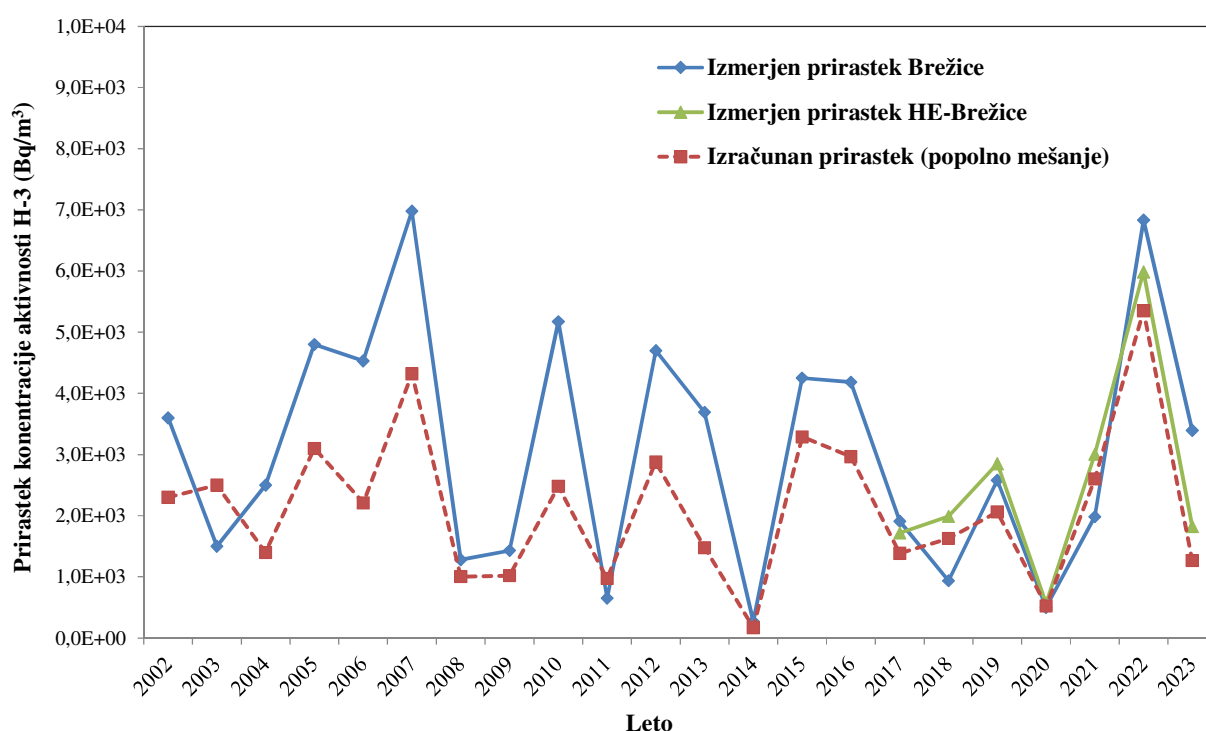


Slika 1.6: Primerjava med mesečnimi izmerjenimi prirastki koncentracije aktivnosti tritija v reki Savi in izračunanimi prirastki koncentracije aktivnosti. Izračunana koncentracija aktivnosti je dobljena iz mesečnih tekočinskih izpustov H-3 in pretoka Save (mesečni izpust / mesečna prostornina pretečene Save).



Na sliki 1.6 je prikazana primerjava med izmerjenimi mesečnimi prirastki koncentracije aktivnosti H-3 in izračunanimi koncentracijami aktivnosti H-3 na HE Brežice, v Brežicah in v Jesenicah na Dolenjskem. Prirastek koncentracije aktivnosti tritija pomeni, da je bila odšteta izmerjena koncentracija aktivnosti tritija (naravno ozadje) na referenčnem mestu v Krškem pred NEK. Izračunano koncentracijo aktivnosti smo dobili tako, da smo mesečni izpust H-3 delili z mesečno količino pretečene savske vode in predpostavili popolno mešanje vode.

Na sliki 1.7 je podana primerjava med izmerjenimi letnimi prirastki koncentracije aktivnosti in izračunanimi letnimi koncentracijami aktivnosti H-3 v Brežicah od leta 2002. Dodali smo tudi izmerjene prirastke na jezu HE Brežice od leta 2017. Dolgoletne težnje kažejo, da na mestu vzorčenja v Brežicah in tudi pri HE Brežice v preteklosti najverjetneje še ni prišlo do popolnega mešanja izpuščenih radionuklidov s savsko vodo. Izmerjeni povprečni letni prirastki koncentracije aktivnosti tritija v Brežicah so bili sistematično večji kot izračunani prirastki ob predpostavki popolnega mešanja vode. Po izgradnji jezusa HE Brežice so se hidrodinamske razmere spremenile, kar smo že opisali v uvodu.



Slika 1.7: Primerjava med izmerjenima letnima povprečnima prirastkoma koncentracije aktivnosti H-3 v reki Savi na jezu HE Brežice ter za jezum v Brežicah in izračunanim prirastkom koncentracije aktivnosti H-3, dobljenim iz letnih tekočinskih izpustov in pretoka Save ob predpostavki popolnega mešanja

Po prejšnji metodologiji ocenimo razredčitveno razmerje DR (*Dilution Ratio*) na različnih lokacijah pod jezum NEK kot razmerje med prirastkom koncentracije aktivnosti tritija na danem mestu pod izpustom (npr. v Brežicah) $C_{w,L}$ in prirastkom koncentracije aktivnosti tritija na mestu s popolnim mešanjem vode $C_{w,tot}$ [28]:

$$DR = \frac{C_{w,L}}{C_{w,tot}} \quad (1.1)$$

Prirastek koncentracije aktivnosti na mestu popolnega mešanja izračunamo iz izraza:

$$C_{w,tot} = \frac{A_{H-3}}{F \times t} \quad (1.2)$$



kjer je A_{H-3} skupna letna izpuščena aktivnost tritija (Bq), produkt $F \times t$ pa celotni letni volumen pretečene Save v kubičnih metrih. Pri tem je F povprečni letni pretok, t pa je čas (eno leto).

Vrednosti DR so lahko 0 na lokacijah, kjer še ni prišlo do mešanja, med 0 in 1 na lokacijah, kjer se čista voda le delno meša s kontaminirano (npr. na nasprotnem bregu pod izpustom), ali pa več kot 1 na lokacijah, kjer se kontaminirana voda nepopolno meša s čisto, npr. na istem bregu neposredno pod izpustom. Pri popolnem mešanju je DR enak 1.

Iz razlike med povprečnimi letnimi koncentracijami aktivnosti tritija v Brežicah, Jesenicah na Dolenjskem in Krškem smo dobili izmerjen prirastek koncentracije aktivnosti v Brežicah $C_{w,L}$ 2,83 kBq/m³, v Jesenicah na Dolenjskem pa 1,65 kBq/m³. Izračunani prirastek koncentracije aktivnosti tritija na mestu popolnega mešanja $C_{w,tot}$ za lokacijo v Brežicah je bil 1,27 kBq/m³, za lokacijo v Jesenicah na Dolenjskem pa 0,91 kBq/m³. Razredčitveno razmerje za lokacijo v Brežicah je tako enako 2,24, za lokacijo v Jesenicah na Dolenjskem pa 1,83. Iz tega sledi, da na obeh omenjenih lokacijah izpusti še niso popolno premešani s savsko vodo. Razredčitvena razmerja za točke med jezom NEK in jezom HE Brežice so definirana drugače [93] in jih določimo s pomočjo novo razvite programske opreme DOSENEK (več v poglavju o ocenah učinkov).

Ogljik (C-14)

Večina C-14 v okolju je danes posledica naravnega kozmičnega sevanja. Poskusne jedrske eksplozije so njegovo aktivnost v atmosferi v šestdesetih letih podvojile. Le manjši delež C-14 nastaja zaradi izpustov jedrskih objektov. Od leta 2013 se C-14 sistematično meri v četrtletnih vzorcih tekočinskih efluentov, te meritve je v letu 2023 opravil IRB.

Iz posameznih meritev aktivnosti in volumna izpuščene vode iz WMT (kvartalni izpusti) smo ocenili četrtletne aktivnosti C-14. Te so bile od 3,2 MBq v drugem četrtletju do 26,6 MBq v četrtem četrtletju, ko so bili tekočinski izpusti v reko Savo najvišji. Skupno letno izpuščeno aktivnost C-14 0,041 GBq smo izračunali kot vsoto četrtletnih vrednosti. Izpusti so za več kot en velikostni red nižji, kot je dolgoletno povprečje (1,4 GBq) od leta 2013. Ocenjeni izpusti so tudi nižji od grobe ocene, ki jo naredimo glede na obratovalno moč elektrarne (1,8 GBq na leto oziroma 2,6 GBq/GW(e)-leto [46]). Aktivnost izpuščenega C-14 je več kot 5 velikostnih redov nižja kot pri tritiju.

C-14 je bil v letu 2023 merjen tudi v savski vodi in v ribah [21]. Na lokacijah na levem in desnem bregu pretočne akumulacije HE Brežice so bili odvzeti sestavljeni četrtletni vzorci. Povprečni četrtletni koncentraciji aktivnosti C-14 na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera sta bili 85 pMC⁷ (9,6 Bq/m³ vode) in 86 pMC (9,7 Bq/m³ vode), kar je primerljivo z naravnim, večinoma kozmogonim, C-14 v okolju (okrog 11 Bq/m³). Glede na letne izpuste v Savo in povprečni letni pretok Save je pričakovati, da bi povprečna koncentracija aktivnosti C-14 v Brežicah narasla za okrog 0,004 Bq/m³, kar je bistveno manj od izmerjenih vrednosti. Vpliv NEK na koncentracijo C-14 v Savi je zato nemerljiv.

Vnos radioaktivnega ogljika v ribe poteka prek vode in vodnih rastlin, s katerimi se ribe hranijo. Obstaja popolno ravnovesje med raztopljenim anorganskim ogljikom v vodi in v ribi [47]. Iz bioakumulacijskega faktorja C-14 in ocenjenega povprečnega prirastka C-14 v Savi (0,004 Bq/m³) zaradi učinka NEK lahko ocenimo, da se relativna specifična aktivnost C-14 v ribah podobno kot v vodni bioti minimalno poveča (< 0,02 Bq/kg) in je pod mejo detekcije. Izmerjena sta bila tudi dva vzorca rib (sulec in rdečeperka) v akumulacijskem jezeru HE Brežice.

Izmerjeni relativni specifični aktivnosti C-14 v ribah sta bili 102,2 pMC in 100,2 pMC (231 Bq/kg C in 227 Bq/kg C). Obe izmerjeni aktivnosti sta primerljivi s trenutno atmosfersko aktivnostjo (102 pMC). V primerjavi s prejšnjimi leti so specifične aktivnosti C-14 v reki Savi in ribah v okviru negotovosti meritev enake.

⁷ pMC pomeni "odstotek modernega ogljika" ali relativna specifična aktivnost C-14. Relativna specifična aktivnost se izračuna glede na referenčni vzorec aktivnosti C-14 iz znanega standarda. Po definiciji je 100 pMC enak 226 Bq na kg ogljika. Pri pretvorbi rezultatov meritev C-14 v vodi upoštevamo, da je 100 pMC enako 11,3 Bq/m³ vode [23].



Jod (I-131)

Kratkoživi radioaktivni jod (I-131) občasno opazimo v tekočinskih efluentih NEK. V letu 2023 je bila skupna izpuščena aktivnost joda I-131 v reko Savo 0,27 MBq.

I-131 je redno prisoten v vodi na vseh vzorčevalnih mestih reke Save, tako vzvodno od elektrarne kot nizvodno v pretočni akumulaciji HE Brežice, v Brežicah in Jesenicah na Dolenjskem. Povišane koncentracije joda je bilo mogoče izmeriti takoj po černobilski nesreči. V nekaterih rekah v Sloveniji ga je mogoče najti zaradi uporabe tega radionuklida v medicini.

V letu 2023 koncentracija aktivnosti I-131 zelo niha in je včasih tudi pod mejo detekcije. V posamičnih vzorcih je bila v Krškem izmerjena koncentracija do 2,5 Bq/m³ (povprečno 0,9 Bq/m³), na levem bregu so bile koncentracije aktivnosti do 9,3 Bq/m³ (povprečno 2,4 Bq/m³), na desnem bregu do 8,5 Bq/m³ (povprečno 2,2 Bq/m³), nad jezom HE Brežice do 3,6 Bq/m³ (povprečno 1,3 Bq/m³), v Brežicah do 2,3 Bq/m³ (povprečno 1,0 Bq/m³) in v Jesenicah na Dolenjskem do 3,0 Bq/m³ (povprečno 0,8 Bq/m³).

Če primerjamo rezultate meritev z ločenim nadzorom v življenjskem okolju v RS [19], so bile povprečne koncentracije na reki Savi v Brežicah (4,9 Bq/m³) višje, kot jih izmerimo v Savi v Ljubljani (1,5 Bq/m³). V Krki in Savinji so bile povprečne koncentracije aktivnosti I-131 nižje (0,07 Bq/m³ in 0,6 Bq/m³). V Muri, Dravi, Soči in Kolpi v letu 2023 jod I-131 ni bil zaznan.

V talnem sedimentu se jod redkeje pojavlja in v letu 2023 ni bil zaznan.

V vzorcih rib iz referenčnega odvzema (v Krškem nad jezom) in v vzorcih iz nadzornih odzemnih mest pod jezom NEK (meritve ZVD in IRB) v letu 2023 ni bila zaznana prisotnost I-131, kar je enako kot v preteklih letih. Glede na koncentracije aktivnosti joda v posamičnih vzorcih nefiltrirane vode (okrog 2 Bq/m³) bi pričakovali, da je specifična aktivnost joda v ribah okrog 0,08 Bq/kg (upoštevajoč bioakumulacijski faktor $B_f = 0,04 \text{ m}^3/\text{kg}$) [28]. Če upoštevamo še zamik med datumoma vzorčenja in analize ter način priprave vzorcev (sušenje ali sežig), se zaradi hitrega radioaktivnega razpada predvidena specifična aktivnost I-131 v ribi zmanjša pod mejo detekcije oziroma vsebnost ni merljiva.

Cezij (Cs-137)

Radioaktivni izotop cezija (Cs-137) je povsod v okolju in je posledica globalne in regionalne kontaminacije (jedrski poskusi in nesreča v Černobilu). Cs-137 izmerimo tudi v tekočinskih izlivih NEK.

Letni izpust Cs-137 v letu 2023 je bil 1,23 MBq, kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo kot v letih 2012–2022 (povprečje 1,64 MBq) in nižje kot dolgoletno povprečje 14,0 MBq (2000–2022). Cezij se slabo (le v nekaj odstotkih) veže na grobo suspendirano snov [28]. Če bi prišlo do večjega izpusta NEK, bi to najprej zaznali v povečani koncentraciji aktivnosti v vodi (suhi ostanek po izparevanju vzorca vode) in le manjši delež v filtrskem ostanku (v grobi suspendirani snovi).

Upošteva letni izpust (1,23 MBq) in povprečni pretok Save (293 m³/s) ter ob privzetku razredčitvenega razmerja na levem bregu v Brežicah (2,24) lahko ocenimo prirastek koncentracije aktivnosti Cs-137 v Brežicah na okrog 0,0003 Bq/m³. Prirastek je tri velikostne rede nižji od izmerjenih vrednosti, zaradi česar ga ni mogoče ločiti od globalne kontaminacije.

Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti v filtrirani vodi (suhi ostanek po izparevanju vzorca vode) je bilo na referenčnem mestu v Krškem 0,17 Bq/m³, na odzemnem mestu Jesenice na Dolenjskem pa 0,05 Bq/m³. V Brežicah in nad jezom HE Brežice Cs-137 v vodi ni bil zaznan v nobenem vzorcu.

Cs-137 se je sicer v preteklosti navadno pojavljal v nekoliko višjih koncentracijah v filtrskem ostanku kot v vodni sušini, sedaj pa so rezultati praviloma na meji detekcije ali pod njo. Na referenčni lokaciji v Krškem je bila najvišja izmerjena vrednost 0,18 Bq/m³, povprečna pa 0,10 Bq/m³. Nad jezom HE Brežice je bila najvišja izmerjena vrednost 1,62 Bq/m³, povprečna pa 0,25 Bq/m³. V Brežicah je bila najvišja izmerjena vrednost 0,78 Bq/m³, povprečna pa 0,21 Bq/m³.

Izmerjene koncentracije aktivnosti Cs-137 v rekah po Sloveniji variirajo glede na lokacijo vzorčenja in so podobne ali višje od vrednosti, izmerjenih v reki Savi v okolici NEK. Povprečna koncentracija aktivnosti Cs-137 v letu 2023 je bila od 0,06 Bq/m³ v Krki do 1,0 Bq/m³ v Muri. V Soči, Savi pri Brežicah in Kolpi

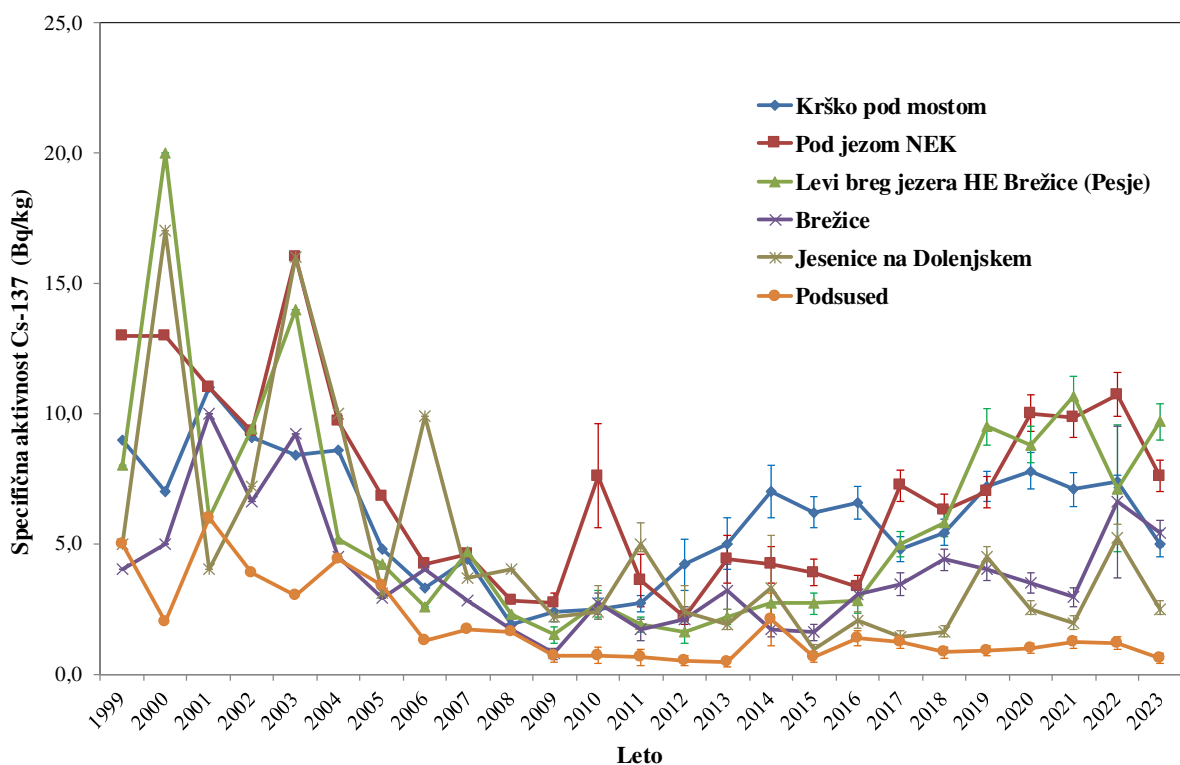


Cs-137 v letu 2023 ni bil detektiran, ali pa je bil vsaj en rezultat meritve pod mejo kvantifikacije (velika merska negotovost) [19].

Povprečja izmerjenih specifičnih aktivnosti Cs-137 v sedimentih so od 1,7 Bq/kg v Jesenicah na Dolenjskem do 7,9 Bq/kg na desnem bregu pretočne akumulacije HE Brežice. Na referenčnem mestu v Krškem je bilo povprečje 6,5 Bq/kg (meritve ZVD). Na sliki 1.8 smo primerjali dolgoletne poteke rezultatov meritev IRB. Opazne so razlike med meritvami na posameznih lokacijah. Na podlagi standardne deviacije (razsutja) posamičnih meritev vzorcev po lokacijah lahko to pripisujemo negotovosti vzorčenja. Pred letom 2010 se je specifična aktivnost Cs-137 v sedimentu na vseh lokacijah sistematično zmanjševala. To smo povezali z razpadom radionuklida iz globalne kontaminacije ter istočasno z izpiranjem talnega sedimenta. Specifične aktivnosti umetnih radionuklidov so v sedimentih zaradi izpiranja bistveno nižje kot v vrhnji plasti zemlje (običajna specifična aktivnost cezija v zemlji je namreč nekaj deset Bq/kg).

Iz rezultatov meritev na sliki 1.8 je razvidno, da specifična aktivnost Cs-137 v zadnjih letih od 2017 naprej na večini lokacij (tako na referenčni lokaciji kot v pretočni akumulaciji) narašča. To je lahko posledica premikanja obrežnega sedimenta in morda tudi posledica posegov v okolje zaradi gradnje hidroelektrarn na spodnji Savi. Zaradi majhnih izpustov in razmeroma velikih vzorčevalnih in merskih negotovosti ugotavljamo, da učinka NEK v sedimentu ni mogoče zaznati.

Spektrometrične analize rib sta opravila ZVD in IRB. V meritvah rib, ki jih je opravil IRB, Cs-137 ni bil zaznan. Nasprotno pa analize vzorcev rib, ki jih je opravil ZVD, kažejo, da so povprečne mesečne specifične aktivnosti Cs-137 v nekaterih ribah nad mejo detekcije. Nad jezo HE Brežice je bilo povprečje 0,35 Bq/kg (povprečje v letih 2017–2022 je 0,05 Bq/kg), v Brežicah 0,05 Bq/kg (povprečje v letih 2017–2022 je 0,03 Bq/kg), v Jesenicah na Dolenjskem pa 0,07 Bq/kg (povprečje v letih 2017–2022 je 0,03 Bq/kg). Letna povprečja so izračunana po štirih vzorcih rib. Na referenčni lokaciji v Krškem so bile vrednosti cezija v vseh vzorcih rib pod mejo detekcije (povprečje v letih 2017–2022 je 0,02 Bq/kg). V okviru negotovosti povprečij so vsebnosti Cs-137 v ribah na odvzemnih mestih podobne, z izjemo lokacije nad jezo HE Brežice, kjer je bila povprečna izmerjena koncentracija cezija v letu 2023 občutno višja od povprečja zadnjih šestih let.



Slika 1.8: Primerjava specifičnih aktivnosti Cs-137 v talnem sedimentu reke Save na lokacijah vzdvodno in nizvodno od jezua NEK. Prikazane so povprečne specifične aktivnosti od 1999 do 2023.



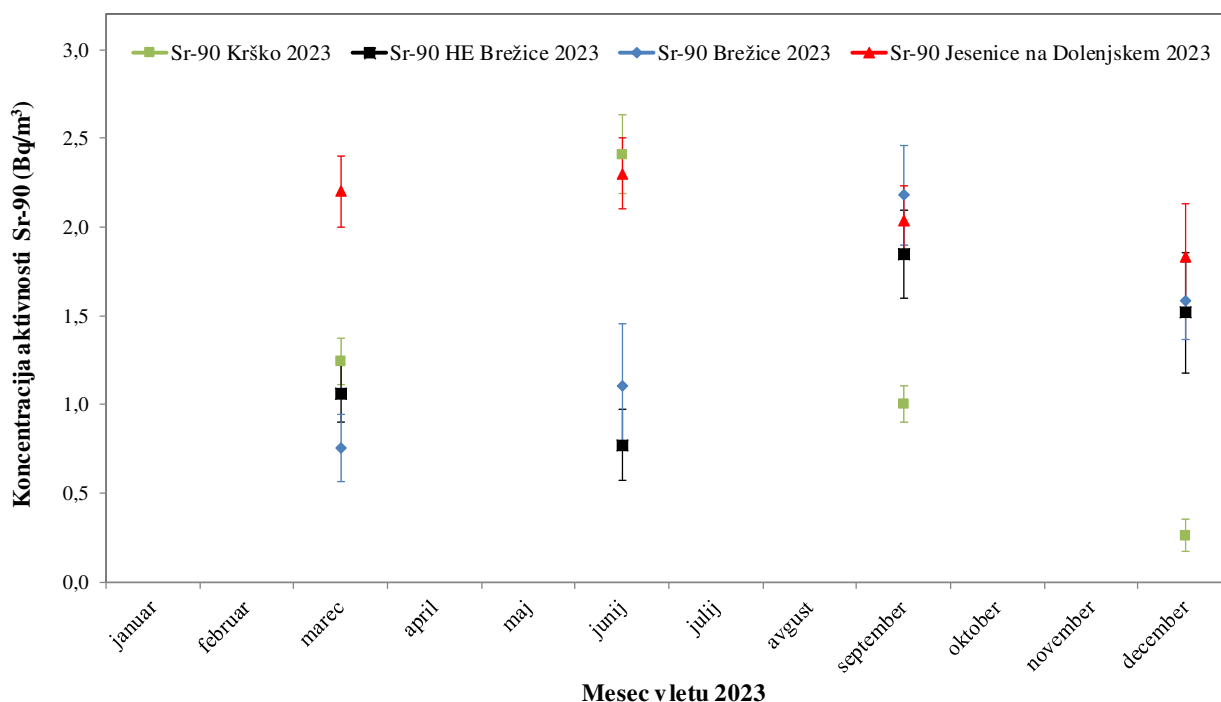
Glede na izpuste cezija iz NEK in posledično na povišanje koncentracije aktivnosti Cs-137 v vzorcih nefiltrirane vode (največ 0,0003 Bq/m³) bi pričakovali, da je specifična aktivnost Cs-137 v ribah okrog 0,0006 Bq/kg (upoštevajoč koncentracijski faktor $B_r = 2,0 \text{ m}^3/\text{kg}$) [28], kar je približno dva reda velikosti nižje od izmerjenih specifičnih aktivnosti. Podobno kot pri sedimentu ugotovimo, da je specifična aktivnost cezija v ribah kot posledica učinka NEK nemerljiva in da je prisotnost Cs-137 predvsem posledica globalne kontaminacije.

Stroncij (Sr-90)

Sr-90 je podobno kot radionuklid Cs-137 prisoten povsod v okolju in je posledica globalne kontaminacije. V primerjavi s cezijem je bil delež stroncija v okolju zaradi učinka Černobila na področju Slovenije skoraj zanemarljiv. Kot posledica poskusnih jedrskih eksplozij pa je bil used obeh radionuklidov na naši geografski širini primerljiv.

Radioaktivni izotop stroncija Sr-90 je redno v tekočinskih izpustih NEK. V letu 2023 je bila v reko Savo izpuščena aktivnost 0,105 MBq.

Večina stroncija je raztopljena v vodi, koncentracija aktivnosti Sr-90 v vodi je vsaj 10-krat večja kot v filtrskem ostanku. Povprečne izmerjene koncentracije Sr-90 v filtrskem ostanku so 0,08 Bq/m³ na referenčni lokaciji v Krškem, 0,06 Bq/m³ nad jezom HE Brežice in 0,25 Bq/m³ v Brežicah. V Jesenicah na Dolenjskem so bili vsi rezultati meritev pod mejo detekcije. Na splošno so koncentracije stroncija v vodi do 10-krat višje kot koncentracije Cs-137. Na sliki 1.9 je prikazana primerjava rezultatov meritev Sr-90 v vodi na različnih odvzemnih mestih v letu 2023.

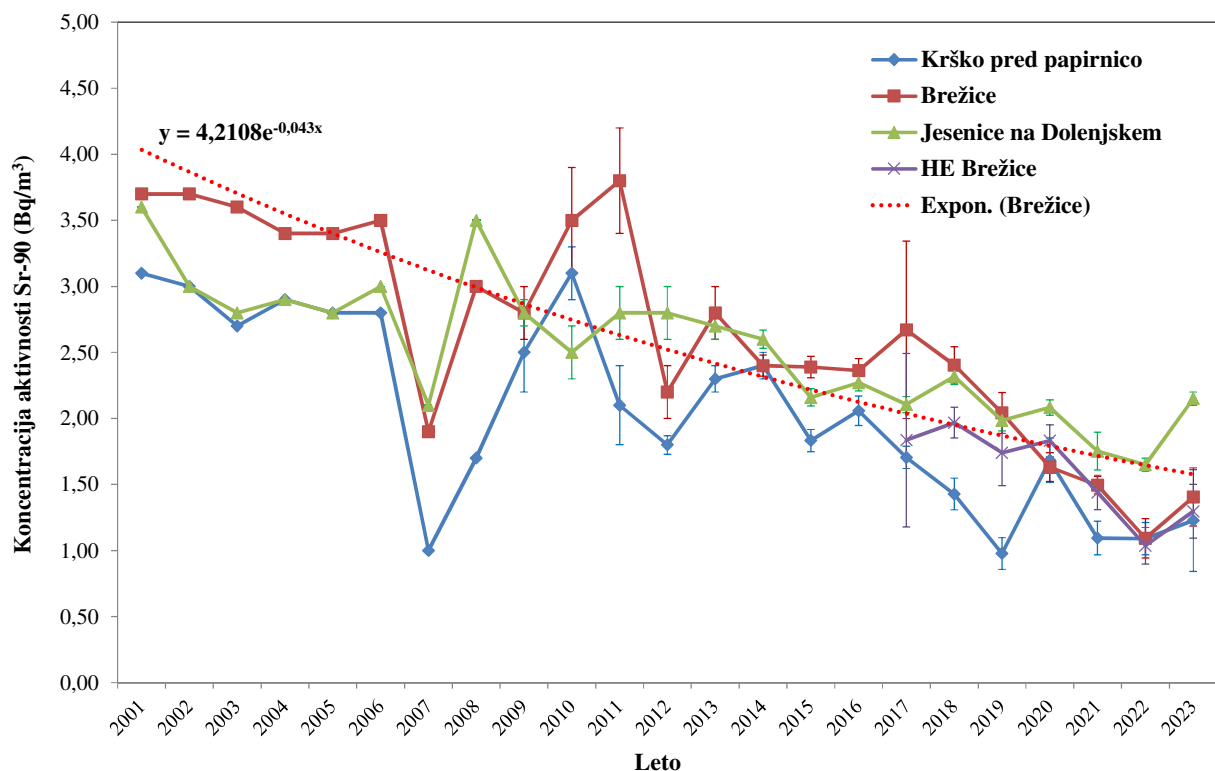


Slika 1.9: Primerjava četrtletnih povprečnih koncentracij aktivnosti Sr-90 v vodi (v suhem ostanku po izparevanju vzorca) reke Save na lokacijah Krško, nad jezom HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem. Meritve na lokacijah nad jezom HE Brežice, Brežice in v Jesenice na Dolenjskem so mesečne.



Razlike med povprečji koncentracij aktivnosti Sr-90 na lokacijah, kjer se neprekinjeno vzorči, so v okviru negotovosti povprečij majhne, od 1,2 Bq/m³ v Krškem do 2,2 Bq/m³ v Jesenicah na Dolenjskem. Tudi koncentracije aktivnosti Sr-90 v posamičnih (nefiltriranih) vzorcih vode v okviru merskih in vzorčevalnih negotovosti ne odstopajo od meritev neprekinjeno vzorčenih vzorcev filtrirane vode in so od 1,2 Bq/m³ na desnem bregu pretočne akumulacije do 3,1 Bq/m³ v Jesenicah na Dolenjskem.

Povprečne koncentracije aktivnosti stroncija v drugih rekah po Sloveniji ne odstopajo od rezultatov meritev, izmerjenih v Savi v okolici NEK. Povprečna koncentracija, izmerjena v Savi na lokaciji Laze pri Ljubljani, je bila 2,2 Bq/m³, v Dravi 1,1 Bq/m³ in v Muri 1,3 Bq/m³ [19]. Koncentracije aktivnosti Sr-90 v savski vodi so v okviru merskih in vzorčevalnih negotovosti podobne rezultatom iz zadnjih nekaj let (glej sliko 1.10). Opazen je trend upadanja, ustrezen razpolovni dobi stroncija (28,8 let). Primerjava rezultatov meritev na različnih lokacijah z upoštevanjem merskih negotovosti kaže, da je učinek NEK nemerljiv.



Slika 1.10: Primerjava povprečnih koncentracij aktivnosti Sr-90 v vodi reke Save in eksponentno upadanje zaradi radioaktivnega razpada; razpadna konstanta Sr-90 je 0,024 na leto in se v okviru negotovosti povprečij ujema z usmeritvijo na grafu ((0,043 ± 0,01) na leto).

Specifične aktivnosti stroncija v obrežnih sedimentih so tipično do 10-krat nižje od specifičnih aktivnosti cezija. Na referenčni lokaciji v Krškem je bila povprečna letna izmerjena vrednost enaka 0,23 Bq/kg. Na ostalih lokacijah nizvodno od jezua NEK so bile povprečne specifične aktivnosti Sr-90 od 0,12 Bq/kg nad jezom HE Brežice do 0,92 Bq/kg na levem bregu pretočne akumulacije. Specifična aktivnost stroncija v obrežnem sedimentu je tako primerljiva z rezultati meritev iz predhodnih let. V obrežnih sedimentih je učinek NEK nemerljiv.

Povprečja koncentracij stroncija Sr-90 v ribah so od 0,05 Bq/kg v Krškem do 0,20 Bq/kg v Brežicah. Ločeno merjenje kosti in mišic rib se ne izvaja od leta 2005, zato primerjava med specifičnimi aktivnostmi stroncija v vzorcih mišic in kosti rib ni mogoča. Stroncij se namreč v glavnem kopiči v kosteh, kjer so vsebnosti tipično dva velikostna reda višje kot v mišicah. Glede na povprečno koncentracijo aktivnosti stroncija v vzorcih reke Save (1,5 ± 0,4) Bq/m³ bi pričakovali, da je specifična aktivnost stroncija v ribah 0,09 Bq/kg (upoštevajoč koncentracijski faktor $B_r = 0,06 \text{ m}^3/\text{kg}$) [28]. Povprečje izmerjenih specifičnih



aktivnosti v ribah za vse lokacije skupaj je 0,10 Bq/kg (mišice in kosti ribe skupaj, meritve ZVD), kar se lepo ujema s pričakovano vrednostjo glede na koncentracijo stroncija Sr-90 v vodi.

Drugi aktivacijski in fisijski produkti

Drugi fisijski in aktivacijski produkti (Co-58, Co-60, Cr-51, Mn-54, Ag-110m, Sb-125) se redno pojavljajo v tekočinskih izpustih NEK. V letu 2023 je bila skupna aktivnost teh radionuklidov vsaj pet velikostnih redov nižja od tritijeve. Cs-134 je bil v tekočinskih izpustih nazadnje izmerjen leta 2016. V zadnjih nekaj letih ni bil zaznan v okolju noben od naštetih radionuklidov. Nazadnje je bil detektiran Co-60 v letih 2003 in 2006 v vodi in sedimentu, Cs-134 pa v sedimentih leta 2002.

Naravni radionuklidi

Naravni radionuklidi uranove (U-238, Ra-226 in Pb-210) in torijeve (Ra-228 in Th-228) razpadne vrste so bili redno zaznani v vseh vzorcih vode. V savski vodi so bile na vseh odvzemnih mestih (kontinuirano vzorčenje) povprečne koncentracije aktivnosti U-238 do 7,0 Bq/m³ (Brežice), Ra-226 do 2,5 Bq/m³ (Krško), Pb-210 do 19 Bq/m³ (nad jezom HE Brežice), Ra-228 do 1,3 Bq/m³ (Brežice), Th-228 do 0,8 Bq/m³ (nad jezom HE Brežice) in Be-7 do 116 Bq/m³ (nad jezom HE Brežice).

Povprečne koncentracije aktivnosti K-40 so od 29 Bq/m³ (Jesenice na Dolenjskem) do 43 Bq/m³ (Krško). Predvsem za K-40 je značilno izrazito nihanje, ki je povezano predvsem z onesnaženostjo rek, v manjši meri pa tudi z geološko sestavo tal. Koncentracije aktivnosti naravnih radionuklidov v vodi so tako podobne izmerjenim v rekah po Sloveniji. Koncentracija aktivnosti K-40 v rekah po Sloveniji variira, kot je to značilno za geološko raznovrstnost slovenskega ozemlja. Kalij je splošno razširjen v vrhni plasti zemlje, njegove spojine pa so topne v vodi. Povprečna koncentracija aktivnosti kalija v rekah v letu 2023 je bila od 6,7 Bq/m³ v reki Kolpi do 161 Bq/m³ v Savinji. Najnižja izmerjena koncentracija aktivnosti ⁴⁰K je bila (13 ± 2) Bq/m³ v Soči, najvišja pa je bila v Savinji (270 ± 9) Bq/m³. Povišano vsebnost kalija lahko razlagamo s povišano sedimentacijo reke (mešanje vode in zemljine) na mestu odvzema (npr. po čistilni napravi v Laškem) [19].

V sedimentih so bile na vseh odvzemnih mestih povprečne specifične aktivnosti U-238 do 38 Bq/kg, Ra-226 do 36 Bq/kg, Pb-210 do 85 Bq/kg, Ra-228 do 38 Bq/kg, Th-228 do 35 Bq/kg in Be-7 do 47 Bq/kg. Z izjemo berilija so bila vsa najvišja povprečja izmerjena v Krškem. Povprečne specifične aktivnosti K-40 so bile od 245 Bq/kg (Jesenice na Dolenjskem) do 466 Bq/kg (Krško).

V efluentih NEK naravni radionuklidi niso prisotni, zato ne ocenjujemo njihove obremenitve na okolje.

OCENA UČINKOV

Izpostavitve prebivalstva se ocenjuje iz neposrednih meritev izpustov (emisij) in z uporabo ustreznih modelov. Učinek na okolje po savski prenosni poti ocenjujemo iz primerjave rezultatov emisijskih meritev (meritev vzorcev iz odpadnih merilnih rezervoarjev – WMT in kaluž uparjalnikov – SGBD), ki jih izvaja NEK, in rezultatov meritev vzorcev reke Save. V letu 2003 sta bila izdelana metodologija in model za oceno doz pri izpostavitvi prebivalcev [27], revidirana pa v letu 2009 (*Izpostavitve referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo – Nova referenčna lokacija* [28]). V metodologiji so prepoznane glavne prenosne poti, načini izpostavitve in referenčne osebe⁸ za Slovenijo. Za modelno oceno obremenitev, ki bi jih lahko prinesle zgolj po Savi potekajoče prenosne poti, je bila izbrana kot referenca skupina brežiških športnih ribičev in članov njihovih družin. To so referenčne osebe, ki prejmejo dozo, značilno za bolj izpostavljene posameznike iz prebivalstva.

⁸ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejelo najvišje doze.



Enodimenzionalni (veljavni) model

V tabeli 1.4 je podan inventar letnih tekočinskih izpustov NEK za obdobje 2016–2023. Aktivnost izpuščenega tritija H-3 v letu 2023 (11,7 TBq) prevladuje nad aktivnostjo vseh preostalih radionuklidov. Čeprav tritij ni zelo radiotoksičen, velika izpuščena aktivnost še vedno pomeni, da je z vidika prejete učinkovite doze na referenčne osebe pomemben radionuklid. Pomembni so aktivacijski produkti Cr-51, Co-58 in Co-60, Ag-110m in Sb-125 ter fisijska produkta Cs-137 in Sr-90. Pomemben je tudi C-14, ki sicer nima visoke radiotoksičnosti, vendar je po količini takoj za tritijem. Skupna izpuščena aktivnost vseh preostalih radionuklidov je bila v letu 2023 0,066 GBq. Pri izračunu letne učinkovite doze nismo upoštevali prispevka žlahtnih plinov in drugih zelo kratkoživih radionuklidov, ker za vnos v telo niso pomembni.

Za izračun letne učinkovite doze v letu 2023 so bili uporabljeni naslednji vhodni podatki:

- letni izpust radionuklidov iz poročil NEK (tabela 1.4);
- povprečni pretok Save v Brežicah v tem obdobju (294 m³/s);
- razredčitveno razmerje *DR* na lokaciji 350 m nizvodno od jezca NEK (3 ± 2) in v Brežicah ($1,4 \pm 0,5$); to je dolgoletno povprečno razredčitveno razmerje od 2007 do 2021, dobljeno iz primerjave meritev tritija v izpustih in v Brežicah;
- povprečna koncentracija suspendiranega sedimenta (21,3 g/m³, povprečje meritev v Brežicah, nad jezo HE Brežice in Jesenice na Dolenjskem);
- predpostavka o maksimalno izpostavljenem posamezniku in ekstremni porabi (največja mogoča ocena izpostavitve).

Od številnih mogočih prenosnih poti izpostavitve izpuščeni radioaktivnosti sta za prebivalce v okolici NEK najpomembnejši zadrževanje na bregu (zunanje sevanje) in uživanje rečnih rib. Po dostopnih informacijah napajanje živine in zalivanje pridelkov z rečno vodo nista značilnosti tega področja, zato ju nismo upoštevali v računu. Pitje rečne vode prav tako ni realna podmena zaradi onesnaženosti reke. Vpliv reke Save na pitno vodo se obravnava v poglavju *Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi*. Analizirano je tudi izpostavljanje pri kopanju v reki Savi. Ta prenosna pot se zdi malo verjetna, zato ni vključena v model.

V modelu je vključeno zadrževanje na bregu in uživanje rib, značilno za ribiče, ki so v našem primeru referenčne osebe. Podrobni podatki o navadah ribičev so bili dobljeni od gospodarja Ribiške družine Brestanica-Krško. Po njegovih informacijah morda tretjina ribičev uživa ujete ribe. Ti tvorijo referenčno skupino, ki šteje 36 ljudi. V tabeli 1.5 so podane značilnosti referenčne osebe, ki so bile uporabljene v metodologiji: čas, ki ga ribič in njegov otrok preživita na bregu, in letna poraba rib iz Save. Za oceno izpostavljenosti pri pitju savske vode (malo verjetna prenosna pot) so uporabljeni podatki za letno porabo Evropske unije in slovenske zakonodaje po starostnih skupinah: 260 L (dojenčki 1 leto), 350 L (otroci 7–12 let) in 750 L (odrasli > 17 let).

Ocenjena letna učinkovita doza za referenčno osebo, narejena iz realnih izpustov NEK in ob predpostavkah največje izpostavitve (ekstremna poraba in maksimalni čas zadrževanja na obrežju, tabela 1.6), je za odraslo osebo v Brežicah 0,0029 μSv. Na bližji lokaciji (350 m nizvodno od NEK) pa je izračunana letna učinkovita doza za odraslo osebo (maksimalna poraba) 0,0061 μSv (tabela 1.7). Če bi upoštevali povprečne navade referenčne osebe, bi bile prejete učinkovite doze še nekajkrat nižje. Največja negotovost izračuna letnih učinkovitih doz izvira iz negotovosti koncentracijskih faktorjev B_r za ribe, saj se privzeti faktorji lahko spreminjajo tudi za red velikosti. Podobno slabo so poznane tudi negotovosti doznih faktorjev, ki so bistveno večje od merskih negotovosti.

Druge starostne skupine (otroci in dojenčki) v skladu s to oceno prejmejo še nižjo učinkovito dozo. Vzporedno je narejena tudi ocena učinkovite letne doze ob predpostavki pitja rečne vode (odrasla referenčna oseba v Brežicah 0,024 μSv). V poročilu *IJS-DP-10114* [28] je bilo ugotovljeno, da je prenosna pot pitja rečne vode malo verjetna in je zato nismo upoštevali pri končnem vrednotenju izpostavljenosti.


Tabela 1.4: Inventar tekočinskih izpustov v letih 2017–2023 [5].

Radionuklid	2017 [Bq/leto]	2018 [Bq/leto]	2019 [Bq/leto]	2020 [Bq/leto]	2021 [Bq/leto]	2022 [Bq/leto]	2023 [Bq/leto]
H-3	8,64E+12	1,05E+13	1,36E+13	2,95E+12	1,61E+13	2,43E+13	1,17E+13
C-14	1,25E+08	4,1E+07	8,76E+07	2,98E+08	1,31E+08	1,43E+08	4,11E+07
Na-24	–	–	–	–	–	–	–
Cr-51	–	–	–	–	–	4,02E+06	–
Mn-54	–	4,57E+05	4,01E+04	4,28E+05	9,07E+05	3,39E+04	3,16E+05
Fe-55	2,02E+06	3,96E+06	4,25E+06	2,97E+06	3,86E+06	2,80E+06	2,28E+06
Fe-59	–	–	–	–	–	–	–
Co-57	–	–	–	–	–	–	–
Co-58	5,97E+05	3,40E+06	7,33E+06	1,18E+06	9,09E+06	4,98E+06	1,19E+07
Co-60	1,38E+06	2,00E+06	3,70E+06	2,37E+06	4,94E+06	2,43E+06	1,99E+06
Zn-65	–	–	–	–	–	–	–
Se-75	–	–	–	–	–	–	–
Sr-85	–	–	–	–	–	–	–
Sr-89	–	–	–	–	–	–	–
Sr-90	1,34E+05	4,43E+04	7,80E+04	4,38E+04	4,34E+04	5,34E+04	1,05E+05
Y-92	–	–	–	–	–	–	–
Zr-95	–	–	–	–	–	–	–
Nb-95	–	6,43E+05	–	–	–	–	–
Nb-97	–	–	–	–	–	–	–
Mo-99	–	–	–	–	–	–	–
Tc-99m	–	–	–	–	–	–	–
Kr-85	–	–	–	–	–	–	–
Kr-85m	–	–	–	–	–	–	–
Kr-87	–	–	–	–	–	–	–
Kr-88	–	–	–	–	–	–	–
Rb-88	–	–	–	–	–	–	–
Ru-103	–	–	–	–	–	–	–
Ru-106	–	–	–	–	–	–	–
Ag-110m	1,39E+06	1,96E+06	6,90E+06	1,97E+06	1,19E+07	1,84E+06	3,09E+06
Sn-113	–	–	–	–	–	–	–
Sb-124	–	–	–	–	–	–	–
Sb-125	7,04E+05	2,45E+06	–	–	2,10E+06	1,26E+06	–
Te-123m	–	–	–	–	–	–	–
Te-125m	–	–	–	–	–	–	–
Te-127m	–	–	–	–	–	–	–
Te-129m	–	–	–	–	–	–	–
Te-132	–	–	–	–	–	–	–
I-129	–	–	–	–	–	–	–
I-131	–	–	1,92E+05	–	–	–	2,74E+05
I-132	–	–	–	–	–	–	–
I-133	–	–	–	–	–	–	–
I-134	–	–	–	–	–	–	–
Cs-134	–	–	–	–	–	–	–
Cs-137	1,00E+06	1,99E+06	2,17E+06	9,60E+05	1,81E+06	1,47E+06	1,23E+06
Cs-136	–	–	–	–	–	–	–
Cs-138	–	–	–	–	–	–	–
Xe-131m	–	–	–	–	–	–	–
Xe-133	–	–	–	–	–	–	3,67E+06
Xe-133m	–	–	–	–	–	–	–
Xe-135	–	–	–	–	–	–	–
Xe-135m	–	–	–	–	–	–	–
Ba-140	–	–	–	–	–	–	–
La-140	–	–	–	–	–	–	–
Ce-141	–	–	–	–	–	–	–
Ce-144	–	–	–	–	–	–	–
Hg-203	–	–	–	–	–	–	–



Tabela 1.5: Značilnosti referenčne osebe in maksimalno izpostavljenega posameznika za Slovenijo, uporabljene v metodologiji

	Referenčna oseba (povprečne navade)	Maksimalno izpostavljeni posameznik
Čas, ki ga ribič preživi na bregu	200 h	500 h
Čas, ki ga ob ribiču preživi njegov otrok (10 let)	100 h	250 h
Letna poraba rib iz Save – ribič	10 kg	45 kg
Letna poraba rib iz Save – otrok (10 let)	3 kg	10 kg
Letna poraba rib iz Save – dojenček (1 leto)	0 kg	0 kg
Velikost referenčne (kritične) skupine	36 ljudi	–

Tabela 1.6: Ocenjena učinkovita letna doza posameznika iz prebivalstva v Brežicah, pri čemer upoštevamo maksimalno izpostavljenega posameznika (ekstremna poraba) v letu 2023

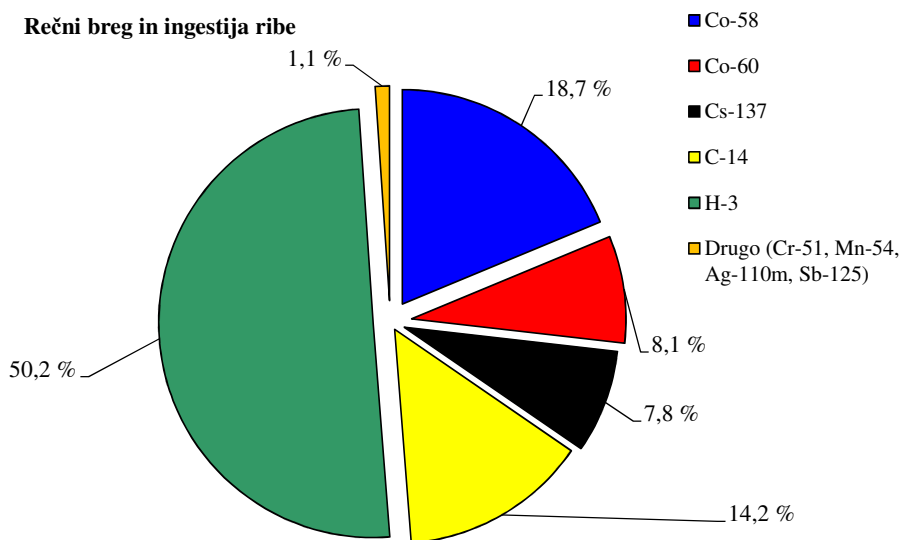
Lokacija	Brežice
Prenosne poti	Rečni breg in uživanje rib (zelo verjetna prenosna pot)
Starostna skupina referenčne osebe	Letna učinkovita doza (μSv)
odrasli (> 17 let)	0,0029 μSv Prispevek zunanjega sevanja: 0,008 μSv Prispevek zaužitja rib: 0,0021 μSv
otroci (od 7 do 12 let)	0,0010 μSv Prispevek zunanjega sevanja: 0,0004 μSv Prispevek uživanja rib: 0,0006 μSv
dojenčki (1 leto)	0 μSv

Tabela 1.7: Ocenjena učinkovita letna doza posameznika iz prebivalstva na lokaciji 350 m pod jezom v letu 2023, pri čemer upoštevamo maksimalno izpostavljenega posameznika (ekstremna poraba)

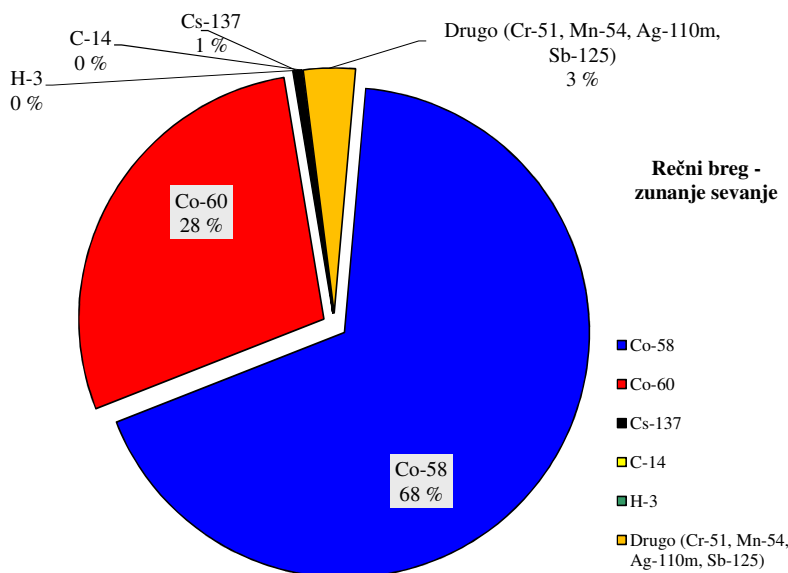
Lokacija	350 m pod jezom NEK
Prenosne poti	Rečni breg in uživanje rib
Starostna skupina	Letna učinkovita doza (μSv)
odrasli (> 17 let)	0,0061 μSv Prispevek zunanjega sevanja: 0,0016 μSv Prispevek zaužitja rib: 0,0045 μSv
otroci (od 7 do 12 let)	0,0021 μSv Prispevek zunanjega sevanja: 0,0008 μSv Prispevek uživanja rib: 0,0013 μSv
dojenčki (1 leto)	0 μSv



Na slikah 1.11 in 1.12 so deleži prispevkov posameznih radionuklidov, ki največ prispevajo k prejeti dozi pri zelo verjetni prenosni poti (zadrževanje na rečnem bregu in uživanje rib). H-3 največ prispeva k celotni dozi iz vseh prispevkov (50,2 %, dominanten je pri dozi zaradi zaužitja rib (68 %)). V prispevku zadrževanja na bregu je praktično celotna obremenitev zaradi Co-58 in Co-60, in sicer 96 %. V prispevku pitja savske vode, ki je malo verjetna prenosna pot, postane dominantni prispevek H-3 skoraj 100 % in bi bila prejeta efektivna doza odraslega 350 m pod jezom NEK 0,051 μ Sv.



Slika 1.11: Prispevki posameznih radionuklidov k skupni dozi (zadrževanje na rečnem bregu in zaužitje rib na lokaciji 350 m nizvodno od NEK) v letu 2023. Največ prispeva H-3.



Slika 1.12: Prispevki posameznih radionuklidov k zunanji dozi pri zadrževanju na rečnem bregu 350 m nizvodno od NEK v letu 2023. Največ prispevata Co-58 in Co-60.



Tridimenzionalni (novi) model

V letu 2017 je bila zgrajena HE Brežice, ki je s svojim jezom in pretočno akumulacijo močno spremenila hidrodinamske razmere v Savi nizvodno od jedrske elektrarne Krško. Zaradi tega metodologija in model za oceno doz pri izpostavitvi prebivalcev, ki sta bila izdelana v letu 2003 [27] in revidirana v letu 2009 [28], nista bila več ustrezna. Za primerjavo je podana tudi ocena učinkov izračunana po novi metodologiji.

V začetku leta 2023 je bil zaključen projekt izdelave nove programske opreme DOSENEK [34]. Ta omogoča izračun ocene doz, ki temelji na novih hidrodinamskih razmerah v reki. Prvi korak k vzpostavitvi nove metodologije so bila modeliranja širjenja efluentov v reki, ki so bila opravljena s preizkušenim in uveljavljenim modelom PCFLOW3D ([31], [32], [33]). S pomočjo računalniških simulacij širjenja izpustov pri različnih pretokih Save so bili določeni razredčitveni koeficienti pri sedmih različnih točkah nizvodno od jezua NEK:

- T1: 350 m nizvodno od jezua NEK, levi breg
- T3: dodatna lokacija 1, levi breg, 4 km od jezua NEK
- T4: levi breg pretočne akumulacije HE Brežice, 4,5 km od jezua NEK
- T5: dodatna lokacija 2, levi breg, 5,5 km od jezua NEK
- T6: desni breg pretočne akumulacije HE Brežice, 5,5 km od jezua NEK
- T7: nad jezum HE Brežice

Za izračun efektivnih doz za referenčno osebo na posamični lokaciji za različne starostne skupine iz prebivalstva v programu DOSENEK moramo med drugim vnesti podatke o izpustih:

- datum ter čas začetka in konca izpusta – trajanje izpusta (h)
- izpuščen radionuklid in njegova aktivnost (Bq)
- prostornina izpuščenih odpadnih vod (m³)
- pretok reke Save na dan izpusta (m³/s)

Tabela 1.8: Značilnosti referenčne osebe na posamični lokaciji v pretočni akumulaciji HE Brežice, uporabljene v metodologiji za oceno letne efektivne doze [93]. Vse količine so za obdobje enega leta.

		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Čas zadrževanja na bregu (h)	Dojenček	0	10	10	10	10	10	0
	Otrok	0	100	100	100	100	100	0
	Odrasli	0	200	200	200	200	200	0
Količina zaužitih rib (kg)	Dojenček	0	0	0	0	0	0	0
	Otrok	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
	Odrasli	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
Količina popite vode ob plavanju (m ³)	Dojenček	0	0	1,0E-06	1,0E-06	1,0E-06	1,0E-06	0
	Otrok	0	0	2,4E-04	2,4E-04	2,4E-04	2,4E-04	0
	Odrasli	0	0	1,9E-04	1,9E-04	1,9E-04	1,9E-04	0
Čas plavanja v reki (h)	Dojenček	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0
	Otrok	0	0	6	6	6	6	0
	Odrasli	0	0	12	12	12	12	0
Čas čolnarjenja v reki (h)	Dojenček	1	1	1	1	1	1	0
	Otrok	60	60	60	60	60	60	0
	Odrasli	120	120	120	120	120	120	0

Ob vsakem izpustu radioaktivnih snovi iz elektrarne se na posamični točki nizvodno od NEK koncentracija



radionuklida v vodi najprej poveča, doseže maksimalno vrednost in nato pade. S pomočjo računalniških simulacij dobimo razredčitvene koeficiente, iz katerih izračunamo maksimalne koncentracije v reki za vsak izpust, poleg tega pa določimo tudi učinkoviti čas zadrževanja izpusta na določeni merilni točki. Iz teh podatkov lahko za vsako točko T1–T7 in za vsak radionuklid določimo povprečno mesečno koncentracijo v reki, natančneje prirastek k koncentraciji, ki je posledica izpustov iz NEK.

Iz teh podatkov lahko ocenimo učinkovite doze na referenčne osebe in živali. V programu DOSENEK so tri starostne skupine referenčnih oseb: dojenček (< 1 leto), otrok (med 7 in 12 let) in odrasla oseba (> 17 let). Za navedene osebe so bile prepoznane naslednje možne prenosne poti: zadrževanje na rečnem bregu, plavanje v reki, čolnarjenje, uživanje rib in nenamerno pitje vode ob plavanju. Za vsako referenčno osebo so za posamezne točke T1–T7 določene značilnosti, oziroma tipični parametri vedenja, ki vplivajo na prejeto dozo: čas zadrževanja na bregu, čas plavanja v reki, čas čolnarjenja v reki, količina zaužitih rib in količina (nenamerno) popite vode ob plavanju v reki. Vsi ti parametri so bili za vse točke T1–T7 in vse referenčne osebe ocenjeni na letni ravni, torej npr. letna količina zaužitih rib referenčne odrasle osebe na točki T2. Lastnosti referenčnih oseb za posamezne točke T1–T7 so predstavljene v tabeli 1.8.

Iz izračunanih povprečnih mesečnih koncentracij radionuklidov na posameznih točkah T1–T7 in ocenjenih značilnosti referenčnih oseb (tabela 1.8) se nato v skladu z metodologijo ocenijo prejete doze posameznih oseb na posameznih točkah v danem mesecu. Program ločeno poda učinkovite doze, ki so posledica posamičnih izpuščenih radionuklidov.

Dodatno program omogoča izračun hitrosti absorbirane doze na bioto [93]. Referenčna organizma sta postrv (ves čas plava v reki) in žarkoplavutarice (pol časa plava v vodi, pol časa pa na meji med talnim sedimentom in vodo). Ocenjene hitrosti absorbirane doze za obe vrsti rib smo primerjali z izpeljanimi referenčnimi ravnmi, ki so v tabeli 6.2 v publikaciji ICRP [94]. Hitrosti absorbirane doze za postrv in žarkoplavutarico (mrena, linj, krap, som) so za vse lokacije v pretočni akumulaciji HE Brežice nizke in predstavljajo naravno ozadje. Več o računalniških modelih, načinu izračuna povprečnih mesečnih koncentracij radionuklidov in izračunu doz po posameznih prenosnih poteh je v dokumentu *Program za računanje učinkovnih doz zaradi tekočinskih izpustov iz NEK* [93].

Ocenjene letne učinkovite doze za referenčne osebe in živali za točke T1–T7 so navedene v tabeli 1.9. V splošnem so prejete učinkovite doze na točkah blizu NEK večje kot na točkah bližje HE Brežice. To je posledica dejstva, da so pri bolj vzvodnih lokacijah izpusti še slabše premešani z rečno vodo in se zato na teh točkah doseže višja maksimalna koncentracija radionuklidov v vodi. Pri odraslih referenčnih osebah in otrocih je najvišja ocenjena doza pri točki T1 (350 m nizvodno od NEK). Doze v točki T2 (350 m nizvodno) so zgolj nekoliko manjše. Pri točki T2 so koncentracije radionuklidov v vodi sicer nižje kot pri točki T1, vendar pri točki T1 ni predvideno zadrževanje na bregu in plavanje v reki. Pri referenčnih osebah, mlajših od enega leta, so zato največje prejete učinkovite doze pri točki T2.

Tabela 1.9: Ocenjene prejete letne doze referenčnih oseb po starostnih skupinah in dozne hitrosti za vodne organizme za vseh sedem lokacij (T1–T7).

		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Letna učinkovita doza (μSv)	Dojenček	5,2E-09	4,5E-06	3,1E-06	2,8E-06	2,6E-06	2,7E-06	0,0E+00
	Otrok	1,8E-03	1,7E-03	9,8E-04	8,6E-04	8,2E-04	8,5E-04	6,9E-04
	Odrasli	2,9E-03	2,8E-03	1,5E-03	1,3E-03	1,3E-03	1,3E-03	1,1E-03
Hitrost absorbirane doze ($\mu\text{Gy}/\text{dan}$)	Postrv	1,6E-03	1,5E-03	7,9E-04	6,9E-04	6,5E-04	6,8E-04	6,0E-04
	Mrena, linj, krap, som	1,6E-03	1,5E-03	7,9E-04	6,9E-04	6,5E-04	6,8E-04	6,0E-04



Pri referenčnih vodnih organizmih smo predpostavili dve prenosni poti in sicer notranjo in zunanjo dozo. Ker referenčna organizma obe dozi prejmeta ne glede na lokacijo, postrv in žarkoplavutarica največjo dozo prejmeta na točki T1 (točka z najslabše premešanimi izpusti).

Oceno sevalnih učinkov delovanja NEK na prebivalstvo izvajamo pri točki T1, ker se ta ujema z lokacijo, za katero se učinkovita doza izračuna z uporabo veljavnega modela. Za odraslo osebo so v tabelah 1.10 in 1.11 navedene prejete učinkovite doze po posameznih prenosnih poteh za vse radionuklide na točki T1 in T3 v pretočni akumulaciji HE Brežice.

Slika 1.13 prikazuje prejete mesečne učinkovite doze za tri referenčne osebe na lokaciji T3 v letu 2023. Lokacija T3 je izbrana, ker spada med točke z najvišjo prejeto učinkovito dozo, ki jo referenčna oseba prejme po vseh petih prepoznanih prenosnih poteh. Opazimo lahko, da meseca september in oktober glede prejete doze močno odstopata. V oktobru je potekal izredni remont NEK, zaradi česar je prišlo do povečanih izpustov v reko.

Slika 1.14 prikazuje deleže prejetih doz glede na radionuklid za vse referenčne osebe in organizme na lokaciji T3. Opazimo, da pri dojenčku prevladuje doza zaradi Co-58, Co-60 in H-3, pri otroku in odrasli osebi doza zaradi H-3 ter deloma C-14 in Cs-137, pri ribah pa skoraj izključno tritij H-3.

Prikazani deleži so v tesni odvisnosti z deleži po prenosnih poteh, ki jih prikazuje slika 1.15. Na tem grafu manjkata prikaza za ribi, saj je v njunem primeru notranja doza za štiri velikostne rede večja od zunanje doze. Opazimo, da otrok in odrasla oseba dozo prejmeta predvsem preko uživanja rib. Ker za dojenčka ni predvideno prehranjevanje z ribami (tabela 1.8), je v njegovem primeru večina prejete doze posledica zadrževanja na rečnem bregu, eno petino doze pa prejme zaradi zaužitja rečne vode. Delež prejete doze zaradi ostalih dveh prenosnih poti (plavanje in čolnarjenje) je pri vseh treh referenčnih osebah manjši od 1 %.

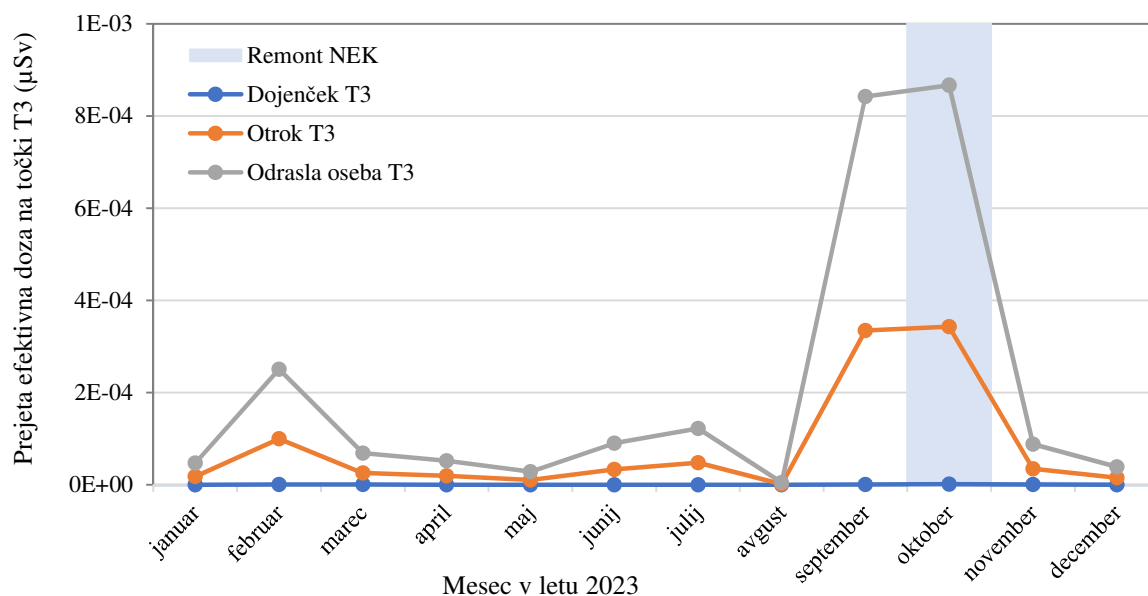
Tabela 1.10: Povprečne letne koncentracije radionuklidov (Bq/m^3) in letne prejete doze (μSv) za odraslo osebo po prenosnih poteh na točki T1 v pretočni akumulaciji HE Brežice. Najvišje doze pri vsaki prenosni poti so zapisane krepko.

Radionuklid	Povprečna koncentracija aktivnosti v letu	Rečni breg	Zaužitje ribe	Zaužitje vode	Plavanje	Čolnarjenje	Skupna doza (radionuklid)
	(Bq/m^3)						
H-3	2,0E+04	0,0E+00	2,3E-03	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,3E-03
C-14	2,9E-02	0,0E+00	2,4E-04	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,4E-04
Mn-54	1,1E-03	0,0E+00	3,0E-07	0,0E+00	0,0E+00	1,7E-08	3,1E-07
Fe-55	2,4E-03	0,0E+00	7,1E-07	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	7,1E-07
Co-58	5,3E-03	0,0E+00	3,9E-06	0,0E+00	0,0E+00	1,9E-07	4,1E-06
Co-60	2,2E-03	0,0E+00	7,5E-06	0,0E+00	0,0E+00	2,0E-07	7,7E-06
Sr-90	3,1E-03	0,0E+00	3,1E-05	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	3,1E-05
Ag-110m	1,9E-03	0,0E+00	8,0E-08	0,0E+00	0,0E+00	1,8E-07	2,6E-07
I-131	1,1E-03	0,0E+00	1,6E-06	0,0E+00	0,0E+00	4,3E-09	1,6E-06
Cs-137	1,6E-03	0,0E+00	2,5E-04	0,0E+00	0,0E+00	3,3E-08	2,5E-04
Skupna doza (prenosna pot)		0,0E+00	2,9E-03	0,0E+00	0,0E+00	6,2E-07	2,9E-03



Tabela 1.11: Povprečne letne koncentracije radionuklidov (Bq/m^3) in letne prejete efektivne doze za odraslo osebo (μSv) po vseh petih prenosnih poteh na točki T3. Najvišje efektivne doze pri vsaki prenosni poti so zapisane krepko.

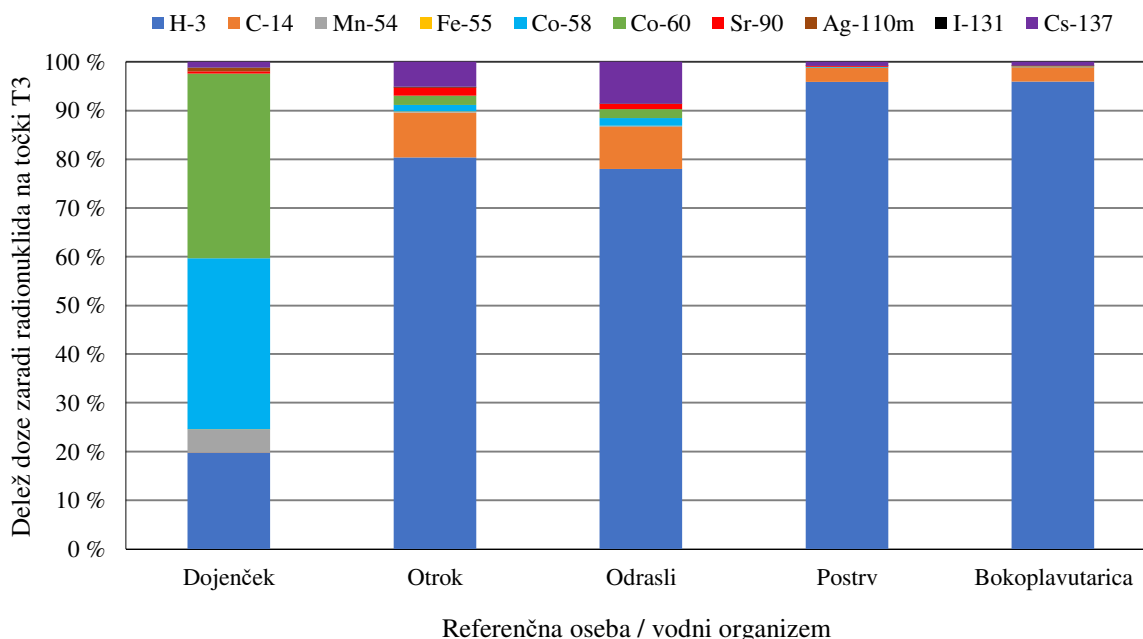
Radionuklid	Povprečna koncentracija aktivnosti v letu	Rečni breg	Zaužitje ribe	Zaužitje vode	Plavanje	Čolnarjenje	Skupna doza (radionuklid)
	(Bq/m^3)	(μSv)	(μSv)	(μSv)	(μSv)	(μSv)	(μSv)
H-3	9,7E+03	0,0E+00	1,1E-03	3,3E-05	0,0E+00	0,0E+00	1,2E-03
C-14	1,6E-02	3,9E-10	1,3E-04	1,7E-09	3,0E-13	0,0E+00	1,3E-04
Mn-54	2,9E-04	3,0E-06	1,6E-07	3,9E-11	1,1E-09	8,8E-09	3,1E-06
Fe-55	1,3E-03	0,0E+00	3,8E-07	8,2E-11	0,0E+00	0,0E+00	3,8E-07
Co-58	2,7E-03	2,2E-05	2,0E-06	3,8E-10	1,2E-08	9,5E-08	2,4E-05
Co-60	1,2E-03	2,4E-05	3,9E-06	7,4E-10	1,4E-08	1,0E-07	2,8E-05
Sr-90	1,6E-03	2,7E-07	1,6E-05	8,3E-09	9,8E-13	0,0E+00	1,6E-05
Ag-110m	1,0E-03	4,6E-07	4,2E-08	5,3E-10	1,3E-08	9,6E-08	6,1E-07
I-131	1,4E-04	1,4E-08	8,1E-07	5,9E-10	2,4E-10	2,2E-09	8,3E-07
Cs-137	8,3E-04	7,4E-07	1,3E-04	2,0E-09	2,2E-09	1,7E-08	1,3E-04
Skupna doza (prenosna pot)		5,0E-05	1,4E-03	3,3E-05	4,2E-08	3,2E-07	1,5E-03



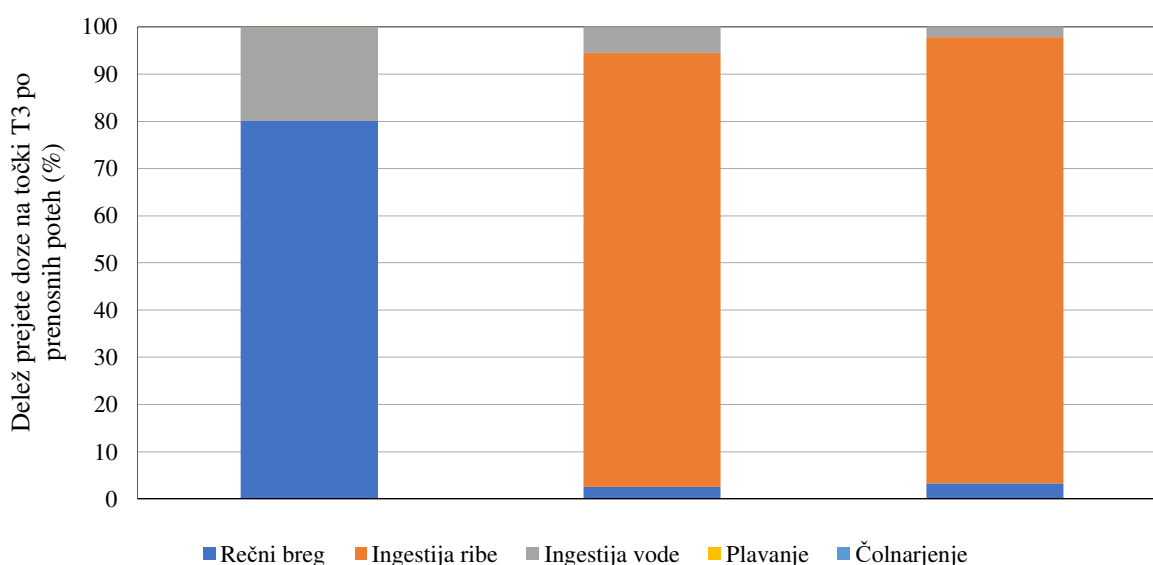
Slika 1.13: Prikaz mesečnih prejetih efektivnih doz referenčne osebe po starostnih skupinah (dojenček, otrok in odrasla oseba) na lokaciji T3 v letu 2023. Močno je opazen vpliv izrednega remonta NEK, v času katerega so bile izpuščene aktivnosti radionuklidov višje kot sicer.



V novem modelu so pri simulaciji tokov zajete samo točke T1–T7, ki so med NEK in HE Brežice. Za lokaciji Brežice in Jesenice na Dolenjskem torej v novi metodologiji nimamo določenih razredčitvenih koeficientov. Računanje doz bi sicer lahko opravili iz rezultatov meritev radioaktivnosti vzorcev, vendar lahko to naredimo neposredno le za tritij, za katerega lahko merimo prirastek h koncentraciji, ki je posledica NEK (slika 1.6). Posredno lahko iz izmerjenih koncentracij tritija izračunamo faktor razredčitve radioaktivnih snovi od HE Brežice do Brežic oziroma do Jesenic na Dolenjskem in grobo predpostavimo, da so za isti faktor manjše tudi prejete doze.



Slika 1.14: Deleži prejetih doz (glede na celotno prejeto letno dozo) po posameznih radionuklidih za referenčno osebo in vodna organizma na lokaciji T3. Pri referenčni osebi/organizmih se deleži močno razlikujejo, kar je posledica različnih navad oziroma značilnosti oseb in organizmov iz tabele 1.8.



Slika 1.15: Deleži prejetih učinkovitih doz (glede na celotno letno prejeto dozo) po posameznih prenosnih poteh na lokaciji T3 za referenčno osebo po starostnih skupinah. Pri referenčnih organizmih (ribah) je učinkovita doza zaradi notranje obsevanosti za 4 velikostne rede višja od doze zaradi zunanje obsevanosti.



Za oceno prejetih doz referenčnih oseb na teh točkah lahko predpostavljamo, da so lastnosti teh oseb na lokacijah Brežice in Jesenice na Dolenjskem enake kot za osebe na lokacijah T3–T6. S tem zajamemo vseh pet prenosnih poti. Za potrebe računanja predpostavimo, da za točke T3–T6 ter lokaciji Brežice in Jesenice na Dolenjskem velja, da je razmerje med povprečnimi izmerjenimi koncentracijami tritija enako razmerju ocenjenih prejetih doz.

Povprečne koncentracije tritija na lokacijah nad jezom HE Brežice, v Brežicah in v Jesenicah na Dolenjskem so bile v letu 2023 $1,83 \text{ kBq/m}^3$, $3,39 \text{ kBq/m}^3$ in $2,21 \text{ kBq/m}^3$. Če od teh koncentracij odštejemo še ozadje (povprečno meritev na referenčni točki v Krškem, $0,56 \text{ kBq/m}^3$), dobimo naslednje povprečne prirastke h koncentraciji aktivnosti tritija: $1,27 \text{ kBq/m}^3$ (nad jezom HE Brežice), $2,83 \text{ kBq/m}^3$ (Brežice) in $1,65 \text{ kBq/m}^3$ (Jesenice na Dolenjskem). Iz tega sledi, da je razredčitveni koeficient od lokacije nad jezom HE Brežice do lokacije Brežice enak 2,24, razredčitveni koeficient od lokacije nad jezom HE Brežice do lokacije Jesenice na Dolenjskem pa 1,30. Če prejete doze za lokacijo nad jezom HE Brežice množimo z naštetimi koeficienti, dobimo grobo oceno za prejete doze na preostalih dveh lokacijah.

Točka nad jezom HE Brežice dejansko sovпада s točko T7, vendar ta točka ne zajema vseh petih prenosnih poti, zato za prejeto dozo referenčnih oseb nad HE Brežice konservativno vzamemo kar povprečje na lokacijah T3–T6. To za dojenčka znaša $2,82\text{E}-06 \text{ } \mu\text{Sv}$, za otroka $8,78\text{E}-04 \text{ } \mu\text{Sv}$ in za odraslo osebo $1,36\text{E}-03 \text{ } \mu\text{Sv}$. Grobo ocenjene prejete doze na lokacijah Brežice in Jesenice na Dolenjskem za tri referenčne osebe v letu 2023 prikazuje tabela 1.12.

Tabela 1.12: Ocene prejetih efektivnih doz za referenčno osebo po starostnih skupinah (dojenček, otrok, odrasla oseba) na lokacijah Brežice in Jesenice na Dolenjskem v letu 2023. Vrednosti so podane v enotah μSv .

Lokacija	Brežice	Jesenice na Dolenjskem
Starostna skupina	Efektivna doza (μSv)	
Dojenček	$6,3\text{E}-06$	$3,7\text{E}-06$
Otrok	$2,0\text{E}-03$	$1,1\text{E}-03$
Odrasla oseba	$3,0\text{E}-03$	$1,8\text{E}-03$

Ocenjene prejete doze so za lokaciji Brežice in Jesenice na Dolenjskem višje kot za lokacijo nad jezom HE Brežice. To je posledica nepričakovanih rezultatov meritev, ki so bili v letu 2023 na nizvodnih lokacijah višji kot na lokaciji na jezom HE Brežice. Pričakovali bi, da se bo voda do Jesenic na Dolenjskem dodatno premešala in razredčila s pritokom Krke, s tem pa bi morale biti koncentracije tritija nižje kot nad jezom HE Brežice. Zaenkrat za opažen pojav nimamo ustrezne razlage. Pri prejetih dozah v tabeli 1.12 gre za grobe ocene.

Če primerjamo izračunane efektivne doze za referenčno osebo, ki se zadržuje 350 m nizvodno od jezua NEK, po različnih modelih ugotovimo, da je efektivna doza za odraslo osebo po veljavnem modelu približno dvakrat višja kot z uporabo novega modela. Razliko pripisujemo bolj realni porabi, ki jo upoštevamo v računih pri novem modelu. Prav tako pri starem enodimenzionalnem modelu upoštevamo konzervativne predpostavke, kar zvišuje ocenjeno vrednost. Pri otroku je ujemanje boljše, prejeti dozi, ocenjeni s starim in novim modelom se razlikujeta za manj kot 20 %.



SKLEPI

Tritij je edini radionuklid v okolju, ki ga lahko sistematično merimo v savski rečni vodi in je zagotovo vsaj delno posledica izpustov NEK. Tekočinski izpusti tritija v reko Savo so bili v letu 2023 precej nižji, kot v letu prej in primerljivi z dolgoletnim povprečjem. Povprečne letne koncentracije aktivnosti H-3 v vodi so na vseh odvzemnih mestih nekaj kBq/m³ (1,8–3,4 kBq/m³), kar je do 6-krat več od običajnega ozadja (okrog 0,6 kBq/m³). Izmerjene koncentracije so precej nižje od tistih v letu 2022, kar je najverjetneje posledica manjšega skupnega izpusta in večje vodnatosti reke Save v letu 2023. Tritij in Co-58 sta glede na prispevek k prejeti dozi referenčnih oseb prevladujoča radionuklida. Sledijo še Co-60, C-14 in Cs-137.

Učinek delovanja NEK zaradi izpustov drugih umetnih radionuklidov v reko Savo je v okolju zanemarljiv in tudi večinoma nemerljiv, saj so prispevki neločljivi od njihovih siceršnjih vrednosti v okolju (naravni vir, globalna kontaminacija). Iz podatkov o količini izpustov iz NEK in modelske ocene bi morali v okoljskih vzorcih takoj za tritijem zaznati C-14, Cs-137, Co-58, Co-60 in Ag-110m. Aktivnost naštetih radionuklidov v izpustih je šest do sedem velikostnih redov nižja od H-3. Izpusti Sr-90 pa so bili še bistveno nižji (osem redov velikosti).

Radionuklida C-14 zaradi razredčitve v Savi in glede na njegovo prisotnost v okolju navadno ne moremo ločiti od naravnega ozadja. C-14 je bil merjen v savski vodi in ribah. Izmerjene specifične aktivnosti v vzorcih so enake značilnim okoljskim vrednostim. Prispevek C-14 iz tekočinskih izpustov iz NEK smo ocenili iz meritev v četrletnih vzorcih WMT, ki jih je opravil IRB.

V letu 2023 je bil I-131, v nasprotju s prejšnjimi leti, zaznan v izpustih NEK, redno pa ga opazimo v vzorcih savske vode, tako na referenčni lokaciji nad NEK kot tudi na vseh vzorčevalnih mestih pod NEK. I-131 v okolju je posledica uporabe tega izotopa v terapevtske in diagnostične namene v bolnišnicah.

Kobaltovih izotopov, ki so redno prisotni v izpustih, v okolju v letu 2023 nismo zaznali.

Meritve Cs-137 v vodi so na vseh lokacijah (tudi referenčni) večinoma pod mejo detekcije. Lažje se cezij zazna v rečnih sedimentih. Sr-90 v vodi se sicer pojavlja v nekoliko višjih koncentracijah aktivnosti kot Cs-137, vendar so njegove specifične aktivnosti v sedimentih bistveno nižje kot pri ceziju (blizu meje detekcije). Povečanih koncentracij aktivnosti Sr-90 in Cs-137 v savski vodi nizvodno od NEK, ki bi lahko bile povezane z izpusti NEK, nismo opazili. Spreminjanje specifične aktivnosti Sr-90 in Cs-137 v vzorcih obrežnih sedimentov zelo verjetno ni posledica delovanja NEK, temveč naravnega premikanja sedimentov in morda tudi posegov v okolje zaradi gradnje hidroelektrarn na spodnji Savi.

Ocena učinkov temelji na modelu, ki je bil izdelan v letu 2003 in revidiran v letu 2009. Iz izmerjenih izpustov NEK za leto 2023 in upoštevanja ustreznih razredčitev, ki smo jih uporabili v modelni oceni, lahko sklenemo, da je izračunana letna efektivna doza referenčne osebe, na kateri koli lokaciji nizvodno od NEK zaradi savske prenosne poti zanemarljiva (nižja ali enaka 0,0061 μSv na leto; ocena velja za 350 m nizvodno od jezua NEK). Pri izračunu smo upoštevali maksimalno izpostavljenega posameznika.

Zaradi spremenjenih hidrodinamskih pogojev reke Save po izgradnji pretočne akumulacije HE Brežice je bila izvedena projektna naloga *Vpliv HE Brežice na NEK in Poročilo o vplivih na okolje za podaljšanje obratovalne dobe NEK* [29]. Če za oceno efektivnih doz za referenčne osebe na različnih lokacijah v pretočni akumulaciji HE Brežice in za njo uporabimo novi model, ki je bil dokončno izdelan v letu 2023, ugotovimo, da so izračunane efektivne doze na primerljivih lokacijah (350 m nizvodno od jezua NEK in Brežice) do dvakrat nižje, kot če uporabimo stari veljavni enodimenzionalni model. Razlike nastanejo zaradi konzervativnih predpostavk pri redčenju v savski vodi in porabah ali časih zadrževanj na bregu ali na vodi. Najvišja efektivna doza za odraslo osebo v pretočni akumulaciji, izračunana po novem modelu, je na točki T1 (nižja ali enaka 0,0029 μSv na leto za odraslo osebo oziroma 0,0018 μSv za otroka), oziroma na točki T2 (nižja ali enaka 4,5E-06 μSv za dojenčka – tabeli 1.8 in 1.9). Tudi hitrosti absorbirane doze za postrv in žarkoplavutarico so za vse lokacije v pretočni akumulaciji HE Brežice nizke in predstavljajo naravno ozadje. V poročilu podajamo pregledno tabelo z efektivnimi dozami za odraslo osebo na točki T3 v pretočni akumulaciji. Na tej lokaciji upoštevamo vse možne prenosni poti.



2 RADIOAKTIVNOST V PITNI IN PODZEMNI VODI

POVZETEK

Podzemna voda krško-brežiškega polja se uporablja za pitje, namakanje in druge gospodarske namene. Vir vode so vodonosniki, ki so v večji ali manjši meri povezani s Savo in padavinami. Na podlagi merskih rezultatov v letu 2023 ter na podlagi rezultatov meritev iz preteklih let ugotavljamo učinek izpustov NEK na pitno vodo in podtalnico v občinah Krško in Brežice. V letu 2023 ni bilo sprememb vzorčevalnih mest, zbranih je bilo 156 vzorcev vode na 15 lokacijah: vodovodi in črpališča v Brežicah in Krškem, vrtine znotraj ograje NEK, v neposredni bližini akumulacijskega jezera HE Brežice in na Hrvaškem. Za primerjavo sta bilo analizirana še 2 vzorca na referenčni lokaciji v Ljubljani. V odvzetih vzorcih so bile izmerjene koncentracije aktivnosti naravnih in umetnih radionuklidov. Tako kot v prejšnjih letih sta bila tudi v letu 2023 med umetnimi radionuklidi največkrat zaznana H-3 in Sr-90. Cs-137 je bil večinoma pod mejo kvantifikacije, I-131 in drugi umetni radionuklidi niso bili zaznani v nobenem vzorcu. Iz izmerjenih povprečij mesečnih koncentracij aktivnosti radionuklidov je bila ocenjena letna efektivna doza za tri starostne skupine prebivalstva, ki uporabljajo vodo iz vzorčenih vodovodov in črpališč za pitje. Izračunane letne efektivne doze zaradi prispevka umetnih radionuklidov v pitni vodi so glede na celotno letno dozo zaradi umetnih in naravnih radionuklidov v pitni vodi kvečjemu 0,13 % v brežiškem in 0,88 % v krškem vodovodu, ob tem da NEK ni vir vseh zaznanih umetnih radionuklidov. Na podlagi izračunanih letnih efektivnih doz umetnih in naravnih radionuklidov v vodovodih in črpališčih v okolici NEK lahko trdimo, da je v letu 2023 učinek delovanja NEK na pitno vodo zanemarljivo majhen.

UVOD

Lokacije in obseg vzorčenja pitne vode in podtalnice so določeni v programu nadzora, ki ga pripravi upravni organ (JV10, URSJV) [8]. V letu 2023 ni bila spremenjena nobena lokacija. Vodovod Ljubljana je referenčna lokacija in se redno analizira v okviru republiškega nadzora radioaktivnosti v pitni vodi v Sloveniji [20]. Izračun izpeljanih vrednosti koncentracij (IK) umetnih radionuklidov v pitni vodi je v *Uredbi o mejnih dozah, referenčnih ravneh in radioaktivni kontaminaciji (UV2)* [10] in *Pravilniku o monitoringu radioaktivnosti v pitni vodi* [9]. Z analizami ugotavljamo koncentracije aktivnosti naravnih in umetnih radionuklidov in iz njih sklepamo na morebitni prispevek k celotni letni efektivni dozi prebivalcev zaradi obratovanja NEK. V skladu z zahtevami pravilnika JV10 [8] ovrednotimo sevalne obremenitve za tri starostne skupine, in sicer za dojenčka (do enega leta), otroka (7–10 let) in odraslo osebo, starejšo od 17 let. Pri izračunih upoštevamo dogovorjeno količino zaužite vode iz navedb v priporočilih Svetovne zdravstvene organizacije. Iz izsledkov ankete med prebivalci v okolici NEK je razvidno, da povprečen odrasel prebivalec letno zaužije 0,40 m³ vode. Realne doze so torej lahko tudi do polovice manjše, vendar ohranjamo prvotne izračune zaradi kontinuitete in primerljivosti z drugimi študijami.

Kontrolirani izpusti iz jedrskih in sevalnih objektov ter uporaba virov v medicini so glavni viri antropogenih snovi v okolju in s tem tudi v pitni vodi. V letu 2023 iz sveta ni bilo poročil o jedrskih nezgodah, ki bi lahko vplivale na koncentracijo radioaktivnih snovi v pitni vodi v okolici NEK. Redni nadzor ni zaznal nenavadnih odmkov.

Med radionuklidi umetnega izvora v letu 2023 ni bilo sprememb v primerjavi s prejšnjimi leti: v vodi iz črpališč in vrtin smo poleg tritija izmerili le še Sr-90. I-131 ni bil zaznan v nobenem vzorcu iz črpališč oziroma vrtin. V nekaterih vzorcih je bil zaznan tudi Cs-137, vrednosti so bile največkrat pod mejo kvantifikacije in zato obremenjene z veliko merilno negotovostjo.

NEK stoji tik ob reki Savi in uporablja savsko vodo za hlajenje. Med obratovanjem nadzorovano izpušča nekaj radioaktivnih snovi v reko Savo, ki vsaj delno napaja nekatere podzemne vodonosnike krško-brežiškega polja. Podzemna voda je na tem območju edini vir pitne vode. Savska prenosna pot torej seže tudi do pitne vode, zato je uveden nadzor pitne vode v okolici NEK.



Tritij in C-14 sta naravna in antropogena radionuklida. Nastajata v zgornjih plasteh atmosfere, v nekaterih industrijskih panogah in med proizvodnjo električne energije v jedrskih elektrarnah. Sta edina merjena radionuklida v sklopu merilnega nadzora, ki se redno pojavljata v emisijskih, imisijskih in okoljskih merskih rezultatih. V izpustih NEK poleg H-3 zasledimo tudi merljive količine C-14, v vzorcih vod ga ne ugotavljamo.

Med naravnimi radionuklidi so bili zaznani radionuklidi uranove in torijeve razpadne verige, radioaktivni kalij K-40 ter kozmogeni Be-7, ki nastaja v zemeljski atmosferi in se spira v tla z deževnico. Naravne in umetne radionuklide lahko uporabimo tudi kot sledilce za študije transportnih procesov v naravi. Tritij je poleg C-14 eden najbolj uporabljenih radioaktivnih sledilcev. Tudi drugi radionuklidi so koristni pri opazovanju antropogenih vplivov na okolje. Tako lahko glede na prisotnost K-40 ocenimo obremenjenost okolja zaradi kmetijstva [48]. Kalij je namreč sestavni del umetnih gnojil. Prisotnost kozmogenega Be-7 v vzorcih podzemne vode lahko kaže na mešanje med padavinami in podtalnico oziroma vodo v vodonosniku.

OKOLJSKI VZORCI

Značilnosti vzorčenja

Obseg, način in pogostost vzorčenja ter zahteve za merilne postopke in opremo pri nadzoru določa *Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8]. V prilogi, ki določa zasnovo letnega programa nadzora radioaktivnosti v okolju jedrske elektrarne, so za pitno vodo predpisane kontrolne meritve z visokoločljivostno spektrometrijo gama ter specifični analizi vsebnosti stroncija Sr-89/Sr-90 in tritija H-3.

Vzorčenje vodovodov, črpališč in podtalnice (vrtine) je v letu 2023 potekalo v skladu s *Pravilnikom o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* in *Radiological Effluent Technical Specifications (RETS), NEK-RETS, Rev. 11* na naslednjih lokacijah:

1. Mesečni sestavljeni vzorci črpališč in vodovodov:

- črpališče Brege, desni breg Save, 1,4 km od jeza NEK, 1,1 km od Save;
- črpališče Rore, desni breg Save, 1 km od Save, vzvodno od NEK;
- vodovod Spodnji Stari Grad, levi breg Save, 2,8 km od Save;
- vodovod Brežice, levi breg Save, 2,5 km od Save;
- črpališče Brežice – Glogov Brod, levi breg Save, 3,2 km od Save; VT-1 in VT-2, globina 200 m.

2. Posamični četrtletni vzorci:

- vodovod Krško (bencinski servis Petrol, Krško), levi breg Save;
- vodovod Brežice (bencinski servis Petrol, Brežice), desni breg Save;
- vrtina E1 znotraj vzhodne ograje NEK, levi breg Save.

3. Posamični mesečni vzorci:

- vrtina VOP-4, levi breg Save, približno 600 m nizvodno od jezua NEK in približno 50 m od struge Save (samo analiza tritija);
- vrtina VOP-1/06, levi breg Save, približno 400 m nizvodno od jezua NEK in približno 700 m od struge Save (samo analiza tritija);
- vrtina V-7/77, levi breg Save, približno 3 km nizvodno od jezua NEK in približno 600 m od struge Save (samo analiza tritija);
- vrtina V-12/77, desni breg Save, približno 3,4 km nizvodno od jezua NEK in približno 300 m od struge Save (samo analiza tritija);
- vrtina Medsave, Republika Hrvaška, desni breg Save, 23 km od NEK, 0,1 km od Save, kontrolna točka med Savo in črpališči na Hrvaškem;
- vrtina Šibice, Republika Hrvaška, levi breg Save, 22 km od NEK, 2 km od Save, globina vrtine 10–15 m;
- vrtina Petruševac, Republika Hrvaška, levi breg Save, 60 km od NEK, 1 km od Save, globina vrtine 80 m.

4. Posamično letno vzorčenje na referenčni lokaciji

- vodovod Ljubljana: Osrednjeslovenska regija, republiški nadzor radioaktivnosti pitne vode [20].



V črpališčih Brege, Rore, Brežice – Glogov Brod in na odzemnem mestu vodovoda Spodnji Stari Grad so nameščeni avtomatski vzorčevalniki. Ti na vsake tri ure dodajo približno 190 mL vzorca pitne vode v 50-litrski sod. Tako dobimo povprečno mešanico vzorca pitne vode za celotno mesečno obdobje. Dnevni nadzor opravljajo nadzorniki črpališč ali uporabniki pitne vode. Na enem vzorčevalnem mestu pri uporabnikih (vodovod Brežice) se vzorčenje izvaja ročno, enkrat dnevno po 1,5 L vode. Na bencinskih servisih in iz vrtine E1 se odvzame posamični vzorec četrtletno. Iz vrtine VOP-4 se jemlje posamični mesečni vzorec na začetku tekočega meseca, enkrat mesečno so vzorčene tudi preostale tri vrtine v bližini NEK, na katerih se opravlja samo analiza tritija. Vzorčenje na Hrvaškem se opravlja na treh vzorčevalnih mestih v bližini Zagreba. Posamična mesečna vzorčenja na začetku meseca in spektroskopske analize opravijo na IRB. Rezultate z vseh treh hrvaških vzorčevalnih mest obravnavamo kot podtalnico.

Značilnosti meritev okoljskih vzorcev

Za ugotavljanje koncentracij aktivnosti umetnih in naravnih radionuklidov v okviru merilnega nadzora uporabljamo tri merske metode: visokoločljivostno spektrometrijo gama, tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo po elektrolitski obogatitvi vzorcev s tritijem in radiokemijsko metodo za ugotavljanje Sr-90.

Kot določa *Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8], so metode vzorčenja, priprave vzorcev in meritev izbrane tako, da je detekcijska meja za posamezne radionuklide praviloma pod tridesetino mejnih vrednosti kontaminacije za pitno vodo. Metode vzorčenja, meritev in analiz so podrobno opisane v naslednjih dokumentih izvajalcev meritev na IJS: *Zbiranje vzorcev pitnih, površinskih in podtalnih vod (LMR-DN-05)*, *Priprava sušine vzorcev vod (LMR-DN-06)*, *Visokoločljivostna spektrometrija gama v laboratoriju (LMR-DN-10)*, *Določanje stroncija z beta štetjem (SDN-O2-STC(01))*, *Vzorčenje in priprava vzorcev za ugotavljanje tritija (LSC-DN-06)*, *Analiza in izračun vsebnosti tritija (LSC-DN-07)* in *Določanje tritija s tekočinskim scintilacijskim štetjem (SDN-O2-STC(02))*.

Pitna voda na vplivnem območju NEK in referenčnih lokacijah

Podjetje Kostak [50] upravlja s 13 vodnimi viri v 9 vodovodnih sistemih v občinah Krško in Kostanjevica ob Krki. V vodovodni sistem Krško sta redno vključena dva vodna vira; vodnjak Brege in vodarna Rore s tremi vrtinami. Tretji vir, vodnjak Drnovo, je samo občasen in rezervni vir pitne vode zaradi nekoliko višjih vrednosti pesticidov, njihovih metabolnih produktov in nitratov v bližnji preteklosti.

Oskrbo s pitno vodo v občini Brežice zagotavlja podjetje Komunala Brežice in je zasnovana na 7 javnih vodovodnih sistemih. Vodovodni sistem Brežice napaja šest zajetij: vodnjaka Glogov Brod in Brezina, dve vrtini Prilipe in dve zajetji oziroma izvira, Novašček in Arnovo selo (Brezovec) [51]. Vrtini in vodnjaka zagotavljajo skoraj 98 % pitne vode, od tega dobro polovico, skoraj 52 % celote, vodnjak Glogov Brod.

Centralni vodovodni sistem Ljubljana sestavlja pet vodarn s 44 črpališči, področje je razdeljeno na devet vodooskrbnih območij [52].

V vseh vodovodnih sistemih izvajajo nadzor pitnih vod po ustaljenih postopkih na osnovi načrtov HACCP. Ti vsebujejo mesta vzorčenja, vrsto preskušanj in najmanjšo frekvenco vzorčenja. Le ta se določa na osnovi ocene tveganj za vsako oskrbovalno območje posebej.

V tem poročilu obravnavana oskrbovalna območja se med seboj zelo razlikujejo, število vzorcev in vrst analiz ni primerljivo, prav tako so poročila o kakovosti pitnih vod zelo različno zasnovana. Iz javno dostopnih podatkov lahko razberemo, da so za vodovod Brežice v letu 2023 poročali o 7,22 % neskladnih vzorcih za mikrobiološka preskušanja, vsi vzorci so bili ustrezni na kemijskih preskušanjih. Za vodovoda Krško in Centralni vodovodni sistem Ljubljana v času priprave tega poročila na spletu še ni bilo letnega poročila s podatki za leto 2023.



REZULTATI MERITEV IN TIPIČNI ČASOVNI POTEKI

V tabelah od T-28 do T-36 ter T-V1, T-V2, T-V3, T-V4, T-HE 12, T-HE 13, T-HE 14 v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645, marec 2024*, so na priloženi zgoščenki zbrani merski rezultati koncentracij aktivnosti radionuklidov v vseh zgoraj omenjenih vrtinah, vodovodih in črpališčih.

Tritij (H-3)

Tritij zavzema največji delež aktivnosti plinastih in tekočinskih radioaktivnih izpustov iz NEK, ki lahko vplivajo na stanje v podtalnici. Kemijsko je HTO molekula vode, kar pomeni, da je idealni sledilec za gibanje podzemnih vod.

Na sliki 2.1 so prikazane koncentracije aktivnosti H-3 v mesečnih sestavljenih vzorcih vode iz črpališč in vodovodov v okolici NEK. Vodovodne vode krško-brežiškega polja lahko tudi v letu 2023 razdelimo v tri različne razrede. Tudi v letu 2023 so bile najnižje izmerjene vrednosti v vzorcih vod iz Vodovoda Brežice in črpališča Glogov Brod, s povprečno koncentracijo aktivnosti okrog 100 Bq/m^3 , ki je še nekoliko nižja kot v prejšnjih dveh letih. Vsebnost tritija v vzorcih iz črpališča Rore je tudi konstantna, le z nekoliko višjimi koncentracijami aktivnosti, reda velikosti 500 Bq/m^3 . Tritijeve vsebnosti za vodovod Spodnji Stari Grad v letu 2023 so v letu 2023 spremenljive; v prvi polovici leta se koncentracije aktivnosti obnašajo podobno kot vodni vzorci s črpališča Brege, medtem ko so v jesenskih mesecih podobne vrednostim s črpališča Rore. To se je že dogajalo tudi v preteklosti, iz česar sklepamo, da se vodovod Spodnji Stari Grad napaja najmanj iz dveh različnih virov in da razmerje med njimi ni konstantno. Vrednosti za tritij s črpališča Brege so najvišje v okolici NEK in tudi v Sloveniji nasploh, vendar še vedno dosegajo manj kot dva odstotka mejne vrednosti 100 Bq/L^9 , ki je predpisana v *EU direktivi za pitne vode* [43] in *Pravilniku o monitoringu radioaktivnosti v pitni vodi* [9]. V letu 2023 v črpališču Brege opazimo naraščajoče vrednosti preko celega leta. Povprečna vsebnost tritija za črpališče Brege je za tretjino višja kot v letu 2022 in podobnega velikostnega reda kot leta 2020.

Tabela 2.1 Srednja vrednost koncentracije aktivnosti H-3 v črpališčih in vodovodih v okolici NEK za petletno obdobje od leta 2019 do 2023

	2023 (Bq/m ³)	2022 (Bq/m ³)	2021 (Bq/m ³)	2020 (Bq/m ³)	2019 (Bq/m ³)
ČRPALIŠČE BREGE	1559 ± 27	1026 ± 20	1401 ± 37	1473 ± 48	1319 ± 46
ČRPALIŠČE RORE	490 ± 16	491 ± 11	573 ± 16	554 ± 18	620 ± 24
VODOVOD SP. STARI GRAD	927 ± 20	897 ± 17	812 ± 21	1058 ± 35	1177 ± 41
VODOVOD BREŽICE	100 ± 13	104 ± 5	118 ± 6	99 ± 8	77 ± 8
ČRPALIŠČE BREŽICE	113 ± 12	117 ± 5	143 ± 40	114 ± 27	81 ± 18

Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti tritija za mesečne vzorce z neprekinjenim vzorčenjem od leta 2019 do leta 2023 so zbrana v tabeli 2.1. Medtem ko se srednje vrednosti za črpališče Rore, črpališče Glogov Brod in vodovod Brežice v tem obdobju znatno ne spreminjajo, opazimo spremembo srednje vrednosti za črpališče Brege. Vrednosti se v vodovodu Spodnji Stari Grad med letom sicer hitreje spreminjajo, vendar se to na srednji vrednosti niti ne pozna zelo zaznavno.

Poleg rednih mesečnih odvzemov vode na črpališčih in vodovodih v občinah Krško in Brežice je bila tudi v letu 2023 analizirana voda s po štirimi posamičnimi odvzemi na bencinskih servisih Petrol v Krškem in

⁹ Parametrična vrednost je vrednost radioaktivnih snovi v pitni vodi, nad katero organ, pristojen za varstvo pred sevanji, preveri, ali prisotnost radioaktivnih snovi v pitni vodi predstavlja tveganje za zdravje ljudi, na katero se je treba odzvati, ter po potrebi sprejme sanacijske ukrepe za izboljšanje kakovosti vode do take stopnje, da bodo izpolnjene zahteve za varovanje zdravja ljudi z vidika varstva pred sevanjem [9].



v Brežicah. Vrednosti za vodo iz brežiškega vodovoda so nizke; vse štiri izmerjene vrednosti so bile pod mejo detekcije, tako da je ocena koncentracije aktivnosti 50 Bq/m^3 . Ocena je izpeljana po metodologiji, ki je opisana v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS DP 14645*. V vzorcih krškega vodovoda so vrednosti drugega velikostnega reda, v povprečju okrog $(680 \pm 46) \text{ Bq/m}^3$. Ta vrednost je nekoliko višja od lanske povprečne vrednosti (460 Bq/m^3) in gre na račun februarkega vzorca, ko je bila vsebnost tritija ($1270 \pm 120) \text{ Bq/m}^3$. Velikostni red povprečja je še vedno primerljiv s koncentracijo aktivnosti tritija v ljubljanskem vodovodu ($(503 \pm 45) \text{ Bq/m}^3$) in povprečno vrednostjo s črpališča Rore ($490 \pm 16) \text{ Bq/m}^3$. Krški Petrol je v dneh vzorčenja očitno prejel večino vode iz črpališča Rore, razen februarja, ko se vrednost ujema z mesečno koncentracijo aktivnosti, ugotovljeno za črpališče Brege. Ostali trije rezultati za četrletne posamične vzorce (tabeli T-28 in T-29) na obeh vzorčevalnih lokacijah so med seboj statistično primerljivi.

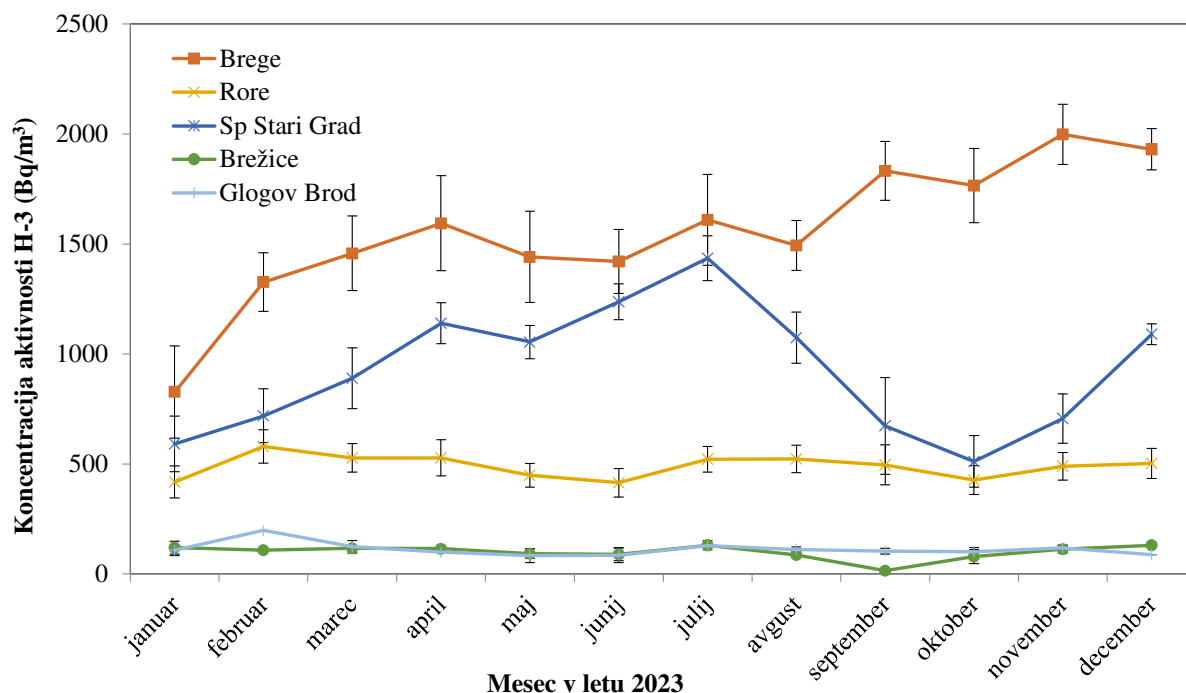
Zaradi izmenjave vode med Savo in podzemno vodo na krško-brežiškem polju se že od začetka obratovalnega merilnega nadzora radioaktivnosti v okolici NEK preverja stanje tritija v vrtinah, kar je namenjeno sledenju izpustov iz NEK. Vrtinama E1 za izključitvenim območjem in VOP-4, ki je le 50 m oddaljena od Save, ter hrvaškima vrtinama Šibice in Medsave so bile sredi leta 2016 dodane še tri vrtine in sicer VOP-1, V-7/77 in V-12/77, v letu 2021 pa še vrtina s črpališča Petruševac v Zagrebu. Mesečne koncentracije aktivnosti so prikazane na sliki 2.2. Rezultate lahko razvrstimo v dve skupini: v prvi skupini so vrtine z rednim mesečnim vzorčenjem VOP-1, V-12/77, Šibice in četrletno vzorčena vrtina E1. Njihove vrednosti so primerljive čez celotno leto 2023, povprečna vrednost je sorazmerno nizka, okrog 1200 Bq/m^3 in je nižja kot v letu 2022 (1300 Bq/m^3). V vrtinah VOP-4, V-7/77, Petruševac in Medsave so v letu 2023 vrednosti do 8-krat višje (v letu 2022 do 34-krat) od vrednosti v vrtinah iz prve skupine. Tudi v letu 2023 opazimo podoben potek vrednosti za vse našete vrtine, zamiki med posameznimi vrhovi so boljše korelirani z razdaljo od Save kot razdaljo od NEK. Vsekakor pa razdalja od reke ni edini parameter, ki vpliva na rezultate. Rezultati za vrtine iz druge skupine so navezani na potek in količino tritija v izpustih. V letu 2023 opazimo pri izpustih dva manjša vrhova v februarju in juliju in en velik ter širok vrh jeseni, od septembra do novembra. Medtem ko vrtina VOP-4 na manjše izpuste takorekoč ne reagira, so le-ti vseeno opazni v vseh drugih vrtinah. Upadanje koncentracij aktivnosti, ki so posledica remontnih izpustov v letu 2022, so v vrtinah Petruševac in V-7/77 vidni globoko v leto 2023, vse do julija oziroma septembra, v nekoliko manjšem obsegu tudi v vrtini VOP-4. V vrtini VOP-4 vzorčimo s krajšo periodo, na 14 dni. Drugo vzorčenje v mesecu, ki poteka že od julija 2016, je še vedno raziskovalne narave, saj ni vključeno v financiranje monitoringa. Iz slike 2.4 jasno vidimo, da bi največji odziv na velik jesenski izpust v letu 2023 bil prezrt, če teh dodatnih vzorčenj ne bi bilo (črtkana črta!).

V poročilu za leto 2022 smo zapisali: »Maksimum koncentracije aktivnosti tritija v vrtini Petruševac, ki bo posledica intenzivnejših izpustov med marcem in septembrom 2022, pričakujemo v začetku leta 2023 in seveda ne bo tako izrazit kot v preostalih treh vrtinah.« Pogled na sliko 2.4 razkrije maksimum koncentracije aktivnosti v tej vrtini v marcu 2023, kar potrjuje lanske napovedi. S pogostejšim vzorčenjem vrtin bi pridobili natančnejše podatke o odzivnih časih vrtin, ki bi posledično pripomogle k boljši oceni hidroloških parametrov, potrebnih za oceno stanja vodonosnikov, ki so vir pitne vode. Delitev vrtin v dve skupini je lepo vidna tudi na sliki 2.3. s prikazom večletnega poteka vsebnosti tritija, kjer vrednosti ostajajo praktično konstantne za vrtine iz prve skupine, medtem ko je za drugo skupino značilen podoben odziv v vseh vrtinah in je lepo viden porast koncentracije aktivnosti v enakomernih razmakih, ki sovpadajo s periodo remontov oziroma večjih izpustov.

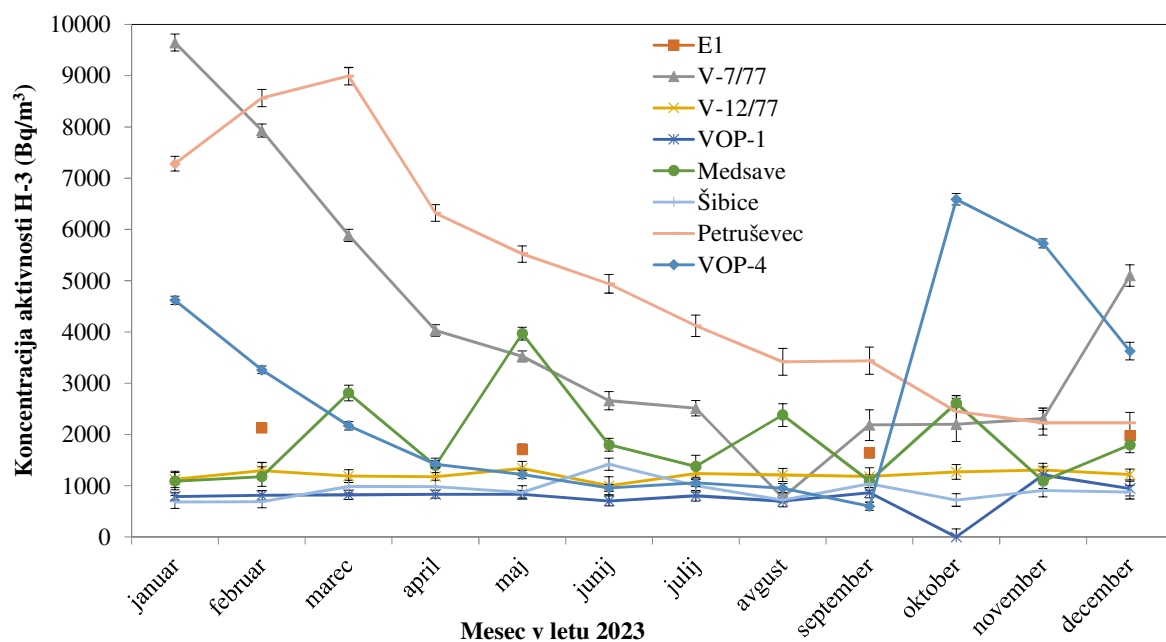
V zadnjih letih se večkrat obregnemo v korelacijo med koncentracijami aktivnosti v nekaterih vrtinah in izpusti predvsem zato, ker je korelacija včasih zelo jasna in nedvoumna, drugič pa je ne moremo potrditi. V poročilu za leto 2020 smo zapisali tezo, da morda tiči razlog v količini in številnosti izpustov – če so izpusti manj aktivni, korelacija s koncentracijami aktivnosti ni tako izrazita. Ob izpustih v letu 2022, ko so bili najvišji v zadnjih dvajsetih letih ($24,3 \text{ TBq}$), pa tudi v 2023, ko je bil letni izpust ($11,7 \text{ TBq}$) blizu dolgoletnemu povprečju ($12,8 \text{ TBq}$), je korelacija izrazita, medtem ko je leta 2020, ko ni bilo remonta in je bilo izpustov občutno manj, le za okoli 3 TBq , praktično ni bilo. Predpostavko, ko smo na podlagi meritev sklepali, da so korelacije tako med izpusti in koncentracijami aktivnosti v Savi najbližjih vrtinah kot med vrtinami iz druge skupine izrazitejša zaradi stabilnejšega vodostaja zaradi hidroelektrarn, moramo dopolniti s pristavkom, da za to obstaja prag aktivnosti, kar smo potrdili z meritvami zadnjih let. Če bi, oziroma odkar raziskovalno vzorčimo vrtino VOP-4 pogosteje, je korelacija lepše vidna. Na sliki 2.3 so prikazani večletni



rezultati za vse vrtnine. Medtem ko je bila korelacija med vrtninama VOP-4 in Medsave od septembra do decembra 2019, od februarja do junija 2021 in od marca do septembra 2022 velika, to ne drži za leto 2020, ko je korelacija med koncentracijami aktivnosti v obeh vrtninah neznatna. Korelacija ni zelo izrazita niti v 2023.



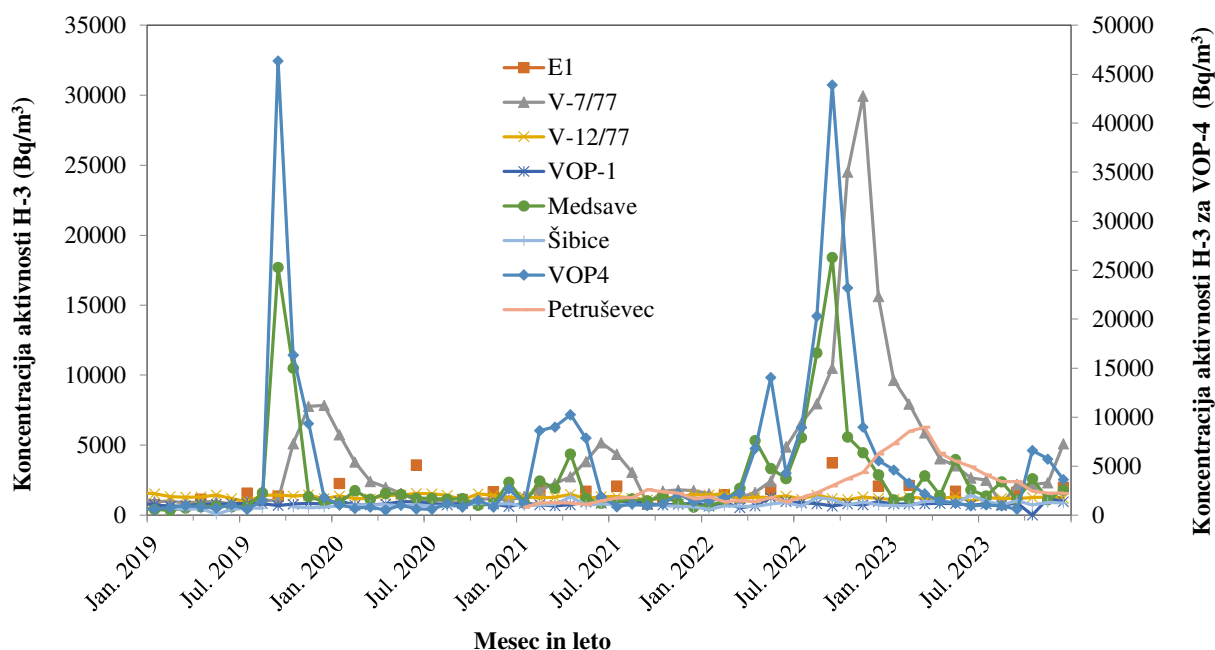
Slika 2.1: Mesečna koncentracija aktivnosti H-3 v vzorcih pitne vode iz črpališč in vodovodov krško – brežiškega polja za leto 2023



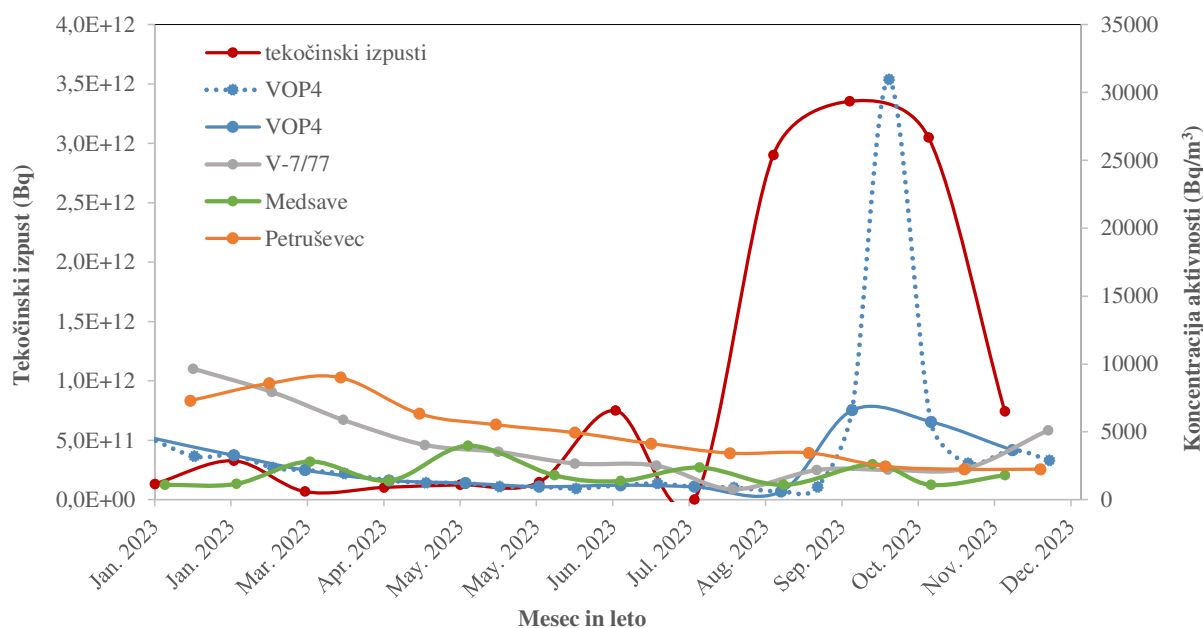
Slika 2.2: Koncentracija aktivnosti H-3 v mesečnih vzorcih vrtin



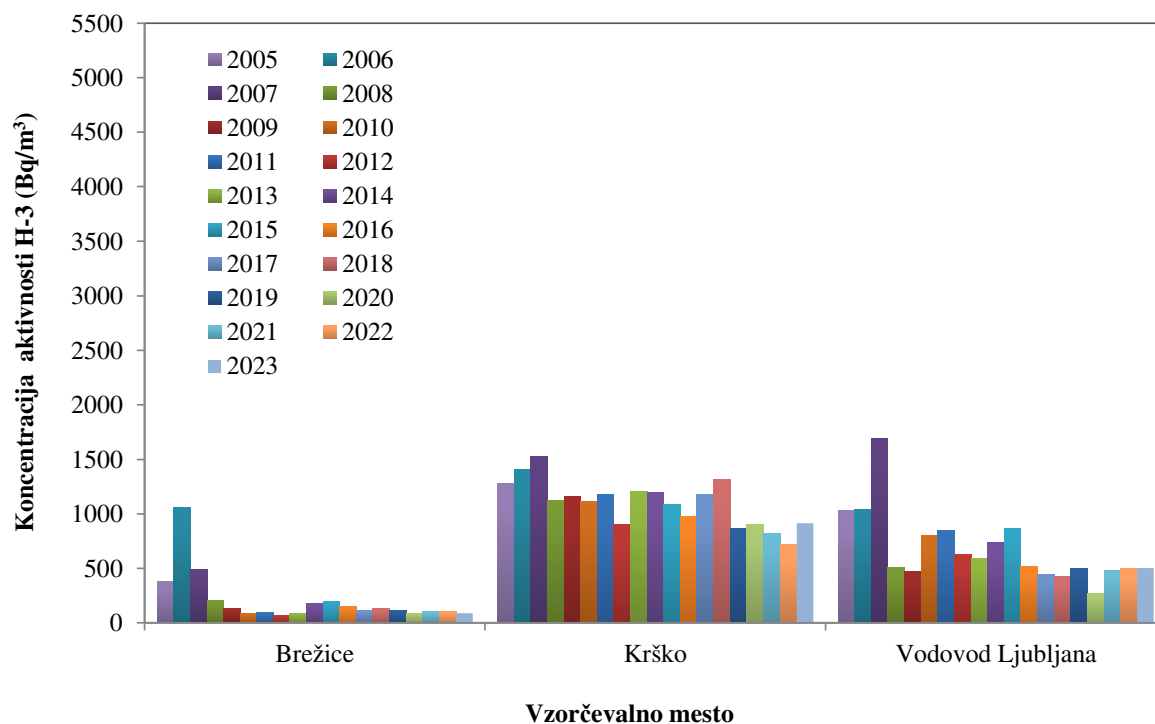
Na sliki 2.4. so prikazani rezultati koncentracije aktivnosti tritija za drugo skupino vrtin in aktivnosti tekočinskih izpustov. Vrednosti za vrtine so rezultati za enkratne mesečne vzorce. Vrtino VOP-4 zaradi želje po boljšem razumevanju hidrogeološke dinamike podzemnih vod in vodonosnikov krško – brežiškega polja vzorčimo pogosteje. Rezultati niso del rednega monitoringa. Na sliki 2.4. vidimo, da se korelacija med izpusti in koncentracijo aktivnosti v vrtini VOP-4 (črtkana črta) bistveno izboljša, če vrtino vzorčimo pogosteje.



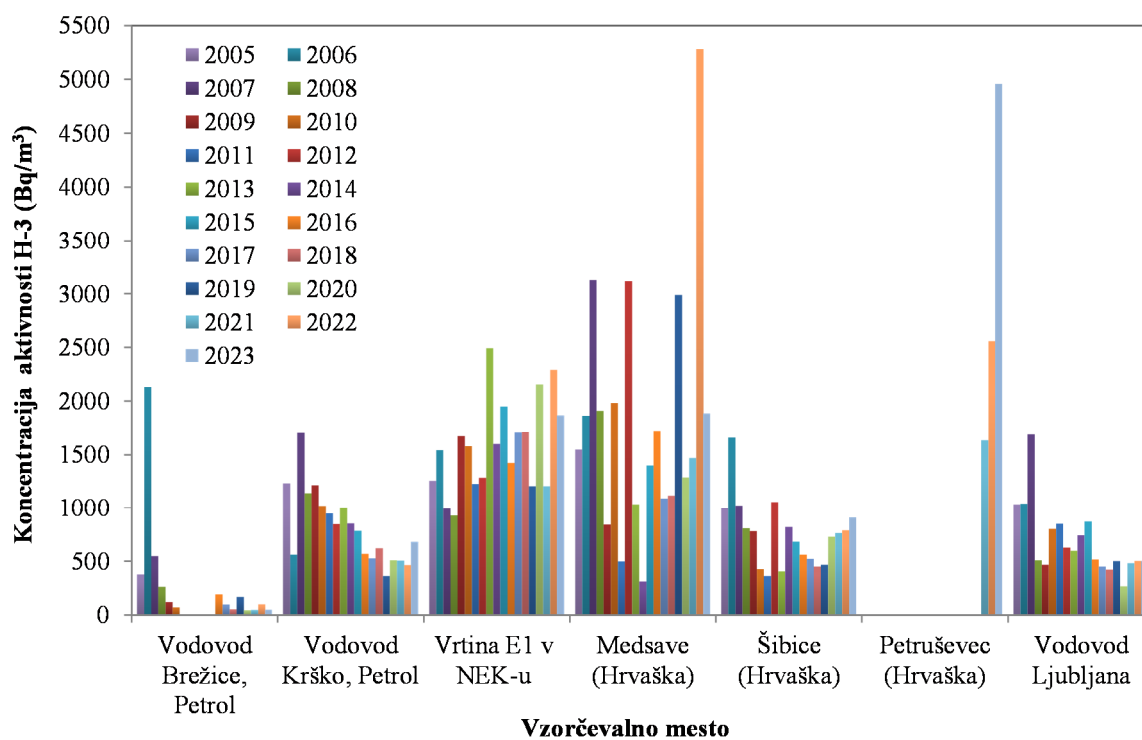
Slika 2.3: Koncentracije aktivnosti tritija za obdobje 2019–2023 za vse vrtine, ki so vključene v nadzor.



Slika 2.4: Koncentracije aktivnosti H-3 v vrtinah VOP-4, V-7/77 in Medsave ter tekočinski izpust H-3 iz NEK



Slika 2.5: Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v vodovodih in črpališčih od leta 2005 do 2023 v okolici NEK



Slika 2.6: Povprečne letne koncentracije aktivnosti H-3 v vodovodih in podtalnici od leta 2005 do 2023 v Sloveniji in na Hrvaškem



Sliki 2.5. in 2.6 prikazujeta povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v vodovodih in podtalnici od leta 2005 do 2023 v Sloveniji in na Hrvaškem. Obe sliki sta v enakem merilu, da jasno vidimo razlike med pitnimi vodami in podzemnimi vodami iz vrtin. Vrednosti za leto 2023 so istega reda velikosti kot v zadnjih letih. Izjemi sta vrednosti za vrtini Medsave in Petruševac. Vrednost za vrtino Medsave, ki je bila v letu 2022 občutno višja kot prejšnja leta, tako kot je bil najvišji tudi izpust NEK, je v letu 2023 spet v območju večletnega povprečja, medtem ko v letu 2023 opazimo velik porast vrednosti v vrtini Petruševac. Odziv na visok izpust ob remontu 2022 se v vrtini Petruševac vidi šele v letu 2023.

Cezij (Cs-137) in stroncij (Sr-90)

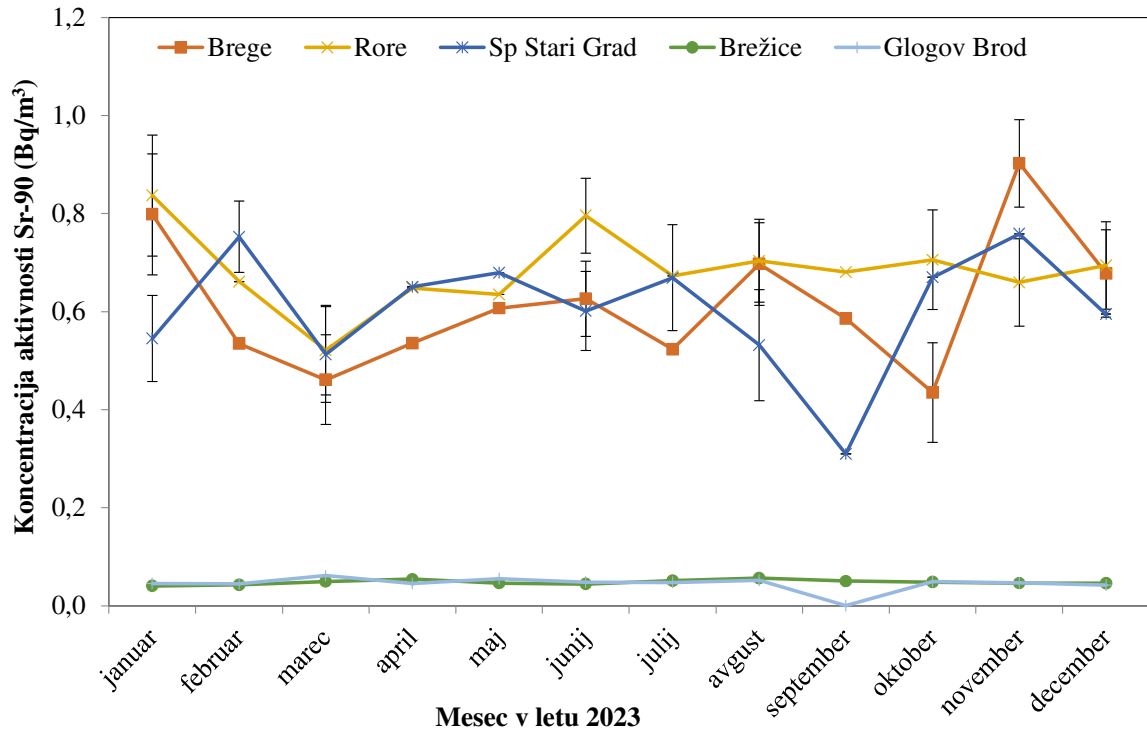
Med umetnimi radionuklidi smo pozorni predvsem na vsebnost cezija Cs-137 in stroncija Sr-90. Oba sta nehomogeno razširjena tudi na naših tleh, pripisujemo ju predvsem černobilski nesreči in nadzemnim jedrskim poskusom. V majhnih količinah se pojavljata tudi v izpustih NEK. Oba lahko uporabimo kot sledilca za študij transportnih procesov. V tabeli 2.2 so prikazani deleži vzorcev, v katerih sta bila radionuklida izmerjena. Cs-137 se pojavlja v 10 % vzorcev, kar je skoraj razpolovljena vrednost iz leta 2022, ko je bila vsebnost Cs-137 ugotovljena v 19 % vzorcev. Stroncij je bil izmerjen v 75 % vzorcev, kar je primerljivo s prejšnjimi leti. Rezultati za Sr-90 so prikazani na slikah od 2.7 do 2.10. Metodologija se v zadnjem letu ni spremenila.

Na sliki 2.7 so prikazane koncentracije Sr-90 v mesečnih vzorcih vode črpališč in vodovodov za leto 2023. Rezultate na sliki 2.7 lahko razdelimo v dve skupini; v prvi so rezultati za črpališče Glogov Brod in vodovod Brežice in so pod mejo zaznavnosti. Vrednosti za ostale tri vodovode oziroma črpališča so okrog 610 Bq/m³, ni posebnih odstopanj glede na letni čas, vrednosti so tudi primerljive z lanskimi rezultati.

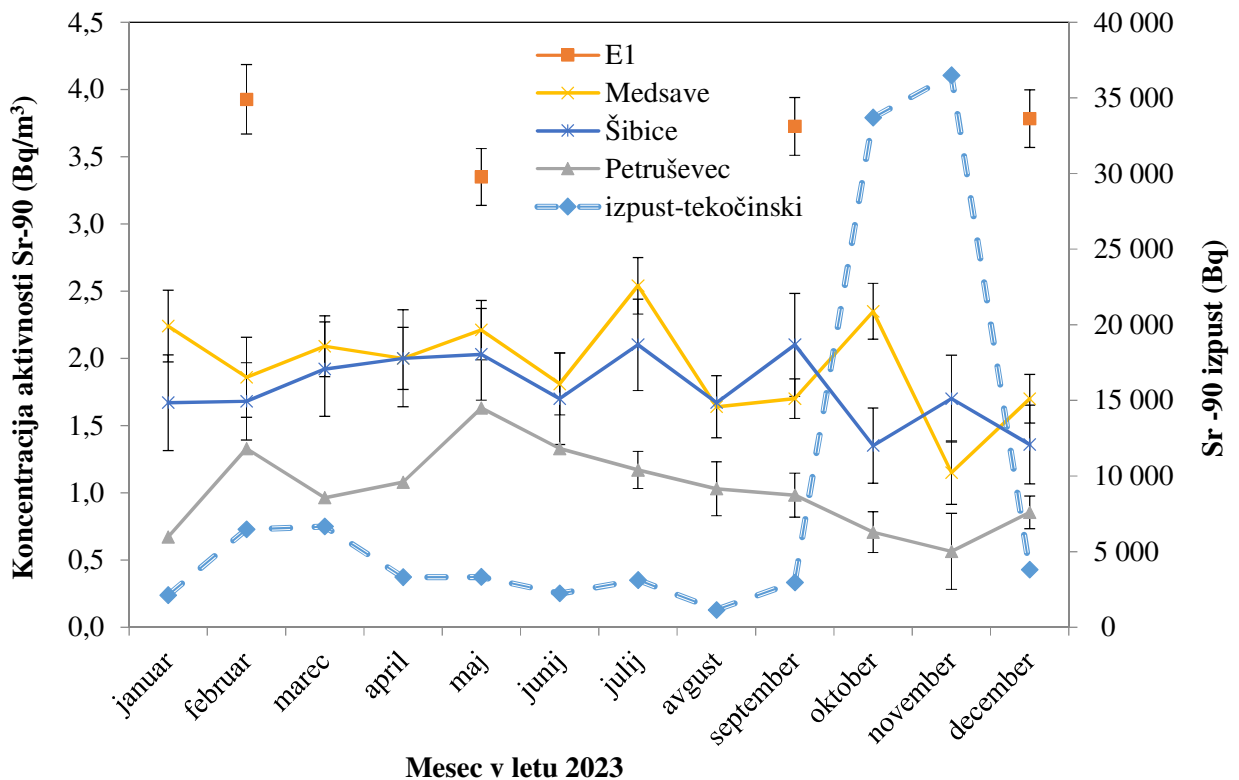
Na sliki 2.8 so prikazani mesečni tekoči izpusti Sr-90 iz NEK in koncentracija aktivnosti stroncija v hrvaških vrtinah in vrtini E1 znotraj ograje NEK. Tudi tu ni opaziti posebnosti, vrednosti za posamezno vzorčevalno mesto so čez celo leto primerljive, tudi vrednosti za vrtine so zelo podobne, predvsem to velja za vrtini Medsave in Šibice. Najnižje vrednosti so bile izmerjene v vzorcih iz vrtine Petruševac, ki je bila v nadzor vključena leta 2022, vrednosti v vrtinah Šibice in Medsave so enakega velikostnega reda. Vrednosti za vzorce iz vrtine E1 so primerljive za vsa štiri vzorčenja, malenkost višje kot v letu 2022, v primerjavi s hrvaškimi vrtinami so vrednosti koncentracije aktivnosti nekoliko višje.

Tabela 2.2: Število vseh vzorcev, v katerih smo v okviru merilnega nadzora določali Cs-137 in Sr-90, in delež tistih, kjer so bile izmerjene vrednosti nad detekcijsko mejo

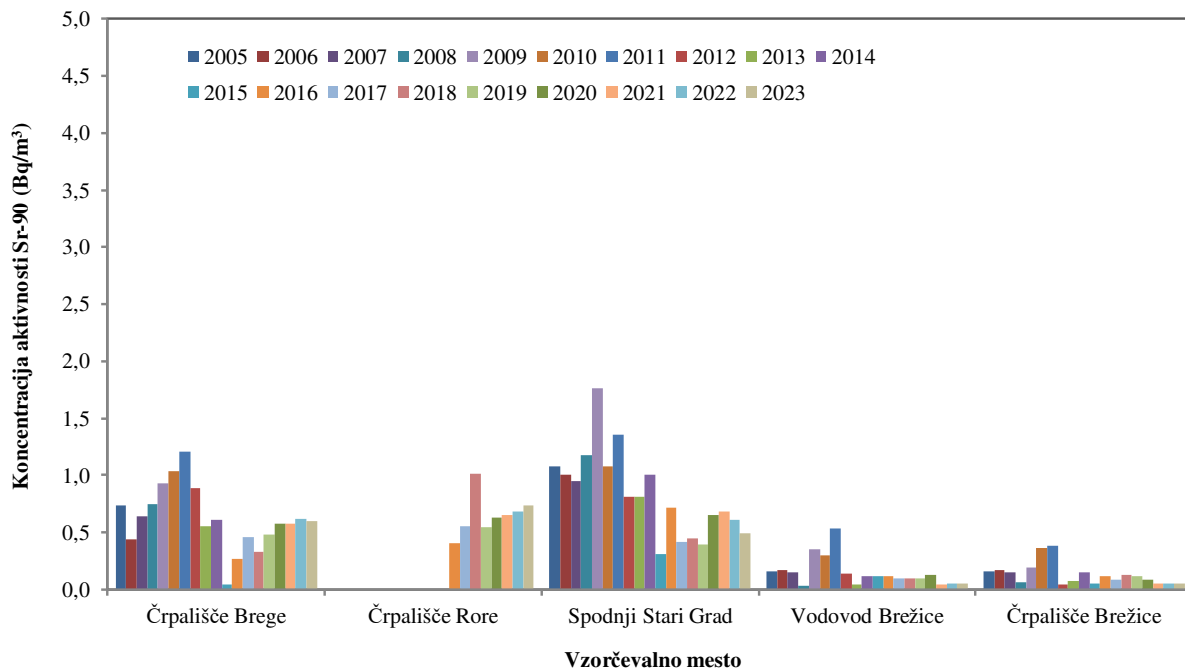
	št. mest	št vzorcev na leto	skupno število vzorcev	Cs-137	delež	Sr-90	delež
črpališča	5	12	60	4	0,07	36	0,60
	vodovodi	2	4	8	0	0,00	5
vrtine SLO		1	1	1	0	0,00	1
	1	4	4	1	0,25	4	1,00
	vrtine HR	3	12	36	6	0,17	36
skupaj	12		109	11	0,10	82	0,75



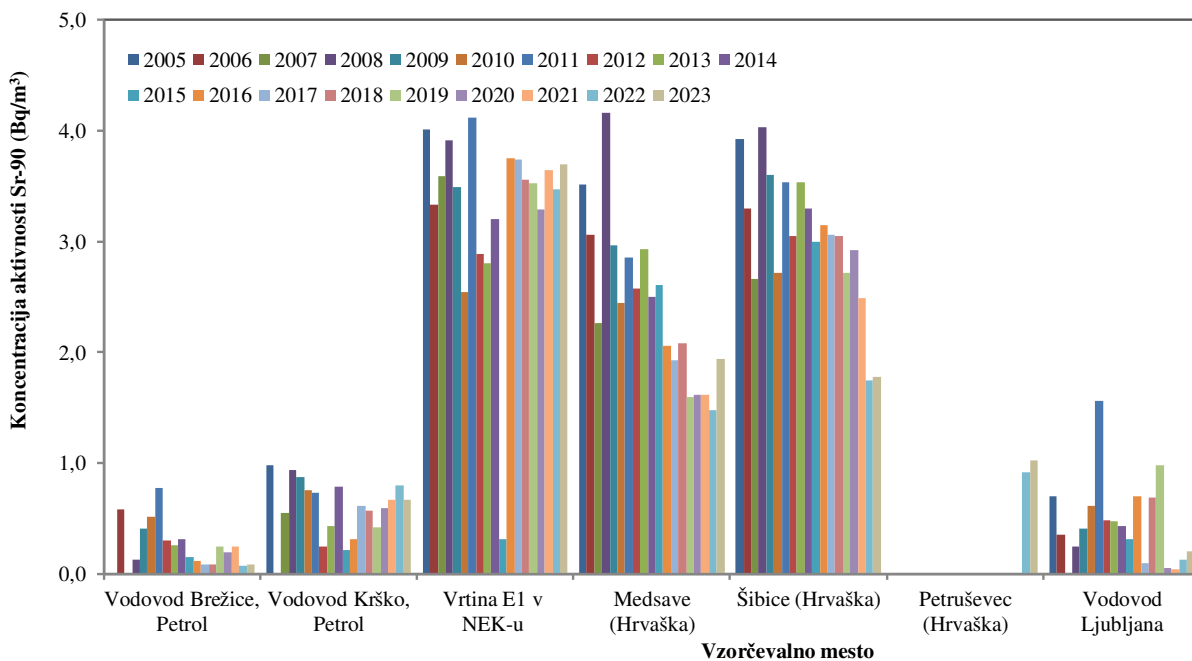
Slika 2.7: Koncentracija aktivnosti Sr-90 v mesečnih sestavljenih vzorcih iz črpališč in vodovodov v okolici NEK v letu 2023



Slika 2.8: Koncentracija aktivnosti Sr-90 v posamičnih mesečnih vzorcih vrtin ter mesečni tekočinski izpusti Sr-90 v Savo v letu 2023



Slika 2.9: Povprečne letne koncentracije aktivnosti Sr-90 v vodovodih in črpališčih v okolici NEK od leta 2005 do 2023



Slika 2.10: Povprečne letne koncentracije aktivnosti Sr-90 v vodovodih, črpališčih in podtalnici od leta 2005 do 2023 v Sloveniji in na Hrvaškem



Sliki 2.9 in 2.10 sta narisani v enakem merilu in tako jasno vidimo, da so koncentracije aktivnosti za vrtnine višje od najvišjih vrednosti za pitne vode. Letno povprečje koncentracije aktivnosti Sr-90 v krških črpališčih in vodovodu je bilo $0,61 \text{ Bq/m}^3$, kar je primerljivo s prejšnjimi tremi leti. V brežiškem vodovodnem sistemu je bila večina izmerjenih vrednosti pod mejo kvantifikacije. Vrednost za brežiški vodovod $0,05 \text{ Bq/m}^3$ je izračunana iz detekcijskih mej in je enaka kot zadnji dve leti. Za ljubljanski vodovod je bila v letu 2023 izračunana vrednost okrog $0,21 \text{ Bq/m}^3$. V posamično odvzetih četrletnih vzorcih vode iz vodovoda Brežice so bile vse vrednosti pod mejo zaznavnosti, v Krškem pa med seboj primerljive, v povprečju $0,66 \text{ Bq/m}^3$, kar je v obeh primerih podobno kot v letih 2021 in 2022. Korelacij z izpusti, pretoki ali padavinami ni opaziti. V splošnem vrednosti padajo oziroma se počasi stabilizirajo, saj jih dandanes že v veliki meri določa občutljivost metode, kar lahko razberemo tudi iz slike 2.9 s povprečnimi letnimi koncentracijami za vodovode in črpališča. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Sr-90 za leto 2023 na sliki 2.10 je v vseh treh vrtinah nekoliko višje, a primerljivo z vrednostmi iz leta 2022.

Jod (I-131) in aktivacijski ter fisijski produkti

Jod I-131 in drugi aktivacijski in fisijski produkti v vzorcih vodovodov, črpališč in vrtin tudi v letu 2023 niso bili zaznani.

Naravni radionuklidi

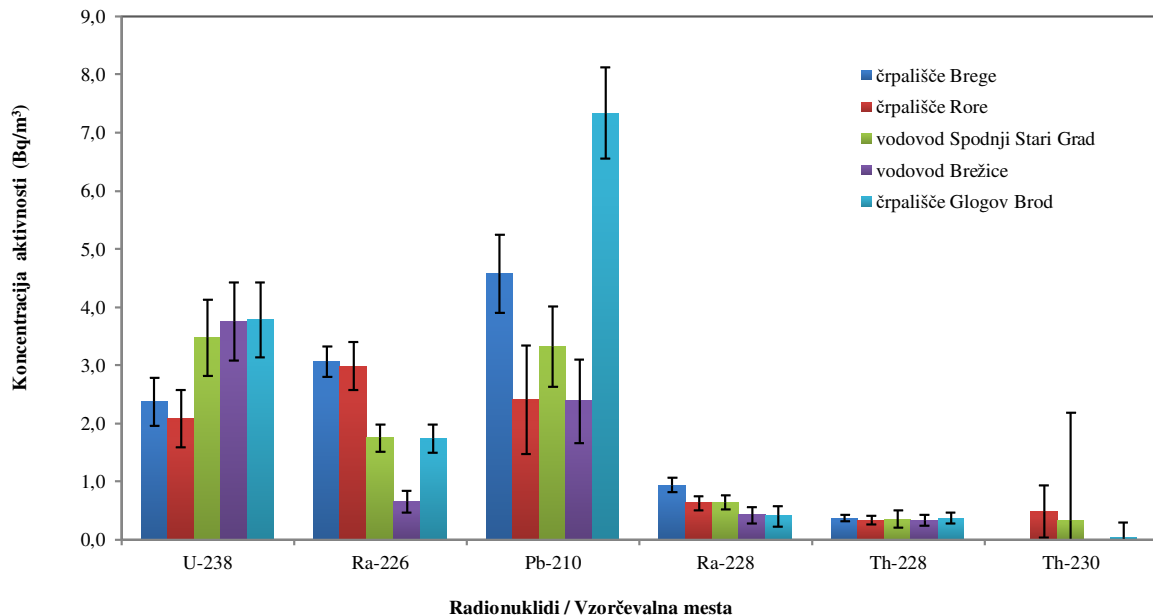
Koncentracije aktivnosti naravnega radionuklida K-40 so bile leta 2023 izmerjene na vseh vzorčevalnih mestih. Mesečne koncentracije aktivnosti K-40 so v vseh črpališčih in obeh vodovodih večinoma podobne vrednostim iz leta 2022. Delitev vodovodov in črpališč na dve skupini glede na K-40 je še vedno smiselna. V skupini treh vzorčevalnih mest Rore, Glogov Brod in Brežice vrednosti ostajajo na približno enaki ravni kot prejšnja leta, vrednosti so približno konstantne čez celo leto s povprečno vrednostjo okrog 25 Bq/m^3 . Vrednost za vzorčevalno mesto Spodnji Stari Grad je nekoliko višja in je posledica mešanja vode iz črpališč Brege in Rore, kar je skladno z ugotovitvami pri tritiju. Najvišje vrednosti so še vedno ugotovljene za vzorčevalno mesto Brege, v povprečju okrog 57 Bq/m^3 , kar je nekoliko višje od lanske povprečne vrednosti. V splošnem se vrednosti zmanjšujejo, kar nas navaja na misel, da se na krško-brežiškem polju spreminja količina ali vsaj režim gnojenja kmetijskih površin nad območji vodonosnikov [49] in da obstaja neposredni vpliv padavinskega useda in višjih vodostajev Save.

Na sliki 2.11 so povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti nekaterih naravnih radionuklidov v krško-brežiških vodovodih in črpališčih. Vrednosti so precej podobne lanskim. Pb-210 za črpališče Glogov Brod (črpališče Brežice) je tudi v letu 2023 precej višji kot na drugih vzorčevanih mestih, podobno kot leta 2022 in 2021, ko smo pregledali meritve, analize, zapise in prenose podatkov ter preverili možnost, da se je prikradla napaka v katerikoli del procesa. Posebnosti nismo našli. Tako v letu 2022 kot 2023 smo v vzorcih na tem vzorčevalnem mestu trikrat izmerili vrednosti, višje od 10 Bq/m^3 . Najvišja vrednost je bila v letu 2023 ugotovljena v juniju (20 ± 4) Bq/m^3 in ne v novembru kot prejšnji dve leti. Na splošno so bile, tako kot v letu 2021 in 2022, najvišje vrednosti izmerjene v zimskih mesecih. Preverili smo tudi tritij, Be-7 in prevodnost, vendar nismo našli posebnosti.

Če izvzamemo K-40, je v vzorcih ugotovljenega največ Pb-210 s povprečno vrednostjo okrog $4,0 \text{ Bq/m}^3$, kar je podobno kot zadnja štiri leta od 2019. Sledijo mu U-238 s približno $3,1 \text{ Bq/m}^3$, Be-7 s povprečno vrednostjo $2,8 \text{ Bq/m}^3$, in Ra-226 z $2,0 \text{ Bq/m}^3$. Povprečne vrednosti so za malenkost višje kot v prejšnjem letu. Tudi Ra-228 smo zaznali nekoliko več kot prejšnje leto, medtem ko je bilo obeh torijevih radionuklidov manj kot leto poprej. Najvišje povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti za Pb-210 je bilo tudi v letu 2023 izračunano za črpališče Glogov Brod ($7,34 \pm 0,78$) Bq/m^3 , za U-238 pa ($3,8 \pm 0,6$) Bq/m^3 na istem vzorčevalnem mestu. Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-226 se gibljejo od $0,7 \text{ Bq/m}^3$ (vodovod Brežice) do $3,1 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Brege) Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-228 za črpališče Glogov Brod je ($0,40 \pm 0,17$) Bq/m^3 , za črpališče Brege pa ($0,94 \pm 0,12$) Bq/m^3 . Minimalne in maksimalne vrednosti se večinoma pojavljajo na istih vzorčevalnih mestih kot prejšnje leto in so nekoliko višje kot prejšnje leto.



Be-7 je bil izmerjen v vseh črpališčih in vodovodih v Krškem in Brežicah. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Be-7 je od 0,7 Bq/m³ v vodovodu Brežice do 5,0 Bq/m³ na črpališču Brege, v povprečju približno 2,8 Bq/m³, kar je nekoliko več kot v letu 2022.



Slika 2.11: Povprečne letne koncentracije aktivnosti naravnih radionuklidov v vodovodih in črpališčih v letu 2023

OCENA UČINKOV

V tekočih in plinastih izpustih NEK je največ H-3 v obliki vode ali vodne pare. Z določanjem vsebnosti umetnih radionuklidov v pitni vodi in podtalnici ugotavljamo učinek morebitnega onesnaževanja zaradi izpustov iz NEK. Iščemo torej korelacije med koncentracijami aktivnosti v okoljskih vzorcih in aktivnostmi izpustov iz NEK. Povezave s tekočinskimi izpusti v letu 2023 so bile očitne, obravnavamo jih v podpoglavjih o tritiju in stronciju. V letu 2023 je bil izpust H-3 na ravni dolgoletnega povprečja; letni izpust H-3 v Savo je bil približno 26 % letne omejitve izpusta, postavljenega na 45 TBq. Največji tekočinski izpust H-3 je bil oktobra (3,35 TBq), tudi v septembru in novembru so bili izpusti istega velikostnega razreda. Izpustov je bilo torej približno pol manj kot leta 2022, tudi razporeditev je bila drugačna.

Pomembno vlogo pri razjasnitvi morebitnega učinka elektrarne na okolico in ljudi ima primerjava rezultatov meritev v enem letu z dolgoletnim povprečjem za izbrani radionuklid na isti lokaciji. Primerjava povprečnih letnih koncentracij H-3 in Sr-90 v vzorcih vode iz črpališč in vodovodov v okolici NEK od leta 2005 do 2023 je prikazana na slikah 2.5, 2.6, 2.9 in 2.10. Vrednosti so tudi v letu 2023 enakega velikostnega reda kot v preteklih letih.

V tabelah 2.3 in 2.4 so prikazane izračunane letne efektivne doze zaradi vnosa umetnih in naravnih radionuklidov ter njihove vsote pri pitju vodovodne vode za tri starostne skupine prebivalstva. Za primerjavo so podane tudi izračunane letne efektivne doze, izračunane na osnovi meritev na referenčni lokaciji (vodovod Ljubljana), ki se izvajajo v okviru republiškega nadzora pitne vode. Letne efektivne doze so izračunane ob predpostavki, da odrasel človek (referenčna oseba¹⁰) popije na leto 0,75 m³ vode, desetletni otrok 0,35 m³ vode in enoletni otrok 0,26 m³ vode na leto. Te predpostavke so v rabi že vrsto let, povzete so po priporočilih Svetovne zdravstvene organizacije in privzete tudi pri pripravi dokumentov

¹⁰ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznike iz prebivalstva, ki prejemajo ali bi lahko prejeli najvišje doze.



članic EU. Glede na anketo, izvedeno med prebivalci iz bližine NEK, bi lahko za količino zaužite vode za odraslega človeka uporabili skoraj polovico manjšo količino ($0,40 \text{ m}^3$), kar pomeni, da bi bile tudi vse izračunane doze skoraj za polovico manjše. Ohranjamo dosedanje predpostavke in metodologijo, ki so skladne s priporočili Svetovne zdravstvene organizacije in dokumenti EU, s tem pa kontinuiteto in primerljivost z dosedanjimi podatki.

Letna učinkovita doza za umetne radionuklide v pitni vodi je vsota prispevkov zaradi prisotnosti H-3, Sr-90 in Cs-137. Pri tem velja pripomniti, da je H-3 tudi kozmogenega izvora, le del je posledica izpustov iz jedrske elektrarne. Drugih umetnih radionuklidov ni bilo zaznani v izmerjenih vzorcih. Letna učinkovita doza za naravne radionuklide v pitni vodi je vsota prispevkov radionuklidov iz uranove in torijeve razpadne vrste ter Be-7. K-40 ni vključen v izračun, saj ne prispeva k dozi zaradi homeostatskega uravnavanja količine kalija v telesu.

Poglejmo si nekaj povprečij za odraslo referenčno osebo. Zaradi prisotnosti umetnih radionuklidov v krškem vodooskrbnem sistemu prejme referenčna oseba $0,026 \mu\text{Sv}$. V brežiškem vodovodnem sistemu je ocenjena povprečna letna učinkovita doza v letu 2023 za referenčno osebo zaradi prisotnosti umetnih radionuklidov $0,003 \mu\text{Sv}$. Celotna povprečna ocenjena letna doza za referenčno osebo zaradi prisotnosti umetnih in naravnih radionuklidov v pitni vodi je $3,3 \mu\text{Sv}$ za krški in $3,2 \mu\text{Sv}$ za brežiški vodooskrbni sistem. Povprečji sta izračunani za mesečne sestavljene vzorce. Od naravnih radionuklidov k celotni dozi daleč največ prispeva Pb-210. Tudi v letu 2023 ga je bilo največ v v vzorcih iz Glogovega Broda, enako kot v letu 2022 in 2021. V krškem vodovodnem sistemu je prispevek umetnih radionuklidov približno desetkrat višji kot v brežiškem, kar je podobno kot v preteklih letih. Razlog je črpanje krške pitne vode iz vodonosnika, ki se delno napaja iz Save in Krke. Skupna ocenjena doza za krški vodooskrbni sistem je zelo podobna kot za brežiški sistem zaradi drugačnega prispevka naravnih radionuklidov. V ljubljanskem vodovodu je bil prispevek umetnih radionuklidov ocenjen na $0,011 \mu\text{Sv}$ na leto za odraslo referenčno osebo, kar je okrog $0,9 \%$ celotne ocenjene letne doze zaradi prisotnosti umetnih in naravnih radionuklidov ($1,3 \mu\text{Sv}$) v pitni vodi. Celotna ocenjena letna doza je bila v letu 2023 za Ljubljančane nižja kot za prebivalce Brežic in Krškega. Poudariti velja, da je letna učinkovita doza za odraslo referenčno osebo zaradi vnosa naravnih radionuklidov pri pitju vodovodne vode, enako kot pri vnosu hrane, vključena v vsoti prispevkov k dozi naravnega sevanja (tabeli B in C v izvlečku).

Na sliki 2.12 je prikazana primerjava ocenjenih letnih učinkoviten doz za odraslo referenčno osebo zaradi prisotnosti umetnih radionuklidov v vodi. Vključeni so podatki za črpališči Brege in Rore ter vodovodi Spodnji Stari Grad, Brežice in Ljubljana. V letu 2023 je ocenjena letna učinkovita doza za vsa krško – brežiška vzorčevalna mesta istega reda velikosti kot v letu 2022. Slika 2.13 je podobna, le da gre za ocenjene letne učinkovite doze za odraslo referenčno osebo zaradi prisotnosti umetnih in naravnih radionuklidov v pitni vodi. Čeprav so koncentracije aktivnosti naravnih radionuklidov v črpališčih in vodovodih v splošnem nizke, prispevajo naravni radionuklidi uranove in torijeve razpadne vrste največ k ocenjeni letni učinkoviti dozi. Zaradi visokih doznih faktorjev največ prispevajo k celotni ocenjeni dozi Pb-210, Ra-226 in Ra-228. Že iz velikostnega reda doz na slikah 2.12 in 2.13 razberemo, da je prispevek umetnih radionuklidov za odraslo osebo zaradi tekočinskih in zračnih izpustov NEK zanemarljiv v primerjavi s prispevkom k letni dozi zaradi umetnih radionuklidov iz splošne kontaminacije in naravnih radionuklidov zaradi naravnega sevanja v pitni vodi. Vrednosti za umetne in naravne radionuklide v splošnem ločujeta dva velikostna razreda.

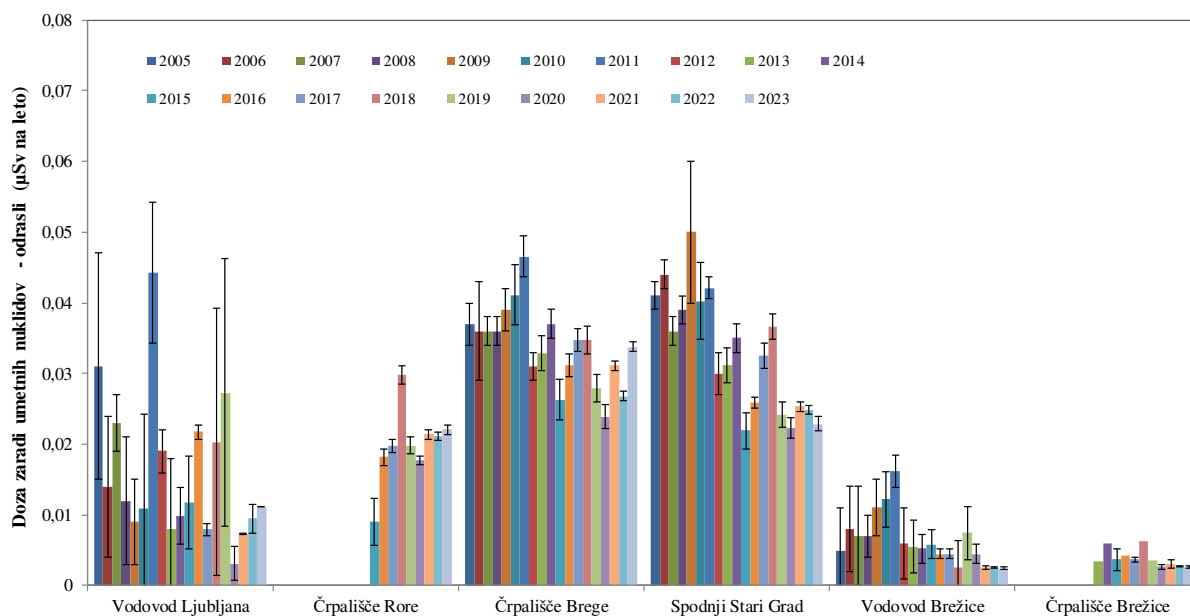


Tabela 2.3: Izračunane letne efektivne doze ter njihove vsote za odraslo referenčno osebo, otroka in dojenčka zaradi umetnih in naravnih radionuklidov v vodovodih ter črpališčih pitne vode in podtalnice v letu 2023 za krške vodovode in črpališča.

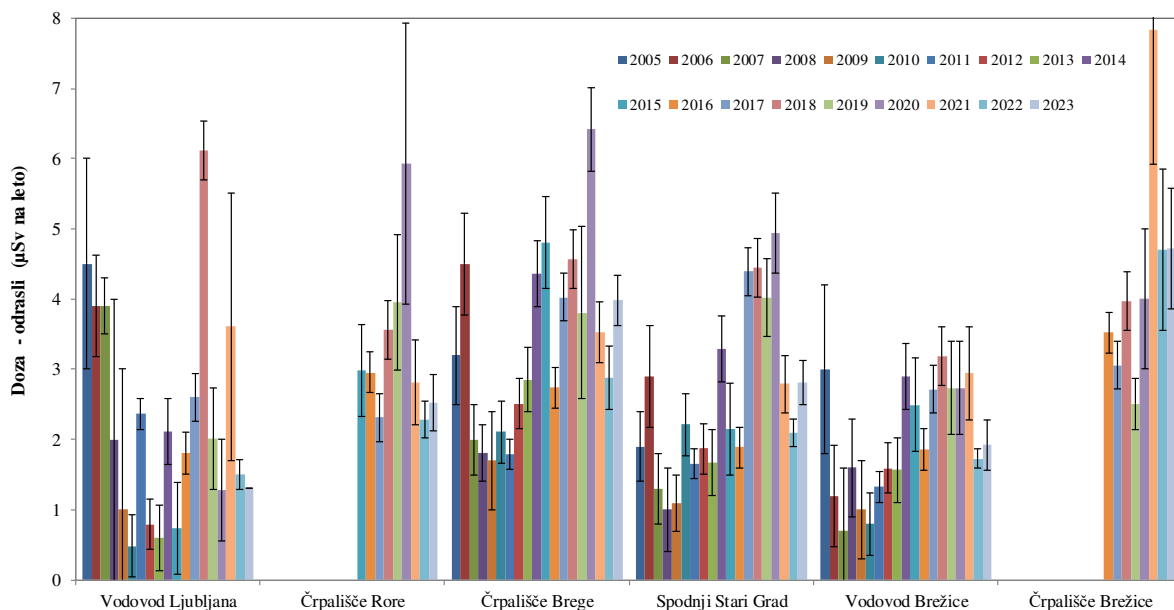
STAROSTNA SKUPINA	vrsta radionuklidov	vodovod Krško	Črpališče Brege	Črpališče Rore	Vodovod Krško (Spodnji Stari Grad)
		Letna efektivna doza (μSv)			
ODRASLI	umetni	0,023 \pm 0,001	0,034 \pm 0,001	0,022 \pm 0,001	0,023 \pm 0,001
	naravni	2,4 \pm 0,3	3,9 \pm 0,4	2,5 \pm 0,4	2,8 \pm 0,3
	Vsota	2,5 \pm 0,3	4,0 \pm 0,4	2,5 \pm 0,4	2,8 \pm 0,3
OTROCI	umetni	0,019 \pm 0,001	0,025 \pm 0,001	0,019 \pm 0,001	0,018 \pm 0,001
	naravni	3,5 \pm 0,4	5,7 \pm 0,5	3,6 \pm 0,5	4,0 \pm 0,4
	vsota	3,5 \pm 0,4	5,7 \pm 0,5	3,6 \pm 0,5	4,0 \pm 0,4
DOJENČKI	umetni	0,051 \pm 0,002	0,062 \pm 0,002	0,052 \pm 0,002	0,045 \pm 0,003
	naravni	14,7 \pm 1,7	23,4 \pm 1,8	15,5 \pm 2,0	16,3 \pm 1,7
	vsota	14,8 \pm 1,7	23,5 \pm 1,8	15,6 \pm 2,0	16,4 \pm 1,7

Tabela 2.4: Izračunane letne efektivne doze ter njihove vsote za odraslo referenčno osebo, otroka in dojenčka zaradi umetnih in naravnih radionuklidov v vodovodih ter črpališčih pitne vode in podtalnice v letu 2023 za brežiške vodovode in črpališča.

STAROSTNA SKUPINA	vrsta radionuklidov	vodovod Brežice	Vodovod Brežice (Volčanšek)	Črpališča Brežice (Glogov Brod)
		Letna efektivna doza (μSv)		
ODRASLI	umetni	0,0024 \pm 0,0009	0,002 \pm 0,0002	0,003 \pm 0,000
	naravni	2,5 \pm 0,6	1,9 \pm 0,4	4,7 \pm 0,9
	vsota	2,5 \pm 0,6	1,9 \pm 0,4	4,7 \pm 0,9
OTROCI	umetni	0,0021 \pm 0,0009	0,0018 \pm 0,0001	0,002 \pm 0,000
	naravni	3,4 \pm 0,8	2,7 \pm 0,5	6,3 \pm 1,1
	vsota	3,4 \pm 0,8	2,7 \pm 0,5	6,3 \pm 1,1
DOJENČKI	umetni	0,0058 \pm 0,0025	0,005 \pm 0,000	0,005 \pm 0,000
	naravni	13,3 \pm 2,8	11,1 \pm 1,8	23,2 \pm 3,9
	vsota	13,3 \pm 2,8	11,1 \pm 1,8	23,2 \pm 3,9



Slika 2.12: Ocenjeni prispevek umetnih radionuklidov v pitni vodi k letni dozi za odraslo osebo od leta 2005 do 2023 na različnih vzorčevalnih lokacijah



Slika 2.13: Ocenjena letna doza zaradi prisotnosti umetnih in naravnih radionuklidov v pitni vodi za odraslo osebo od leta 2005 do 2023 na različnih vzorčevalnih lokacijah



SKLEPI

Med umetnimi radionuklidi sta bila v pitni vodi in podtalnici v letu 2023 izmerjena H-3 in Sr-90. Cs-137 je bil sicer večinoma zaznan, ne pa tudi izmerjen, ker so bile vrednosti pod mejo kvantifikacije. Izmerjen je bil samo še v 10 % vzorcev pitnih vod. I-131 v letu 2023 ni bil zaznan v nobenem vzorcu vodovodnih oziroma podzemnih vod.

Koncentracije aktivnosti tritija v pitni vodi v okolici NEK so istega velikostnega reda kot drugod po Sloveniji. Vrednosti na Bregah so najvišje v Sloveniji in so nedvomno posledica učinka delovanja NEK, vendar tudi najvišje vrednosti še vedno dosegajo manj kot 2 % mejnih vrednosti direktive EU za pitne vode in *Pravilnika o monitoringu radioaktivnosti v pitni vodi* [9].

V letu 2023 je bil izpust H-3 na ravni dolgoletnega povprečja. Korelacije med vrtnami blizu reke Save in izpusti so še vedno nedvoumne in primerljive z opažanji v zadnjih štirih letih, ko smo spremenjene vrednosti v nekaterih vrtnah povezovali s spremenjenim hidrološkim režimom na krško-brežiškem polju zaradi napolnitve akumulacije HE Brežice in sorazmerno visokimi izpusti.

Največja ocenjena letna efektivna doza v okolici NEK v letu 2023 zaradi pitja vodovodne vode je bila na krško-brežiškem polju izračunana za črpališče Brežice – Glogov Brod, in sicer 4,7 μSv za odraslo referenčno osebo, 6,3 μSv za otroke in 23,2 μSv za dojenčke. Vrednosti so podobne kot v letu 2022. Praktično vsa obremenitev gre na račun naravnih radionuklidov, Pb-210 je glavni »krivec«, sledijo radijevi izotopi. Umetni radionuklidi prispevajo k obremenitvi kvečjemu procent (0,94 %). Za otroke in dojenčke je ta delež še manjši.

Ocenjena letna doza v ljubljanskem vodovodu v letu 2023 je 1,3 μSv za odraslo referenčno osebo, 2,3 μSv za otroka in 11,1 μSv za dojenčka, kar je zelo podobno vrednostim iz leta 2022. Obremenitev z umetnimi radionuklidi iz ljubljanskega vodovoda je ocenjena na 0,86 % celotne izračunane letne doze zaradi radionuklidov v pitni vodi za odraslo referenčno osebo. V primerjavi s prebivalci Brežic in Krškega so Ljubljančani v letu 2023 prejeli podobno letno efektivno dozo zaradi pitja vode.

Ocenjene letne efektivne doze zaradi umetnih radionuklidov v pitni vodi v brežiškem in krškem vodnooskrbnem sistemu so daleč pod avtorizirano mejno dozo (50 μSv), koncentracije aktivnosti pa pod izpeljanimi koncentracijami aktivnosti, ki so izračunane ob upoštevanju, da je vrednost mejne efektivne doze 100 μSv na leto za pitno vodo [10] in pod parametričnimi vrednostmi iz [9].





3 RADIOAKTIVNOST V USEDIH

POVZETEK

Pregledali smo merske rezultate s treh lokacij za padavine in z osmih mest za suhe usede v okolici NEK ter jih primerjali z vrednostmi z referenčne točke v Ljubljani. V letu 2023 je bilo izmerjenih po 48 padavinskih vzorcev in vzorcev vazelinskih plošč. Uporabljene so bile tri različne analizne tehnike: visokoločljivostna spektrometrija gama, tekočinskoscintilacijska spektrometrija in radiokemijska metoda z meritvami na proporcionalnem števcu.

V padavinskih vzorcih in vazelinskih ploščah so bili, kot leta poprej, izmerjeni radionuklidi H-3, Be-7, Na-22, Cs-137, U-238, Ra-226, Ra-228, Pb-210, Th-228 in K-40. Radionuklid Sr-90 je bil zaznan v sedmih vzorcih. Vzrok za prisotnost niso zračni izpusti iz NEK, pač pa vetrni nanos zemlje v lovilnike padavin, kjer je radionuklid prisoten zaradi splošne kontaminacije. Izmerjene koncentracije aktivnosti usedov se ne odmikajo bistveno od dolgoletnih povprečij. Študirali smo korelacije med parametri, kot so količina padavin, koncentracija aktivnosti radionuklidov, padavinski in suhi used in neposredni zračni izpusti iz jedrske elektrarne. Podatke smo primerjali z večletnimi nizi in iskali morebitne odmike od dolgoletnih povprečij. V splošnem ni opaziti korelacije med izpusti jedrske elektrarne in vsebnostjo radionuklidov v okolju, razen občasno pri H-3. Pri tritiju se opazi, da je koncentracija aktivnosti H-3 na Bregah in v Krškem na vsakoletni ravni višja kot na referenčnih mestih v Ljubljani in Dobovi, kar lahko pripišemo izpustom iz NEK. Korelacijski koeficient med izmerjeno koncentracijo H-3 in zračnimi izpusti v letu 2023 za vzorčevalni mesti Brege in Krško kaže na korelacijo, bolj oddaljena Dobova in referenčno mesto v Ljubljani pa ne.

Izračunali smo efektivno dozo zaradi zunanjega sevanja useda in zaradi zaužitja rastlin z usedlimi radionuklidi za referenčno osebo v okolici jedrske elektrarne in na referenčni točki v Ljubljani. Prispevek umetnih radionuklidov v okolici NEK k skupni dozi je zanemarljiv. Skupne doze v okolici NEK so primerljive z dozami na referenčni točki v Ljubljani.

UVOD

Za nadzor učinka zračnih izpustov na okolje vzorčimo zrak z aerosolnimi in oglenimi filtri (poglavje *Zrak*) ter vzorci padavin. Lovilniki padavin so postavljeni v bližini jedrskega objekta (Krško, Brege in Dobova) in na referenčni lokaciji v Ljubljani. Del aerosolov zbiramo v obliki suhega useda na vazelinskih ploščah, ki so postavljene v okolici jedrske elektrarne in na referenčni lokaciji v Ljubljani. Tako zajamemo vse sestavne dele ozračja: pline, aerosole in vodo v različnih pojavnih oblikah in agregatnih stanjih. Podatki so bistveni za določitev doznih obremenitev ljudi, ki živijo v okolici jedrskega objekta. Rezultate primerjamo z vrednostmi na referenčni lokaciji.

Usedle radioaktivne snovi s sevanjem prispevajo k izpostavitvi ljudi neposredno, vsrkane v rastline prek korenin ali listov pa se vnesejo z užitnimi deli v prehrabno verigo ljudi, kar se podrobneje obravnava v poglavju *Radionuklidi v hrani*. Padavine s pronicanjem skozi zemeljske plasti postanejo del podzemnih vod, to pa uporabljamo kot pitno vodo (poglavje *Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi*), zato igrajo padavine pomembno vlogo pri prenosu radioaktivnih snovi iz zraka v živa bitja.

Tritij, radioaktivni izotop vodika, je eden redkih radionuklidov, ki jih jedrske elektrarne izpuščajo v tolikšnih količinah, da jih lahko merimo tudi v okoljskih vzorcih. Del tritijevega inventarja v ozračju prispevajo tudi različne industrijske panoge, ki uporabljajo H-3 kot vstopno surovino pri izdelavi instrumentov in svetlečih oznak. Predvsem na severni zemeljski polobli je del tritija v ozračju dediščina nadzemnih jedrskih poskusov. Ti so v šestdesetih letih prejšnjega stoletja zvišali tritijeve koncentracije aktivnosti v padavinah za tri velikostne rede. Vrednosti se dandanes počasi približujejo ravni iz predjedske dobe. Tritij je sicer tudi kozmogen radionuklid in nastaja v zgornjih plasteh ozračja z interakcijo kozmičnih žarkov in dušika. V ozračju postane sestavni del vodne molekule in se tako vključi v globalni vodni krog, ki je bistvenega pomena za življenje na Zemlji.



V letu 2023 so bili v vzorcih padavin in vazelinskih plošč izmerjeni H-3, umetna radionuklida Cs-137 in Sr-90, kozmogena Be-7 in Na-22 ter naravni radionuklidi K-40, U-238, Th-228, Th-230, Ra-226, Ra-228 in Pb-210.

OKOLJSKI VZORCI

Značilnosti vzorčenja

Mesečno vzorčenje padavin in suhega useda poteka neprekinjeno v skladu s postopkom *Zbiranje vzorcev deževnice in talnega useda (LMR-DN-04)*.

Lovilniki padavin so postavljeni v Krškem, Bregah, Dobovi in na referenčni lokaciji v Ljubljani (IJS, Jamova cesta 39). Instrument sestavljata lijak in dve 25-litrski plastični posodi, ki sta z lijakom povezani z plastično cevjo. Lijak iz polirane nerjavne pločevine, ki zajema padavine na efektivni površini 0,25 m², je opremljen s kovinsko mrežico za prestrezanje listja in drugih predmetov. Oblikovan je tako, da so izgube padavin zaradi pršenja vode iz lijaka minimalne. Ob lovilniku padavin v Krškem in Dobovi je tudi merilnik količine padavin, ki se odčitava dnevno, za lokaciji Brege in Ljubljana pa uporabljamo meritve ARSO.

Zbrani tekočinski vzorec padavin se razdeli na dva dela: v litrskem podvzorcju se ugotavlja vsebnost tritija (H-3), iz preostalega vzorca se pripravi vodna sušina za analize sevalcev gama in stroncija po postopku *Priprava sušine vzorcev vod (LMR-DN-06)*.

Suhi talni used se zbira na vazelinskih ploščah površine 0,3 m² iz poliakrilatnega "pleksi" stekla. Postavljene so od 1,8 m do 2 m nad površino tal in premazane s tanko plastjo farmacevtske vazeline. Na ploščah se ujamejo tudi resuspendirani prašni delci. Zbiralniki suhega useda so postavljeni na osmih vzorčevalnih mestih v ožji in širši okolici NEK.

Značilnosti meritev okoljskih vzorcev

Za določitev aktivnosti sevalcev gama uporabljamo visokoločljivostno spektrometrijo gama. Analizo stroncija smo opravili po postopku *Določanje stroncija z beta štetjem (SDN-O2-STC(01))*. Ugotavljanje koncentracije aktivnosti H-3 smo opravili po postopku *Določanje tritija s tekočinskim scintilacijskim štetjem (SDN-O2-STC(02))*. V primerih, da je vzorca izredno malo, ga analiziramo po direktni metodi po postopkih *Vzorčenje in priprava vzorcev za določitev tritija (LSC-DN-06)* in *Analiza in izračun vsebnosti tritija H-3 (LSC-DN-07)*.

Meritve sevalcev gama v suhem usedu se izvajajo na treh sestavljenih vzorcih: ožja okolica NEK (vzorčevalna mesta 1, 7 in 8 na razdalji približno 1 km), širša okolica NEK (vzorčevalna mesta od 2 do 5 na razdalji približno 3 km) in daljna okolica (vzorčevalno mesto 6, najdlje od NEK, na razdalji približno 4,5 km). Referenčno mesto za suhi used je v Ljubljani. Koncentracije aktivnosti sevalcev gama v deževnici in suhem usedu so bile opravljene po postopku *Visokoločljivostna spektrometrija gama v laboratoriju (LMR-DN-10)*.

REZULTATI MERITEV IN TIPIČNI ČASOVNI POTEKI

Padavine in padavinski used

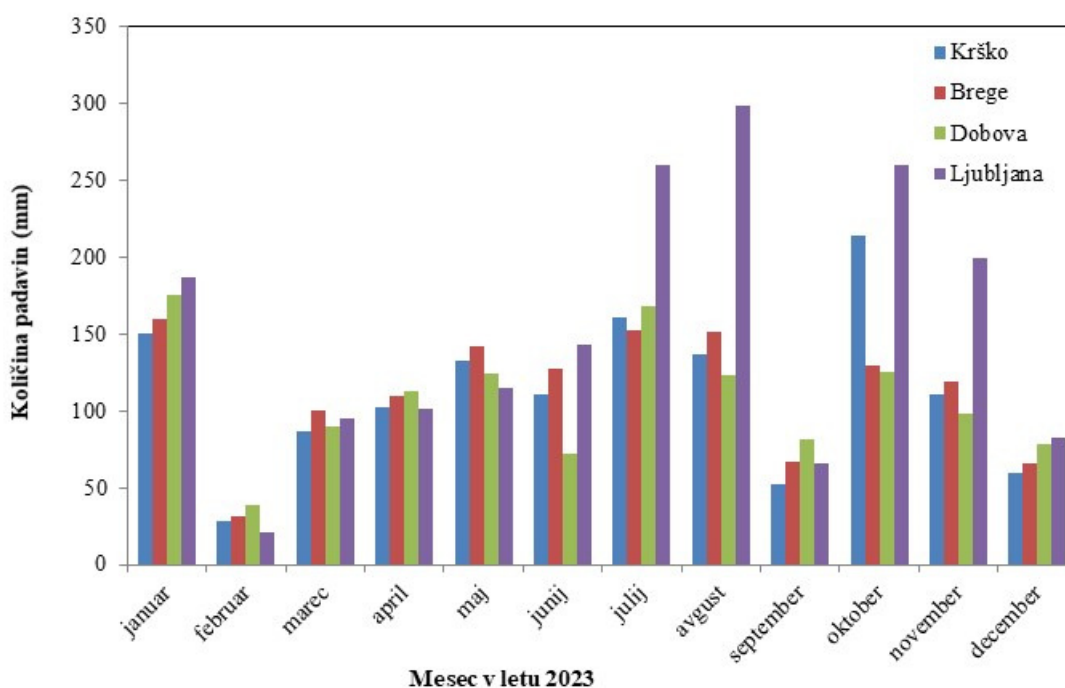
Rezultati meritev vzorcev padavin so prikazani v tabelah T-37 (Brege), T-38 (Krško), T-39 (Dobova) in T-40 (Ljubljana). Vse meritve je opravil IJS. Tabele z merskimi rezultati so na priloženi zgoščenci v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645*, marec 2024.

V vzorcih padavin so bili ugotovljeni H-3, Be-7, K-40, Sr-90 in Cs-137 ter potomci uranove in torijeve razpadne vrste. Analiza Y-90 ni bila opravljena, zato so v merskih tabelah podane koncentracije aktivnosti Sr-89/Sr-90, čeprav praktično ni možnosti, da bi bil v vzorcju tudi Sr-89, saj ta kratkoživi radionuklid v izpustih NEK v letu 2023, podobno kot v prejšnjih letih, ni bil zaznan. Vse identifikacije Sr-90, ki smo jih izmerili, so posledica vetrovne resuspenzije, kar je evidentno tudi iz tega, da je v večini primerov poleg Sr-90, zaznan tudi Cs-137, kajti oba radionuklida sta prisotna v zemlji kot posledica splošne kontaminacije.



V tabeli 3.1 so izpisani meseci, v katerih smo izmerili maksimalno koncentracijo aktivnosti za posamezni radionuklid. Na vseh vzorčevalnih mestih v okolici NEK je bil najvišji izmerek za tritij v mesecu maju, v Ljubljani pa v mesecu juniju. Na vseh lokacijah v okolici NEK so bile najvišje koncentracije aktivnosti Be-7 izmerjene v poletnem času; v Krškem v juniju, v Dobovi v juliju in v avgustu v Bregah. V Ljubljani je bila najvišja koncentracija Be-7 izmerjena v septembru. Sr-90 je v letu 2023, kot tudi leta poprej, izvzet iz obravnave, saj so praktično vse izmerjene vrednosti pod mejo detekcije.

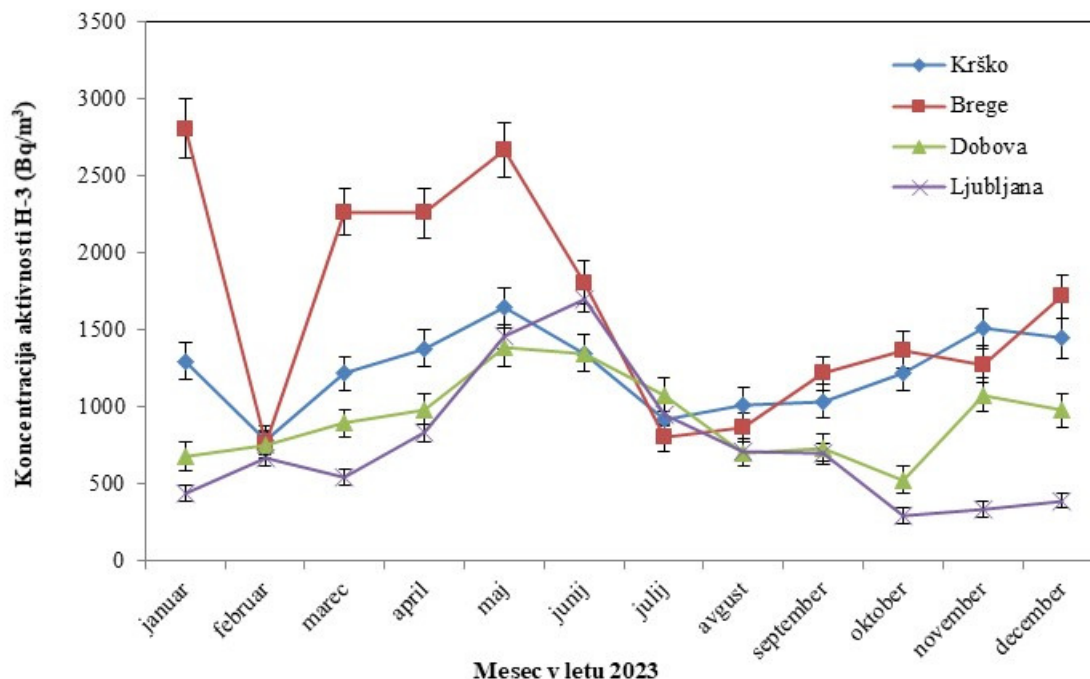
V letu 2023 je bila količina padavin na letni ravni v Ljubljani za približno 46% večja kot v letu 2022. Prav tako je bila količina padavin na vseh vzorčevalnih mestih v okolici NEK večja kot v letu poprej in sicer na Bregah (meteorološka merilna postaja na letališču Cerklje na Dolenjskem) za 49%, v Krškem za 29 % in za 45% v Dobovi. Največ dežja na vzorčevalnih mestih v okolici NEK je padlo v Bregah, najmanj v Krškem. V celem letu je največ padavin padlo v Ljubljani (1 827 mm), kar je približno 38 % več od povprečja v okolici NEK. Mesečne količine padavin v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani so prikazane na sliki 3.1. Periode izračuna količin padavin so usklajene s termini vzorčenj.



Slika 3.1: Mesečne količine padavin v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani

Tabela 3.1: Pojavljanje najvišjih izmerjenih mesečnih koncentracij aktivnosti za H-3, Cs-137, Be-7, K-40 in Pb-210 v vzorcih padavin na Bregah, v Krškem, Dobovi in Ljubljani v letu 2023

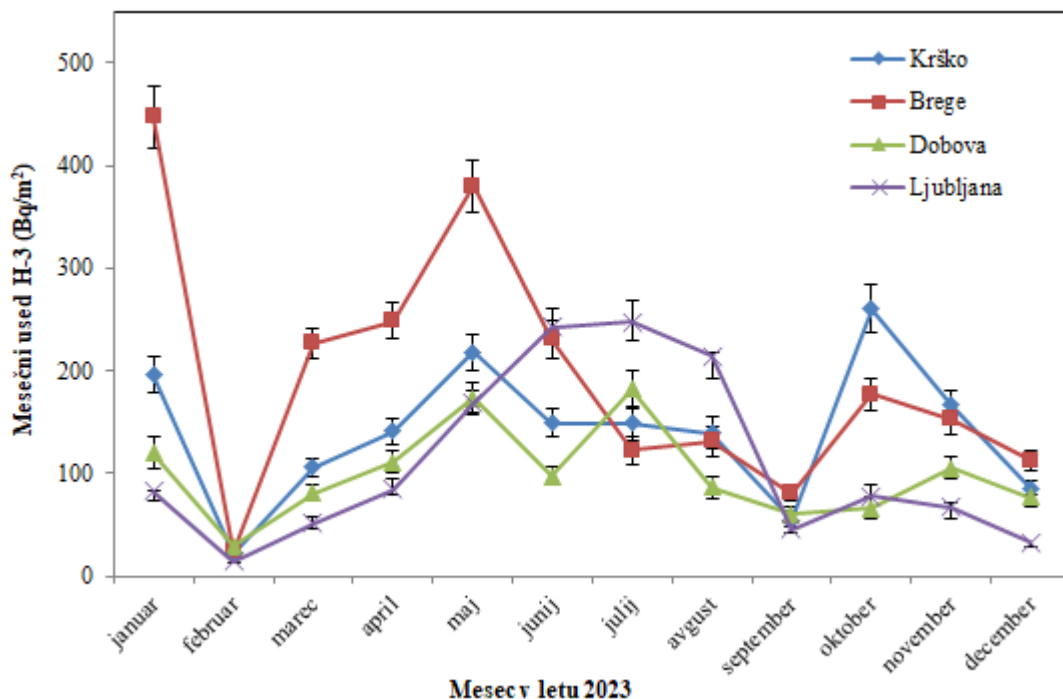
Radionuklid v padavinah	LJUBLJANA	BREGE	KRŠKO	DOBOVA
H-3	junij	maj	maj	maj
Cs-137	julij	februar	junij	september
Be-7	september	avgust	junij	julij
K-40	september	avgust	februar	februar
Pb-210	september	avgust	junij	september



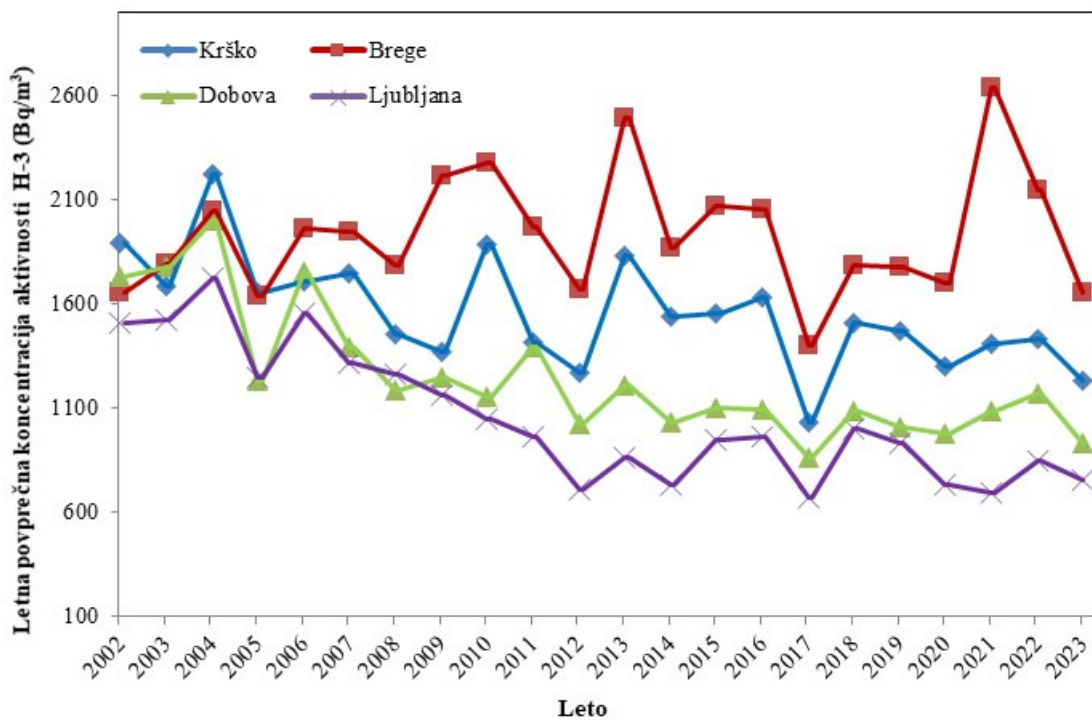
Slika 3.2: Mesečne koncentracije aktivnosti tritija v padavinah v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani.

Tritij (H-3)

Koncentracije aktivnosti tritija v padavinah so prikazane na sliki 3.2. Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti so primerljiva s povprečji mesečnih koncentracij v letu 2022. Koncentracija aktivnosti tritija na Bregah je v januarju znatno povišana glede na ostala vzorčevalna mesta. Zračni izpusti v letu 2023 so bili za 49 % višji kot v letu 2022 in za 10 % višji od leta 2021. Največji zračni izpusti tritija so bili v mesecu marcu, aprilu in maju in sicer je seštevek vseh treh mesecev 39 % količine celotnega letnega izpusta iz NEK. V omenjenih mesecih je bila koncentracija tritija na vzorčevalnih mestih v Bregah in Krškem višja od povprečne vrednosti, kar se sklada s povišanimi zračnimi izpusti. Zveza med zračnimi izpusti in izmerjeno koncentracijo aktivnosti H-3 je letos zaznana na dveh vzorčevalnih mestih v okolici NEK in sicer v Bregah in Krškem. Vzorčni korelacijski (Pearsonov) koeficient [53] je 0,7 tako v Bregah kot v Krškem. Na vzorčevalnem mestu v Dobovi je bil korelacijski koeficient veliko nižji (0,3), kar nakazuje na slabšo korelacijo, saj je to tudi najbolj oddaljeno vzorčevalno mesto v okolici NEK. Na referenčnem vzorčevalnem mestu v Ljubljani je koeficient korelacije blizu ničle, kar kaže na to, da ni povezave. Najvišja mesečna koncentracija tritija v padavinskih vzorcih v okolici NEK je bila v mesecu januarju izmerjena na Bregah, najnižja pa oktobra v Ljubljani. Koncentracije aktivnosti v grobem sledijo običajnim naravnim letnim gibanjem tritija v ozračju severne zemeljske poloble, kjer so vrednosti poleti v splošnem višje kot pozimi. Izjema so koncentracije aktivnosti na lokacijah na Bregah in v Krškem, kjer se nedvoumno pozna učinek delovanja NEK, saj so letna povprečja konstantno višja od referenčne lokacije v Ljubljani.



Slika 3.3: Mesečni padavinski used tritija v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani



Slika 3.4: Povprečje letnih koncentracij aktivnosti H-3 v padavinah za obdobje 2006–2023



Mesečne padavinske usede (aktivnosti padavin na kvadratni meter površine) izračunamo z množenjem koncentracij aktivnosti in količin padavin. Na sliki 3.3 so predstavljeni mesečni padavinski usedi H-3 za vsa štiri vzorčevalna mesta: Ljubljano, Brege, Krško in Dobovo. Časovni poteki za lokacije v okolici NEK so primerljivi s potekom na ljubljanski referenčni lokaciji.

Na Bregah je vzorec koncentracij aktivnosti tritija nekoliko drugačen kot v Krškem in Dobovi, kar je lepo razvidno iz dolgoletnih letnih povprečij na sliki 3.4. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti za leto 2023 je bilo na vseh lokacijah nižje kot v letu 2022. Vrednosti so bile najnižje v Ljubljani in najvišje na Bregah, kar je že ustaljen večletni vzorec.

Učinek delovanja NEK na koncentracije aktivnosti tritija v neposredni bližini elektrarne je opazen, kar kažejo letna povprečja, ki so na Bregah in v Krškem vsako leto nad vrednostmi v Dobovi in Ljubljani. V mesecih z majhnimi količinami padavin je korelacija med izpusti in koncentracijami aktivnosti izrazitejša. Izrazito sušni meseci se pojavljajo praktično vsako leto, a ne vedno v istem letnem času.

Sezonska nihanja tritija ponazarja tabela 3.2, kjer so nanizani rezultati linearne regresije in sicer smerni koeficienti korelacij in korelacijski koeficient R^2 med količino padavin in padavinskimi mesečnimi usedi tritija. Precejšnje razlike med smernimi koeficienti za zimo in poletje potrjujejo različne mehanizme za nastanek in transport tritija iz ozračja na Zemljo v obliki padavin. Čim večji je smerni koeficient, tem več tritija iz ozračja preide v padavine in s tem v padavinski used. Če pogledamo lokaciji Ljubljana in Dobova, kjer je učinek zračnih izpustov iz NEK nezaznaven oziroma pri Dobovi manj zaznaven, so poleti ti koeficienti višji kot pozimi, kar pomeni, da je prenos tritija iz ozračja v padavinske usede učinkovitejši poleti kot pozimi. Ta ugotovitev ne velja vedno na lokacijah Krško in Brege, saj na omenjeni pojav umetno vplivamo z vnašanjem tritija v atmosfero preko zračnih izpustov iz NEK. Pri slednji lokaciji je v letu 2023 smerni koeficient slabo določen ($R^2=0,1$). Razlog za to sta meseca julij in avgust, ko je bilo zelo veliko padavin in male količine zračnih izpustov H-3 iz NEK.

Medtem ko je tritij praktično edini merjeni radionuklid, ki ga v okolici NEK lahko deloma pripišemo izpustom jedrske elektrarne, je stanje pri drugih radionuklidih nekoliko drugačno. Primerjava med usedi Cs-137 v Ljubljani in na lokacijah v okolici NEK pokaže, da so vrednosti usedov v Ljubljani praktično enake ali nekatera leta celo nekoliko višje kot v okolici NEK (slika 3.7).

Tabela 3.2: Korelacijski koeficienti R^2 in smerni koeficienti korelacij za odvisnost pomladno-poletnih oziroma jesensko-zimskih padavinskih usedov tritija od količine padavin za leto 2023. * Smerni koeficient je slabo določen zaradi obsežnih kratkotrajnih padavin in male količine zračnih izpustov H-3 iz NEK.

	pomlad–poletje		jesen–zima	
	smerni koeficient	R^2	smerni koeficient	R^2
Ljubljana	0,7	0,5	0,3	0,8
Brege	-1,2*	0,1*	2,7	0,8
Krško	0,6	0,2	1,3	1,0
Dobova	1,0	0,6	0,6	0,7

Berilij (Be-7)

Be-7 je kozmogeni radionuklid, kar pomeni, da naravno nastaja v zgornjem delu atmosfere v jedrskih reakcijah med visokoenergijskimi kozmičnimi žarki in dušikom [54]. Od tam prehaja v spodnje plasti zemeljskega ozračja in na površje.

V tabeli 3.3 so prikazana letna povprečja padavinskega useda Be-7 v okolici NEK in na referenčnem merilnem mestu v Ljubljani.



Tabela 3.3: Povprečni letni padavinski used Be-7

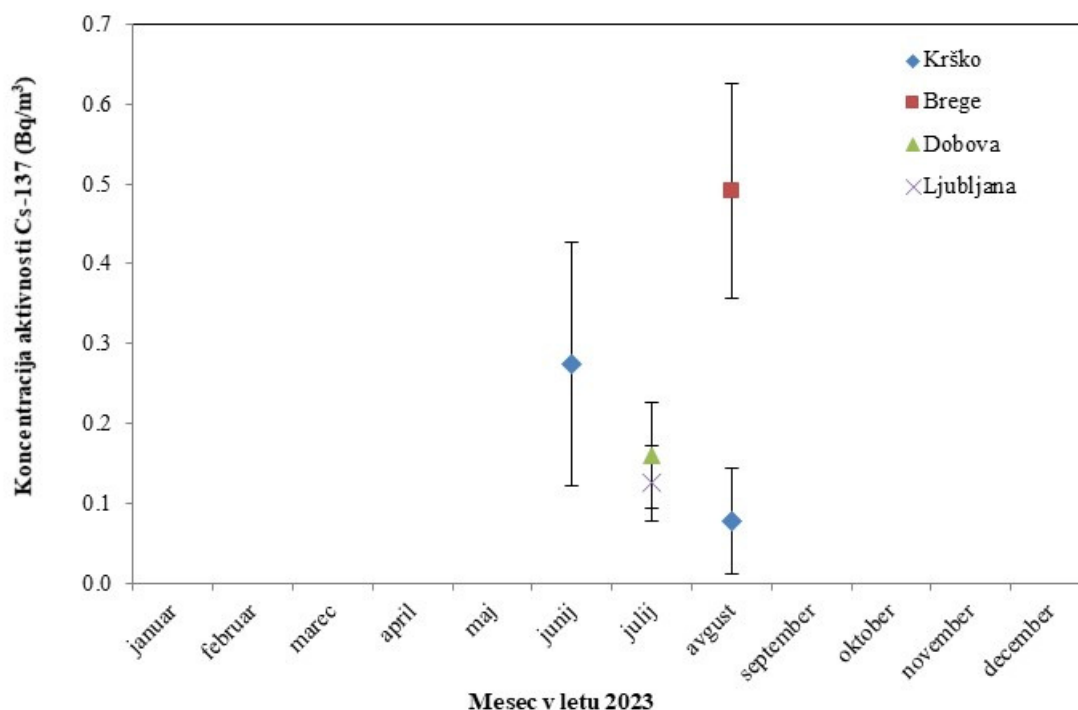
Vzorčevalno mesto	Letno povprečje padavinskega useda Be-7 (Bq/m ²)
Ljubljana	67 ± 1
Brege	36 ± 1
Krško	37 ± 1
Dobova	35 ± 1

Ogljik (C-14)

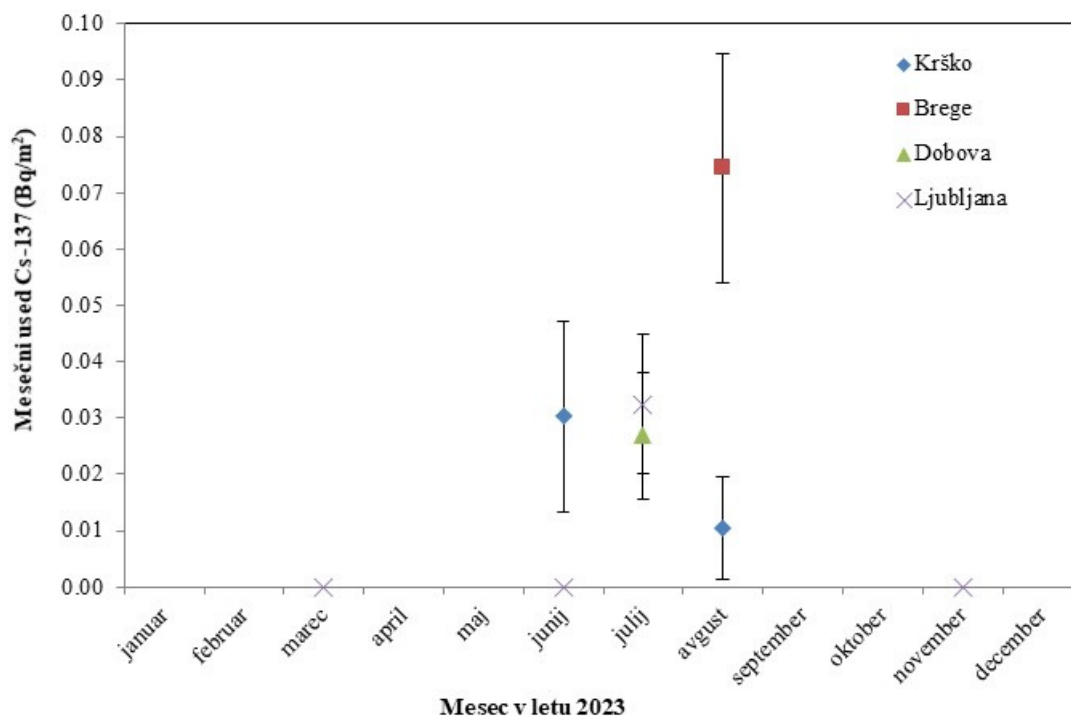
C-14 ni vključen v program meritev padavinskih vzorcev.

Cezij (Cs-137)

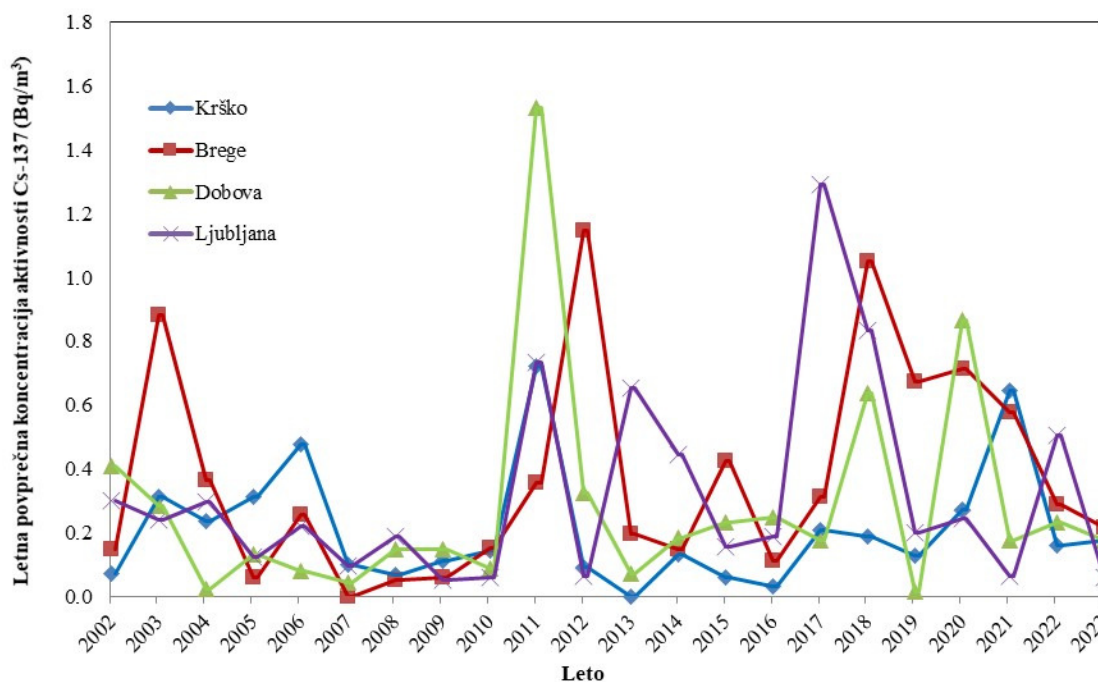
Mesečne koncentracije aktivnosti Cs-137 v padavinah v Krškem, Bregah, Dobovi in v Ljubljani so prikazane na sliki 3.5, padavinski used pa na sliki 3.6. V letu 2023 so bile vse izmerjene vrednosti pod 1 Bq/m³. V okviru negotovosti je večina vrednosti zelo podobnih. Na sliki 3.7 je prikazan večletni potek letnih padavinskih usedov za Cs-137. Vse vrednosti, ki jih izmerimo, so verjetno posledica vetrovne resuspenzije, lahko pa tudi posledica kurjenja s trdimi gorivi v zimskih mesecih [19]. Ker je koncentracija aktivnosti v primeru majhne količine vzorca zelo odvisna od števila prašnih delcev, vnešenih v deževnico zaradi resuspenzije, lahko te vrednosti močno nihajo in je težko razložiti letne spremembe. Izjema je leto 2011, kjer je izrazito povišanje posledica nesreče v Fukušimi, kar je vidno na vseh vzorčevalnih mestih (slika 3.7).



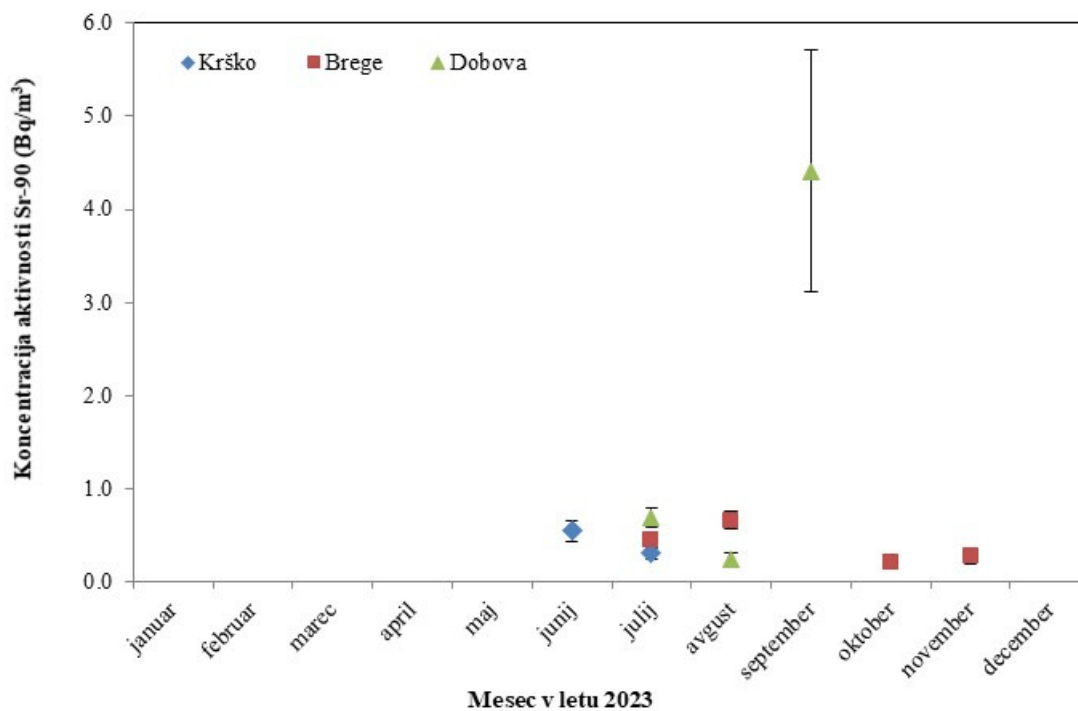
Slika 3.5: Mesečne koncentracije aktivnosti Cs-137 v padavinah v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani



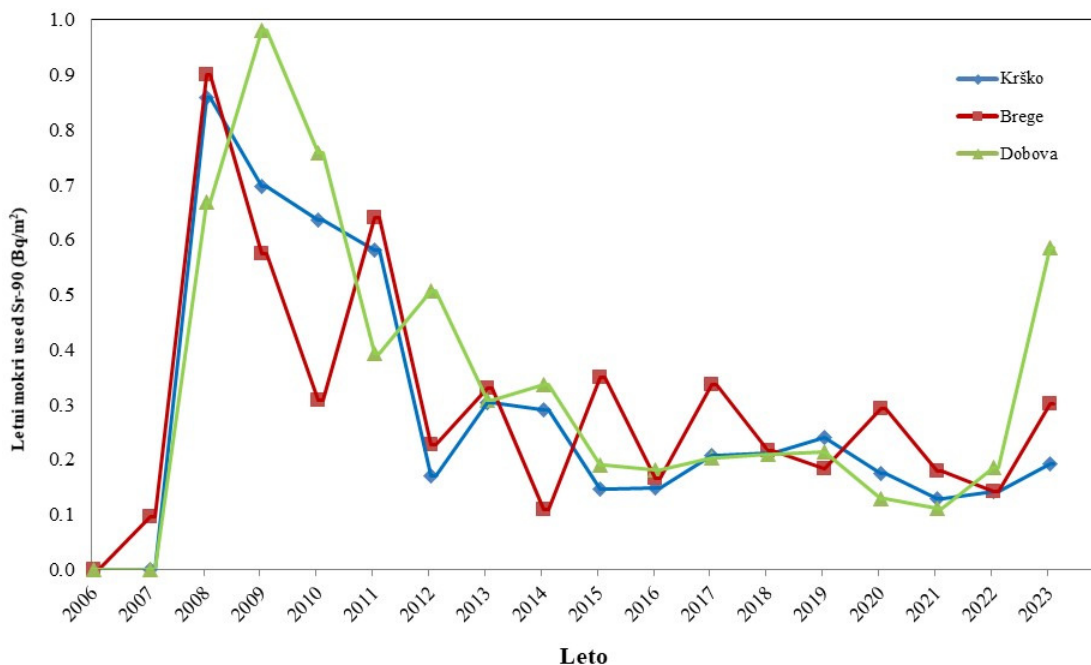
Slika 3.6: Mesečni padavinski used Cs-137 v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani



Slika 3.7: Letna koncentracija aktivnosti Cs-137 v padavinah za obdobje 2002–2023. Izrazito povišanje v letu 2011 na vseh vzorčevalnih mestih je posledica nesreče v Fukušimi.



Slika 3.9: Mesečne koncentracije aktivnosti Sr-90 v okolici NEK



Slika 3.8: Letni padavinski used Sr-90 za obdobje 2006–2023



Stroncij (Sr-90)

Mesečne koncentracije aktivnosti Sr-90 v padavinah v Krškem, Bregah in v Dobovi so prikazane na sliki 3.8, padavinski used pa na sliki 3.9. Za vzorčevalno mesto v Ljubljani, ki ni v sklopu rednega monitoringa NEK, se meritve aktivnosti Sr-90 ne izvajajo. Kot je razvidno iz slike, so bile vrednosti za Sr-90 v letu 2023 v prvem polletju pod mejo detekcije, v poletnih mesecih in v nekaj jesenskih vzorcih pa je bil Sr-90 zaznan v sledih (blizu meje detekcije). Ker so bili zračni izpusti Sr-90 iz NEK v letu 2023 zanemarljivi, lahko prisotnost omenjenega radionuklida pripišemo samo vetrovni resuspenziji. Dodatna potrditev izvora je, da je v večini primerov poleg Sr-90, zaznan tudi Cs-137. Oba omenjena radionuklida sta prisotna v zemlji kot posledica splošne kontaminacije.

Vrednosti v tabelah za nezaznane mesečne aktivnosti so izpeljane iz detekcijskih mej, kjer predpostavimo vrednost četrte detekcijske meje. Predpostavljene vrednosti so pomembne za izračun doznih obremenitev. Slika 3.8 prikazuje letne padavinske usede Sr-90 na vseh treh lokacijah v okolici NEK med letoma 2006 in 2023. Usedi oziroma njihove predvidene vrednosti so v letu 2023 primerljive z vrednostmi iz prejšnjih let.

Jod (I-131)

I-131 v padavinskih vzorcih in vzorcih suhega useda ni bil izmerjen.

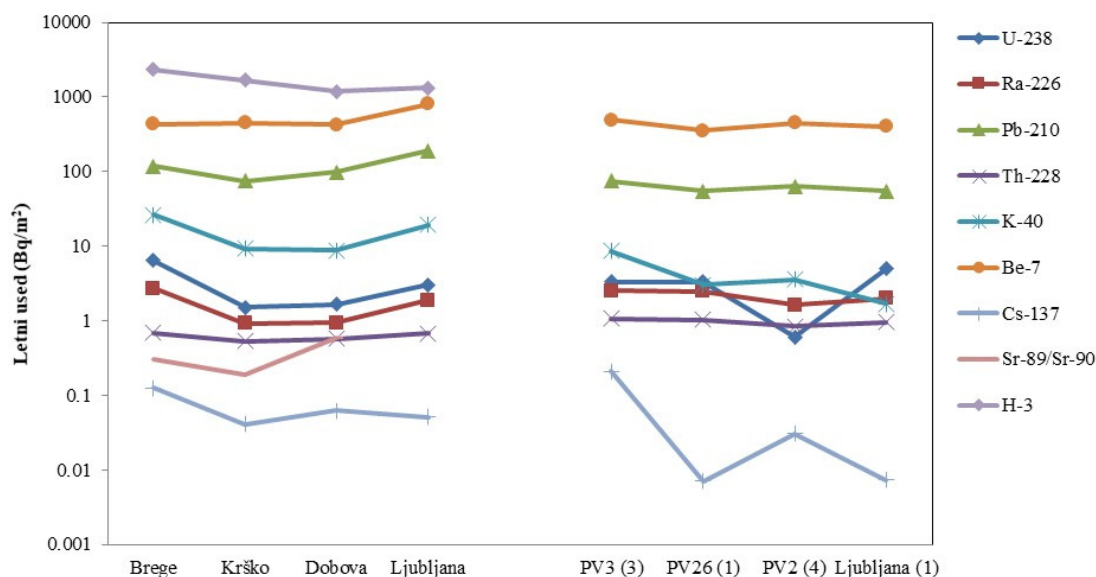
Suhi used

Rezultati meritev na vzorcih suhih usedov so prikazani v tabelah T-42/1 (širša okolica NEK), T-42/2 (daljna okolica NEK), T-42/3 (ožja okolica NEK) in T-42/4 (Ljubljana). Vse meritve je opravil IJS. Tabele z merskimi rezultati so na priloženi zgoščenci v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško - Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645*, marec 2024.

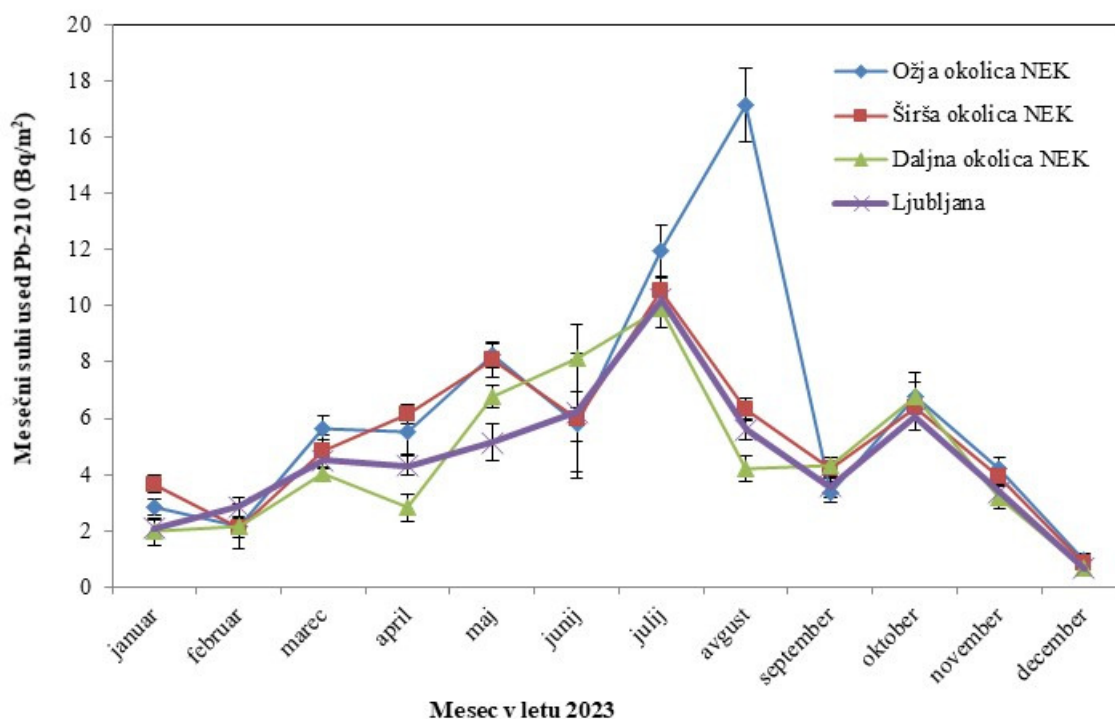
V vzorcih suhega useda so bili v letu 2023 izmerjeni Be-7, K-40, Cs-137 in potomci uranove in torijeve razpadne vrste. Analiza stroncija se na vzorcih z vazelinskih plošč ne izvaja. Na sliki 3.10 je primerjava med suhim in mokrim usedom na vseh lokacijah, kjer se izvaja vzorčenje.

Suhi used na vazelinskih ploščah v okolici NEK je primerljiv s suhim usedom v Ljubljani. Podobno velja tudi za padavinske usede.

Na sliki 3.11 je prikazan suhi used za Pb-210, ki zaradi velikega utežnega faktorja največ prispeva k izračunani letni dozi. Iz slike lahko ugotovimo zelo podoben časovni potek za vse štiri lokacije. Vrednosti za Ljubljano so v splošnem primerljive z vrednostmi za lokacije v okolici NEK. Najvišja vrednost v okolici Krškega je bila izmerjena v mesecu avgustu. Gre za lokalne posebnosti in tega ne moremo povezati z ujmo v začetku avgusta.



Slika 3.10: Letni usedi v padavinah, zbranih v lovilnikih deževnice (leva stran grafa) in na vazelinskih ploščah na različnih lokacijah okrog NEK (desna stran grafa) v letu 2023; PV2 (4): štiri vazelinske plošče v širši okolici NEK; PV26 (1): vazelinska plošča v daljni okolici NEK; PV (3): tri vazelinske plošče v ožji okolici NEK; Ljubljana (1): vazelinska plošča na dvorišču IJS.



Slika 3.11: Mesečni suhi usedi Pb-210 v Ljubljani, v širši in ožji okolici NEK ter na vzorčevalnem mestu, ki je najbolj oddaljeno od NEK (daljna okolica NEK)



OCENA UČINKOV

Letno efektivno dozo izračunamo iz mesečnega, četrtnega ali polletnega povprečja ob predpostavki, da je vnos hrane, vode ali zraka v človeški organizem vse leto konstanten. Oceno učinkov radioaktivnega useda ovrednotimo z efektivno dozo zaradi zunanjega sevanja in zaužitja¹¹. Efektivne doze zaradi zunanjega sevanja useda ocenimo s produktom letnega useda in doznega faktorja [4] za posamezen radionuklid ob predpostavki štiriurnega zadrževanja na prostem. V tabeli 3.4 so povzete sumarne vrednosti zunanjih doz. K dozi največ prispeva kozmogeni Be-7, ki se s padavinami izpira iz ozračja, in sicer med 76 % in 81 %. Celotna efektivna doza zaradi zunanjega sevanja useda za umetne radionuklide v okolici NEK je v letu 2023 za 71 % večja od vrednosti v letu 2022 in za 40% manjša, kot v letu 2021.

Tabela 3.4: Efektivne doze zaradi zunanjega sevanja iz useda v letu 2023 ob predpostavki zadrževanja na prostem 4 ure na dan. Vrednosti niso primerljive z oceno doze v poglavju *Zunanje sevanje*, saj tam ni upoštevano, da se referenčna oseba zadržuje 20 % časa na prostem in da je faktor ščitenja pri zadrževanju v hiši 0,1, kot je to v tem poglavju.

Starostna skupina	Radionuklidi	Okolica NEK (povprečje lokacij)	Ljubljana
		doza (μSv)	
ODRASLI OTROCI DOJENČKI	UMETNI	$(12 \pm 4) \text{ E-5}$	$(8 \pm 5) \text{ E-5}$
	VSI	$0,06 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$

Tabela 3.5: Efektivne doze zaradi zaužitja rastlin z usedlimi radionuklidi v letu 2023 za odrasle, otroke in dojenčke.

Starostna skupina	Masa zaužitega rastlinja (kg)	Radionuklidi	Okolica NEK (povprečje lokacij)	Ljubljana
			doza (μSv)	
ODRASLI	25	UMETNI	$0,016 \pm 0,003$	$0,010 \pm 0,001$
		VSI	26 ± 3	52 ± 1
OTROCI	15	UMETNI	$0,015 \pm 0,002$	$0,007 \pm 0,001$
		VSI	44 ± 6	86 ± 2
DOJENČKI	2,5	UMETNI	$0,046 \pm 0,008$	$0,02 \pm 0,001$
		VSI	195 ± 25	387 ± 8

Efektivna doza zaradi zunanjega sevanja umetnih radionuklidov prispeva v okolici NEK približno 0,1 % in v Ljubljani približno 0,2 % k celotni zunanji dozi, enako za vse starostne skupine. Tudi če vključimo v oceno izpuste iz NEK, so umetni radionuklidi pri računanju efektivnih doz zaradi zunanjega sevanja v letu 2023 zanemarljivi in celo nižji kot v Ljubljani.

¹¹ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejel najvišje doze.



Efektivno dozo zaradi zaužitja rastlin z usedlimi radionuklidi izračunamo s produktom koncentracije aktivnosti radionuklidov v masi 1 kg sveže rastline, ki jo zaužije človek, mase zaužitega rastlinja (25 kg za odraslo osebo, 15 kg za otroke in 2,5 kg za dojenčke) in doznega faktorja [4], [10], [63]. Pri tem šteje le used na zeleni del rastlin in posledični vnos radionuklidov v rastlino, medtem ko prevladujoči transport radionuklidov iz zemlje ni vštet. Obravnavan je v poglavju *Radionuklidi v hrani*. V izračunu ni upoštevano, da vse rastlinje pred zaužitjem operemo ali olupimo in tako odstranimo tudi do 90 % vseh radionuklidov na površini. Vrednosti so zbrane v tabeli 3.5.

Skupna efektivna doza zaradi zaužitja rastlin v letu 2023 je primerljiva z letom 2022: prispevek umetnih radionuklidov v okolici NEK je od 46 % do 60 % večji, prispevek naravnih radionuklidov pa za približno 33 % večji pri izračunu za odraslo osebo in otroka, pri dojenčku pa podobno kot prejšnje leto. Efektivna doza je bila v letu 2023 za umetne radionuklide v okolici NEK med 72 % in 127 % večja kot na lokaciji v Ljubljani in približno 50 % manjša za skupno efektivno dozo. K skupni efektivni dozi zaradi zaužitja rastlin tako v Ljubljani kot v okolici NEK največ prispeva naravni izotop Pb-210, in sicer kar do 98 % pri otrocih in odraslih in do 96 % pri dojenčkih. Efektivna doza od umetnih radionuklidov prispeva k celotni efektivni dozi zaradi zaužitja rastlin z usedlimi radionuklidi za odraslo osebo v okolici NEK okrog 0,06 %, v Ljubljani pa 0,02 %, kar je primerljivo s prejšnjimi leti. Za otroka in dojenčka je prispevek še manjši. Umetni radionuklidi so torej pri računanju zunanjih doz v letu 2023 zaradi vnosa s hrano zanemarljivi.

SKLEPI

V letu 2023 ni bilo posebnosti glede radionuklidov v padavinah in suhih usedih. Tritij je še vedno edini radionuklid iz zračnih izpustov NEK, ki je lahko neposredno zaznan v padavinah predvsem na Bregah in v Krškem (Stara Vas), a tudi ta po splošno uporabljani metodologiji ne vpliva na dozno obremenitev zaradi zunanjega sevanja.

Med umetnimi radionuklidi je bil v padavinah občasno ugotovljen Cs-137. Zaznan je bil v 10 % vzorcev padavin in v 19 % vazelinskih plošč. Letna povprečna koncentracija aktivnosti za Cs-137 je bila v letu 2023 v primerjavi z izmerjenimi vrednostmi iz leta 2022 nižja na vseh vzorčevalnih mestih. Vzrok za detekcijo Cs-137 v padavinah je najverjetneje talna resuspenzija in kurjenje trdih goriv v zimskih mesecih. Sr-90 je bil zaznan v 19% vzorcev padavin, v vazelinskih ploščah pa se meritve omenjenega radionuklida ne izvajajo. Tudi pri tem radionuklidu je vzrok za detekcijo talna resuspenzija, saj sta tako Sr-90 kot tudi Cs-137 prisotna v tleh zaradi splošne kontaminacije.

Če primerjamo prispevek umetnih in naravnih radionuklidov k celotni efektivni dozi, prispevajo predvsem slednji. Obremenitvi prebivalcev v okolici NEK in na referenčni točki v Ljubljani sta primerljivi, učinek izpustov iz NEK pa je zanemarljiv.





4 ZRAK

POVZETEK

V poglavju so predstavljeni in ovrednoteni rezultati meritev plinastih in aerosolnih vzorcev iz okolja ter aerosolnih filtrov za vzorčenje zraka na ventilacijskem izpustu NEK. Ocena učinka na prebivalstvo, izračunana za zračno prenosno pot, je bila narejena na podlagi meritev zračnih izpustov (emisij) in z uporabo razredčitvenih faktorjev Lagrangeevega modela, kjer iz izračunanih koncentracij radionuklidov in njihovih pretvorbenih faktorjev ocenimo dozo zaradi imisij NEK, t.i. imisijsko dozo. Modelna ocena daje oceno efektivne letne doze za odraslo osebo v naselju Spodnji Stari Grad 12,6 nSv, na ograji NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja) pa 23,5 nSv, in zajema vse izpuščene radionuklide. Lokacije vzorčenja imisij so bile v okviru rednega nadzora radioaktivnosti zraka v okolici NEK v letu 2023 enake kot prejšnja leta. Za primerjavo ocenjujemo tudi efektivne doze zaradi koncentracij aktivnosti radionuklidov v okolju, t.i. okoljsko dozo, bodisi naravnih bodisi umetnih radionuklidov, ki so posledica globalne kontaminacije zaradi jedrskih poskusov in nesreč. Ocenjene letne efektivne okoljske doze prebivalcev na podlagi meritev radioaktivnosti z aerosolnimi filtri zaradi inhalacije (vdihavanja) in imerzije (zunanjšega sevanja) umetnih radionuklidov (0,08 nSv) so zanemarljive in več velikostnih redov nižje od letne efektivne doze, ki jo zaradi inhalacije povzročajo naravni radionuklidi (30 μ Sv). V dozah zaradi naravnih radionuklidov ni upoštevan prispevek kratkoživih potomcev radona. Efektivna doza, izračunana iz meritev v okolju, vključuje le globalna kontaminanta Cs-137 in Sr-90.

UVOD

Zračni izpusti jedrske elektrarne imajo skupaj s tekočimi izpusti neposreden vpliv na okolje in ljudi, ki živijo v okolici takšnega objekta. Za nadzor zračnih izpustov opravljamo spektrometerske analize aerosolnih filtrov za vzorčenje zraka na glavnem ventilacijskem izpustu NEK tik pred izpustom v okolje (emisijske meritve) ter aerosolnih in ogljenih filtrov za prečrpavanje zraka v okolju (okoljske meritve). Izmerjene emisije ali aktivnosti radionuklidov na izviru so vhodni podatki za modelne izračune, s katerimi napovedujemo porazdelitev in aktivnost radionuklidov v okolju na podlagi sodobnih modelov, ki najbolje upoštevajo sprotne izmerjene meteorološke parametre v preteklem letu, konfiguracijo terena in druge značilnosti v okolici obravnavanega objekta. Pri oceni doz zaradi okoljske radioaktivnosti se uporabljajo izmerjene koncentracije na okoliških zračnih črpalkah, medtem ko so pri oceni doz zaradi emisij NEK privzete modelsko določene koncentracije (imisije). Neodvisni laboratoriji vzorčijo okoljske vzorce in tako preverjajo vpliv elektrarne na okolje in ljudi.

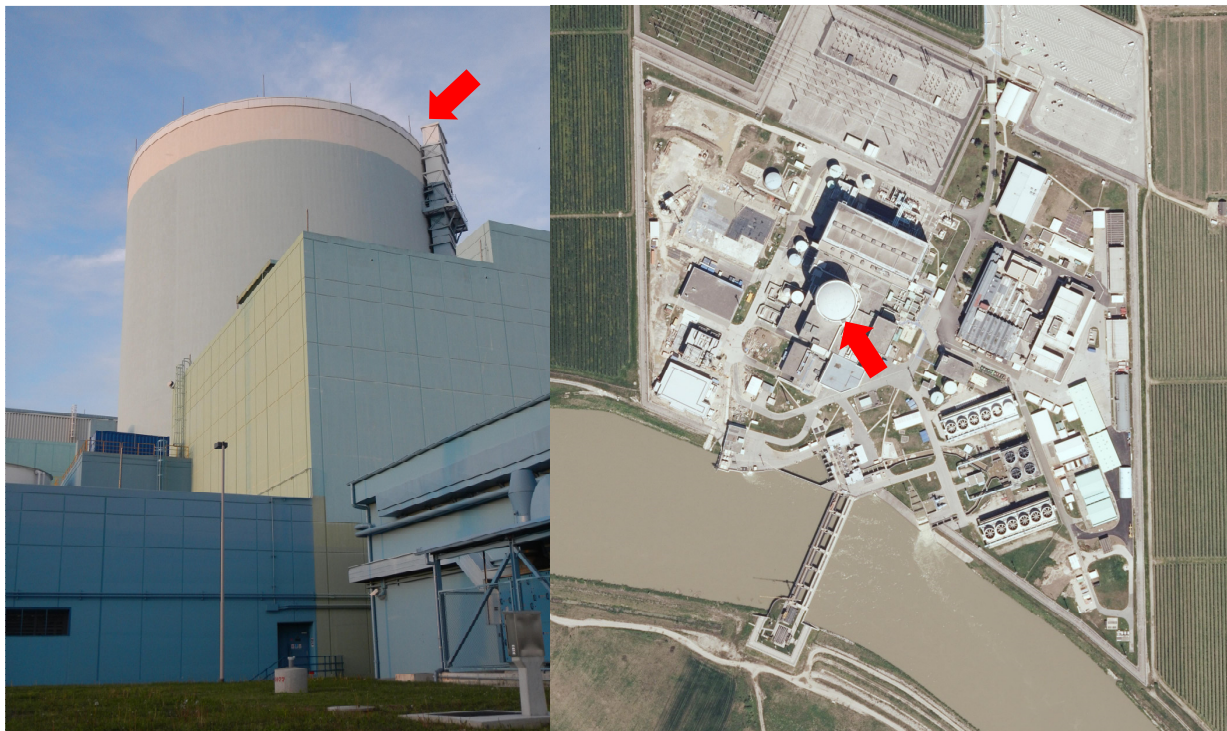
VZORČENJE EMISIJ IN MODELIRANJE

Vzorčenje emisij NEK se opravlja na ventilacijskem izpustu z odvzemom reprezentativnega vzorca, ki se črpa skozi več merilnikov sevanja in vrača v ventilacijski izpust. Ločeno se vzorčijo tritij (H-3), ogljik (C-14) in Sr-90 za specifične analize s scintilacijskim spektrometrom beta ter aerosoli za izotopsko analizo sevalcev s spektrometrijo gama (aerosolni filtri v monitorju RM-24). Meritev žlahtnih plinov poteka neprekinjeno v posebnem merilnem zbiralniku. Vzorčenje in specifične analize tritija (H-3) in ogljika (C-14) je opravil IJS, meritve vzorcev filtrov za vzorčenje aerosolov na ventilacijskem izpustu pa NEK in IJS. V NEK so izvedene tudi meritve emisij joda ter žlahtnih plinov.

Koncentracije aktivnosti joda (I-131), tritija (H-3), ogljika (C-14) in aerosolov ter žlahtnih plinov na izbranih lokacijah v okolici NEK se ugotavljajo z uporabo Lagrangeevega disperzijskega modela Spray [56]–[59], saj meritve na lokacijah zaradi razredčenja niso praktično mogoče, ker so koncentracije radioaktivnosti imisij zanemarljivo nizke v primerjavi s koncentracijami radioaktivnosti v okolju, ki so posledica globalne kontaminacije zaradi jedrskih poskusov in nesreč. Meritve aerosolov in I-131 v okolju se izvajajo na osmih lokacijah v okolici NEK (Spodnji Stari Grad, Krško - Stara vas, Leskovec, Brege, Vihre, Gornji Lenart, Spodnja Libna in Dobova) na različnih oddaljenostih od glavnega izpuha NEK, kar



omogoča spremljanje razširjanja zračnih izpustov v vseh smereh (jod I-131 se v Dobovi ne vzorči). Poudariti je treba, da so v okolici NEK pogoste spremembe smeri vetra tudi večkrat na dan, hitrost vetra je nizka, prevladujoči smeri razširjanja sta zahod-jugozahod in vzhod-jugovzhod. Kontrolne meritve aerosolov v okolju so bile opravljene z vzorci, ki so bili pridobljeni z vzorčenjem na lokaciji v Ljubljani.



Slika 4.1: Lokacija glavnega ventilacijskega izpuha NE Krško (označena s puščico)

Efektivne doze zaradi emisij NEK so izračunane na podlagi modelskih izračunov (imisijske doze) in za primerjavo še iz izmerjenih koncentracij aktivnosti radionuklidov v okolju (efektivne okoljske doze¹²) torej na lokacijah, kjer so postavljene aerosolne črpalke. Metodologija računanja doz je predstavljena v postopku *Ocena sevalnih obremenitev (LMR-RP-01)*.

OKOLJSKI VZORCI

Značilnosti vzorčenja

Vzorčenje in meritve radioaktivnosti zraka v okolici Nuklearne elektrarne Krško se izvajajo v okviru obratovalnega nadzora radioaktivnosti. Tega mora v skladu s 111. členom *Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-1)* [7] zagotavljati upravljalec jedrskega objekta. Podobno kot spremljamo radioaktivnost v okolju v Sloveniji, jo spremljajo tudi v drugih državah članicah EU, saj to zahteva 35. člen pogodbe EURATOM [64].

Vzorčenje radioaktivnosti v zraku - aerosolov in I-131 (radioaktivnost zraka v okolju)¹³ je v letu 2023 potekalo na podoben način kot v preteklih letih, kar zagotavlja primerljivost z rezultati iz prejšnjih poročil oz. evalvacij.

Aerosole smo vzorčili na osmih mestih v okolici NEK (slika 4.2): Spodnji Stari Grad – AE1 (1,5 km), Krško - Stara vas – AE2 (2,0 km), Leskovec – AE3 (3 km), Brege – AE4 (2,3 km), Vihre – AE5 (2,9 km), Gornji Lenart – AE6 (5,9 km), Spodnja Libna – AE7 (1,7 km) in Dobova – AE8 (12 km). Na istih mestih

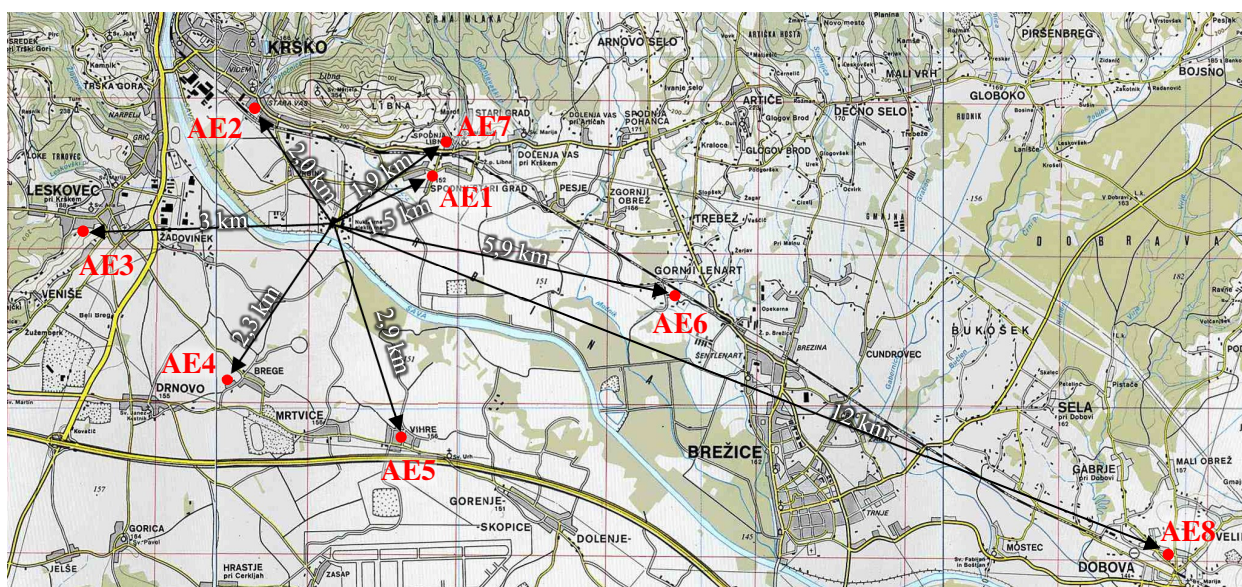
¹² Efektivna okoljska doza je izračunana iz izmerjenih koncentracij aktivnosti radionuklidov v okolju.

¹³ Radioaktivnost zraka v okolju združuje prispevke imisij NEK, globalnega onesnaženja in naravnega ozadja.



kot vzorčenje aerosolov je potekalo vzorčenje I-131 z izjemo lokacije v Dobovi. Vzorčenje za specifično meritev Sr-90 se je izvajalo v Stari vasi. Kontrolne meritve aerosolov so bile opravljene z vzorci, ki so bili pridobljeni z vzorčenjem na lokaciji v Ljubljani na dvorišču Instituta "Jožef Stefan" v okviru programa nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v RS [19].

Vzorčenje aerosolov je potekalo z neprekinjenim prečrpavanjem zraka skozi aerosolne filtre. Ti se menjajo vsakih 15 dni, pri čemer se skozi prečrpa najmanj 10 000 m³ zraka mesečno. V Dobovi in na dvorišču IJS v Ljubljani (slika 4.3) poteka vzorčenje z visoko zmogljivimi zračnimi črpalkami, ki skozi filtre mesečno prečrpajo od 100 000 m³ do 150 000 m³ zraka. Izotopska analiza aerosolov se izvaja na sestavljenih mesečnih vzorcih z visokoločljivostno spektrometrijo gama. Vzorčenje in meritve vzorcev na vseh osmih mestih ter vzorčenje in meritve v Ljubljani je opravil IJS.



Slika 4.2: Načrt okolice NE Krško z vrisanimi okvirnimi lokacijami zračnih črpalk



Slika 4.3: Poleg zračnih črpalk v okolici NEK sta visoko zmogljivi črpalke v Ljubljani in v Dobovi



Zaradi specifičnih lastnosti I-131 in njegovih spojin je vzorčenje I-131 potekalo ločeno s črpalkami z manjšim pretokom in s posebnimi filtri iz steklenih mikrovlaknen in aktivnega oglja, prepojenega s trietilendiaminom. Filtri zbirajo atomski in molekularni jod (I , I_2), metiljodid (CH_3I), HI, HOI in jod, vezan na aerosole. Črpanje je neprekinjeno, filtri se menjajo vsakih 15 dni, skozi se prečrpa od 1 000 m³ do 1 400 m³ zraka. Specifična meritev adsorbiranega I-131 se izvaja z visokoločljivostno spektrometrijo gama. Vzorčenje in specifične meritve joda je opravil IJS.

Značilnosti meritev okoljskih vzorcev

Aktivnosti sevalcev žarkov gama in rentgenskih žarkov (to so vsi radionuklidi, navedeni v tabelah, razen Sr-89/Sr-90 in H-3) so bile izmerjene s spektrometrijo gama. Vsi spektrometri gama, ki so bili uporabljeni za meritve, ustrezajo kriterijem, ki so navedeni v *Pravilniku o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8]. Meritve so bile opravljene po postopku *LMR-DN-10*. Rezultati meritev so sledljivi k aktivnostim primarnih standardov pri NIST, ZDA. Sistematski vplivi geometrije vzorca, matrike vzorca, gostote vzorca, koincidenčnih popravkov in hitrosti štetja na rezultate so upoštevani pri računu vseh aktivnosti. Negotovosti rezultatov so ocenjene v skladu z vodilom GUM [44] in postopkom *LMR-RP-05*.

Ugotavljanje stroncija v okoljskih vzorcih temelji na raztapljanju vzorca v ustreznih raztopinah. V radiokemični separaciji ločimo stroncij od kalcija s kadečo se dušikovo kislino, po kateri nato sunke zaradi stroncija štejemo na proporcionalnem števcu. Izkoristek separacije določimo gravimetrično s tehtanjem oborine SrCO₃. Natančni postopek ugotavljanja Sr-89/Sr-90 s štetjem beta je opisan v standardnih delovnih navodilih *SDN-O2-STC(01)* in *DP-O2-STC(01)*.

REZULTATI MERITEV IN TIPIČNI ČASOVNI POTEKI

Rezultate meritev aerosolov na lokacijah na krško-brežiškem polju prikazujemo v tabelah od T-44 (Spodnji Stari Grad), T-45 (Krško – Stara Vas), T-46 (Leskovec), T-47 (Brege), T-48 (Vihre), T-49 (Gornji Lenart), T-50 (Libna) do T-51 (Dobova). V tabeli T-52 so prikazani rezultati meritev v Ljubljani, na dvorišču IJS, vzeti iz programa nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v RS v letu 2023 [19]. Imisijske meritve oglenih filtrov, na katere se ulovijo plinasti izpusti I-131, so prikazane v tabeli T-43. Tabele z merskimi rezultati so na priloženi zgoščenci v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško - Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645* marec 2024. Pokaže se, da letno dozo lahko ocenimo iz danega mesečnega, četrletnega ali polletnega povprečja ob predpostavki, da je vnos hrane, vode ali zraka v telo in organizem človeka konstanten skozi celo leto. Pri vzorcih zraka je takšna predpostavka utemeljena.

V letu 2023 je bil izredni remont NEK, ki je trajal od 6. 10. 2023 do 15. 11. 2023: tako je NEK v 33. gorivnem ciklu do predvidenega naslednjega remonta v aprilu 2024. V času med remontom in po njem so navadno izpusti večji kot med rednim obratovanjem, kar velja za izpuste tritija (H-3), ogljika (C-14), joda in žlahtnih plinov.

Iz podatkov o meritvah vsebnosti plinov v izpuhu NEK, ki sta jih opravila NEK in IJS, ter iz podatka o nominalnem dnevnem izpuhu skozi glavni oddušnik (45,4 m³/s oziroma 163 583 m³/h oziroma 3 926 000 m³ na dan) so bile določene mesečne in letne emisije posameznih radionuklidov. Podatki so vzeti iz programa meritev plinastih efluentov (izvajalec IJS) [6] in podatkov o meritvah filtrov RM-24 na izvihu, ki jih je posredoval NEK [5].

Tritij (H-3)

Tritija v zraku v okolju še ne merimo oziroma ni v programu meritev. Prisotnost tritija ocenjujemo z modelom razširjanja snovi po zraku na podlagi meritev na izvihu.



Ogljik (C-14)

C-14 v zraku v okolju ne merimo oziroma ni v programu meritev obratovalnega nadzora. Prisotnost C-14 ocenjujemo z meritvami v okolju ob ograji NEK, ki je v izključitvenem območju, vendar rezultati meritev niso del programa obratovalnega nadzora. Vsebnost C-14 v zraku se ocenjuje tudi z modelom razširjanja snovi po zraku na podlagi meritev na izviru.

Cezij (Cs-137) in stroncij (Sr-90)

Od umetnih radionuklidov je bil v letu 2023 v aerosolih, zbranih na filtrih zračnih črpalk, zaznan le Cs-137, medtem ko so bile koncentracije Sr-90 v vseh četrletnih meritvah pod mejo detekcije. Njena prisotnost v okolju je sicer posledica globalne kontaminacije, medtem ko je prispevek emisij NEK po modelni oceni nemerljiv. Izmerjene povprečne koncentracije aktivnosti Cs-137 v letu 2023 na posameznih merilnih mestih v okolici NEK, v Ljubljani in lokacijah v okviru nadzora radioaktivnosti v Republiki Sloveniji, so prikazane v tabeli 4.1. Za primerjavo so prikazana tudi večletna povprečja za posamezno lokacijo. Meritve aerosolov v okviru republiškega programa potekajo na lokacijah v Ljubljani (Institut "Jožef Stefan") in v Predmeji; dolgoletna merilna lokacija na Jareninskem vrhu je bila z letom 2018 zamenjana za Mursko Soboto (ZVD, Zavod za varstvo pri delu) ([15], [19]). Iz tabele 4.1 lahko razberemo, da so bile povprečne koncentracije aktivnosti Cs-137 na lokacijah v okolici NEK v letu 2023 nižje od dolgoletnih povprečij. Opažamo trend, da se na vzorčevalnih lokacijah kljub podobnim prečrpanim volumnom čedalje manjkrat izmerijo koncentracije Cs-137 nad mejo detekcije ali kvantifikacije. Povprečje po vseh lokacijah v okolici NEK za leto 2023 je približno dvakrat nižje kot drugod po Sloveniji. Večletno povprečje na Bregah (tabela 4.1) je za približno polovico višje od drugih lokacij v okolici NEK ali od vrednosti v Ljubljani in drugod po Sloveniji. Anomalijo lahko pripišemo okoljskim posebnostim na tej lokaciji. V letu 2023 so bile vse izmerjene koncentracije aktivnosti Cs-137 na Bregah pod mejo detekcije ali mejo kvantifikacije.

Tabela 4.1: Primerjava večletnih povprečij izmerjenih mesečnih koncentracij aktivnosti Cs-137 v aerosolih v okviru nadzora radioaktivnosti v okolici NEK in v Republiki Sloveniji s podatki za leto 2023

Lokacija	Od 2005 do 2022	2023
	Koncentracija aktivnosti (Bq/m ³)	
Spodnji Stari Grad	1,3E-06 ± 2E-07	5,4E-07 ± 8E-07
Stara vas	1,4E-06 ± 2E-07	2,1E-07 ± 9E-08
Leskovec	1,5E-06 ± 1E-07	1,7E-07 ± 1E-07
Brege	2,0E-06 ± 2E-07	ni izmerjeno**
Vihre	1,2E-06 ± 3E-07	3,4E-08 ± 1E-07
Gornji Lenart	1,1E-06 ± 2E-07	2,4E-07 ± 2E-07
Spodnja Libna	1,1E-06 ± 3E-07	3,7E-07 ± 1E-07
Dobova	1,3E-06 ± 2E-07	6,3E-07 ± 5E-08
Povprečje NEK	1,1E-06 ± 2E-07	2,1E-07 ± 2E-07
Ljubljana	1,7E-06 ± 7E-08	9,5E-07 ± 7E-08
Murska Sobota	1,1E-06 ± 8E-07*	8,5E-7 ± 2E-7
Predmeja	2,5E-06 ± 8E-07	6,3E-7 ± 1E-7

* Samo od leta 2018 dalje

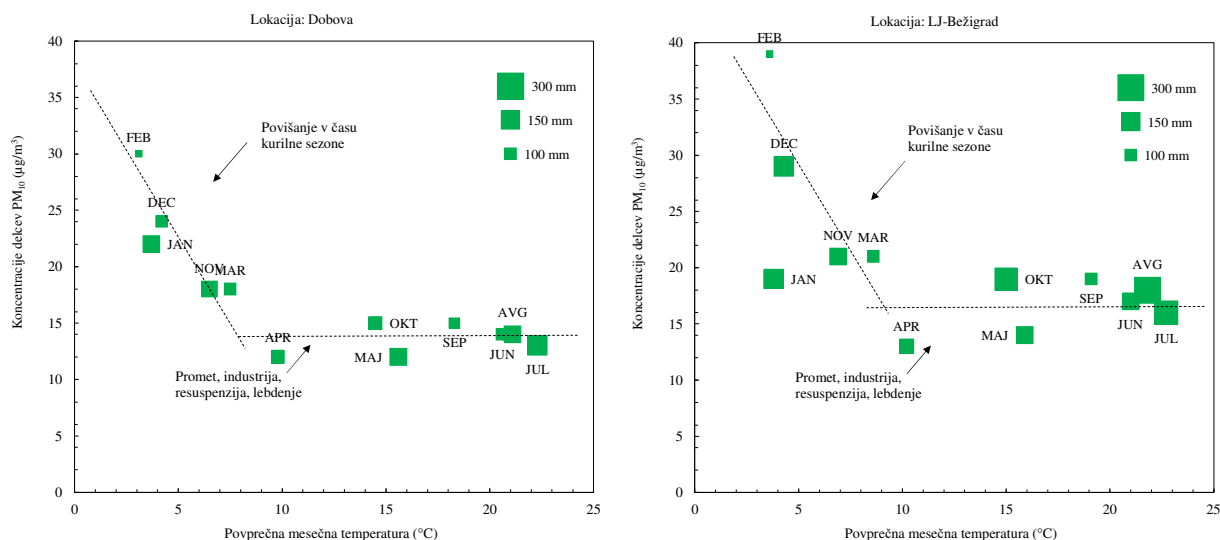
** Vse meritve so bile pod mejo detekcije ali mejo kvantifikacije



Tabela 4.2: Primerjava povprečij izmerjenih mesečnih koncentracij aktivnosti radionuklidov v aerosolih v okviru nadzora radioaktivnosti v okolici NEK in v Republiki Sloveniji za leto 2023

Vzorč.mesto	MURSKA SOBOTA*	PREDMEJA*	LJUBLJANA	POVPREČJE KRAJEV V OKOLICI NEK
IZOTOP	Povprečne mesečne koncentracije aktivnosti (Bq/m ³)			
Na-22			3,6E-07 ± 4E-08	9,0E-08 ± 1E-07
U-238	2,4E-06 ± 7E-07	1,5E-06 ± 1E-06	1,3E-06 ± 9E-07	7,1E-06 ± 3E-06
Ra-226	2,1E-06 ± 3E-07	2,6E-06 ± 5E-07		8,5E-07 ± 7E-07
Pb-210	8,7E-04 ± 3E-04	6,6E-04 ± 2E-04	7,9E-04 ± 1E-05	4,9E-04 ± 2E-04
Ra-228	7,3E-07 ± 3E-07	5,2E-07 ± 2E-07	7,3E-09 ± 9E-08	3,6E-06 ± 2E-06
Th-230			9,2E-07 ± 2E-06	2,8E-06 ± 4E-06
Th-228	9,9E-07 ± 3E-07	1,7E-06 ± 6E-07	1,4E-06 ± 1E-07	4,2E-06 ± 1E-06
K-40	3,0E-04 ± 3E-05	2,7E-04 ± 1E-05		
Be-7	3,1E-03 ± 4E-04	2,8E-03 ± 3E-04	4,2E-03 ± 6E-05	2,5E-03 ± 1E-03
I-131				
Cs-134				
Cs-137	8,5E-07 ± 2E-07	6,3E-07 ± 1E-07	1,0E-06 ± 5E-08	2,1E-07 ± 2E-07
Co-58				
Co-60				
Cr-51				
Mn-54				
Zn-65				
Nb-95				
Ru-106				
Sb-125				
Sr-89/Sr-90	Meritev ni v programu	Meritev ni v programu	Meritev ni v programu	1,3E-07 ± 5E-08

* Rezultati iz programa nadzora radioaktivnost v življenjskem okolju Republike Slovenije



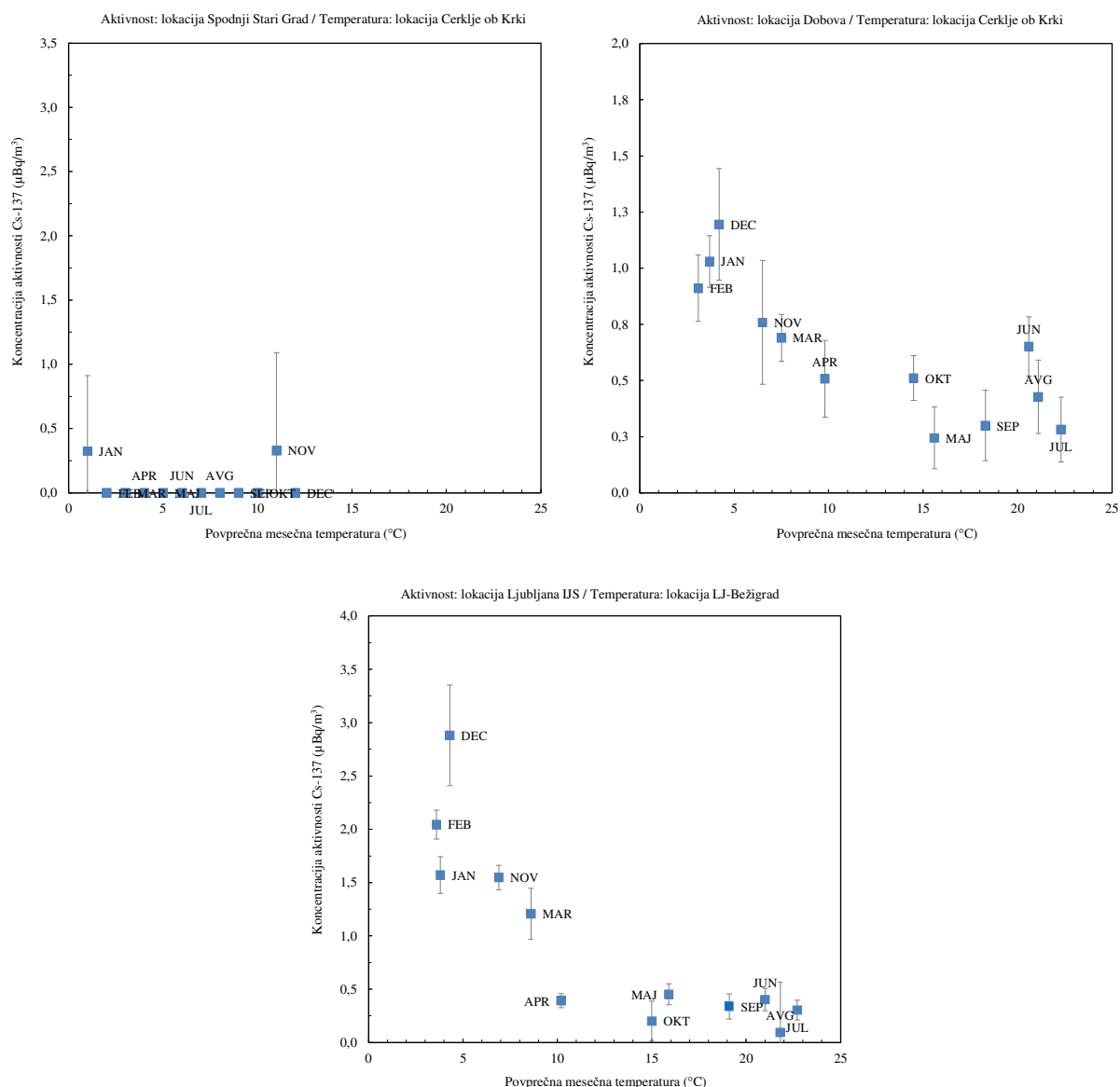
Slika 4.4: Korelacija prašnih delcev PM₁₀ v zraku s povprečnimi mesečnimi temperaturami – Dobova in Ljubljana. Izrazito povišanje koncentracij PM₁₀ je prisotno v hladnejših mesecih.

V izmerjenih povprečnih koncentracijah aktivnosti Cs-137 na filtrih vzorčevalnih črpalk je samo majhen del posledica resuspenzije Cs-137 iz zemlje. Iz literature ([65], [66], [2]) lahko namreč sklenemo, da je prispevek h koncentraciji aktivnosti Cs-137 v zraku v hladnih mesecih v veliki meri posledica uporabe trdih goriv (predvsem drv, briketov in peletov), kar najbolje predstavljajo prašni delci PM₁₀, in posledičnega sproščanja v njih prisotnega černobilskega Cs-137 v okolje. V toplejših mesecih pa je prispevek kurjenja



manj izrazit in je aktivnost najverjetneje posledica več dejavnikov: v največji meri resuspenzije s tal in lebdenja delcev v ozračju, v manjši meri pa prometa in industrije. Takšna odvisnost prašnih delcev od temperature je prikazana za lokaciji Dobova in Ljubljana na sliki 4.4. Zaradi izpiranja prašnih delcev ima na koncentracijo PM10 velik vpliv tudi količina padavin, kjer površina točk na grafu predstavlja količino mesečnih padavin.

Zato lahko potrdimo tudi močno temperaturno korelacijo s koncentracijami Cs-137 v zraku, ki je lepo vidna na sliki 4.5 za lokaciji Ljubljana in Dobova (visoko zmogljive črpalke). V letu 2023 sta bili na lokaciji Spodnji Stari Grad samo dve meritvi nad mejo detekcije oziroma kvantifikacije, zato smiseln komentar ni možen. Vseeno lahko potrdimo, da so izmerjene koncentracije Cs-137 v Sloveniji in tudi v okolici NEK (meritve prejšnjih let) posledica okoljske radioaktivnosti zaradi černobilske nesreče.



Slika 4.5: Sezonska odvisnost koncentracij Cs-137 v zraku – Spodnji Stari Grad, Dobova in Ljubljana. Na večini lokacij okrog NEK so zaradi manjših prečrpanih volumnov vrednosti koncentracij Cs-137 zelo blizu meje detekcije ali kvantifikacije (v letu 2023 na lokaciji Spodnji Stari Grad samo dve meritvi nad mejo), v Dobovi in Ljubljani vzorčenje poteka z visoko pretočnima črpalčkama, zato je korelacija med koncentracijo in povprečno mesečno temperaturo izrazitejša.



V okviru rednega nadzora življenjskega okolja v RS v letu 2023 smo vzorčili domača drva, pelete oziroma brikete ali tiste iz uvoza (Hrvaška in Slovenija) ([16], [19]). Specifične aktivnosti Cs-137 so bile od 0,5 Bq/kg do 27,2 Bq/kg. Iz podatkov o vsebnosti Cs-137 v lesnih kurivih lahko informativno ocenimo koncentracijo aktivnosti Cs-137 v zraku v bližini kurišč (do 500 m). V Sloveniji se približno četrtnina (23 %) od okrog 800 000 gospodinjstev ogreva z lesno biomaso. Pri letni porabi okrog 1 200 kt za celotno Slovenijo je povprečna poraba slovenskega gospodinjstva, ki se ogreva le z lesno biomaso, okrog 5 800 kg na leto. Na podlagi teh podatkov in ob upoštevanju povprečne specifične aktivnosti 1,0 Bq/kg za 8 vzorcev iz programa, ([16], [19]) lahko ugotovimo, da je skupna letna izpuščena aktivnost Cs-137 v lesnih kurivih na gospodinjstvo 32 kBq. Ob zelo grobih predpostavkah, da se v okolje izpusti celotna količina Cs-137 pri zgorevanju lesa v peči, ob uporabi informativne vrednosti razredčitvenega faktorja na razdalji 500 m $\chi/Q=10^{-4}$ s/m³ (talni izpust) [19] in konstantnega izpusta s hitrostjo aktivnosti $3,1 \cdot 10^{-3}$ mBq/s (predpostavili smo, da se peleti skurijo v 4 mesecih), dobimo oceno za koncentracijo aktivnosti Cs-137 v zraku 0,31 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ v bližini hiše, kjer se za ogrevanje uporablja peč na trda goriva. Ta vrednost je nižja od povprečne koncentracije aktivnosti Cs-137 v zraku v Dobovi za tri zimske mesece v letu 2023, ki je 1,0 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Če upoštevamo prispevke nekaj gospodinjstev hkrati, pa dobimo že zelo primerljive vrednosti enakega velikostnega reda.

Stroncij (Sr-90)

Meritve stroncija Sr-90 v okolju se izvajajo v trimesečnih sestavljenih vzorcih. V letu 2023 so bile meritve opravljene v Stari vasi, vsi izmerki pa so bili pod mejo kvantifikacije. Ocenjena povprečna koncentracija aktivnosti v letu 2023 je bila 0,13 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Večletno povprečje koncentracije aktivnosti za Sr-90 v Dobovi (prejšnja lokacija vzorčenja) je 0,65 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. V zračnih izpustih NEK je bil v letu 2023 Sr-89/Sr-90 sicer zaznan.

Jod (I-131)

Mesečne koncentracije aktivnosti I-131 v zraku (ogleni filtri, tabela T-43) ali v aerosolih (tabele T-44 do T-51) so bile v leto 2023 pod mejo detekcije.

Drugi aktivacijski in fisijski produkti

Med obratovanjem so bili v izpuhu NEK v letu 2023 zaznani izpusti Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Se-75, Te-127m, Cs-134, Cs-137 in Sr-89/Sr-90, vendar teh radionuklidov, z izjemo Cs-137, nismo zaznali na nobenem od sedmih merilnih mest v okolici NEK, kjer so postavljene kombinirane črpalke, niti v Ljubljani. Cs-137 v zraku, izmerjen v zračnih filtrih, je posledica okoljske radioaktivnosti. Zračni izpusti so navedeni v tabeli 4.4.

Naravni radionuklidi

Rezultate meritev naravnih radionuklidov v aerosolih v okolju na posameznih mestih je težko povezati v smiselne sklepe (tabela 4.2), saj so koncentracije aktivnosti radionuklidov lahko odvisne od vremenskih, geografskih in/ali geoloških razmer. Pri Be-7 in Pb-210 je ujemanje v okviru negotovosti povprečja dobro. Povprečna koncentracija aktivnosti Be-7 v letu 2023 v okolici NEK je bila 2 511 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, Pb-210 pa 494 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. V Ljubljani sta bili ustrezni vrednosti 3 646 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ in 789 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, v Murski Soboti 3 139 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ in 867 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ in na Predmeji 2 836 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ in 659 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Za kozmogeni Be-7 ugotavljamo, da je bila v okviru negotovosti povprečij na vseh vzorčevalnih mestih v okolici NEK, Murski Soboti, na Predmeji in v Ljubljani izmerjena primerljiva vrednost. Podobno velja tudi za Pb-210. Taka ugotovitev je pričakovana predvsem za lokacije s podobnim padavinskim režimom in ustrezno podobnim izpiranjem aerosolov iz ozračja ter prehajanjem zračnih mas iz višjih plasti atmosfere. Letna količina padavin v okolici NEK je tipično za okrog 31 % nižja kot v Ljubljani, kot kaže večletno povprečje [90]: v letu 2023 pa jih je bilo za okrog 34 % manj.



Pri drugih naravnih radionuklidih so razlike med posameznimi merilnimi mesti v okolici NEK, v Ljubljani in drugih lokacijah po Sloveniji večje (tabela 4.2). Neujemanje lahko pripišemo različni sestavi tal, bližini obdelovalnih polj ter neupoštevanju izhajanja radona iz vzorca pri meritvah Ra-226 za vzorce iz Predmeje in Murske Sobote ter uporabi zračnih črpalk z različnimi pretoki. Meritve koncentracije aktivnosti radionuklidov v aerosolih v Ljubljani se zaradi najbolj zmogljive črpalke v primerjavah uporabljajo kot referenčne. Zračna črpalka na vzorčevalnem mestu v Ljubljani prečrpa približno desetkrat več zraka kot črpalka v okolici NEK, razen v Dobovi, kjer je enaka črpalka kot v Ljubljani. Ob upoštevanju teh dejstev lahko sklenemo, da so vrednosti naravnih radionuklidov v zraku v okolici NEK podobne tistim, ki smo jih izmerili v okviru nadzornih meritev radioaktivnosti v Republiki Sloveniji ([15], [16]).

Izvajalec meritev med izmerjenimi radionuklidi v okolju poroča tudi o Na-22 od leta 2008 dalje. Podobno kot Be-7 je Na-22 kozmogeni radionuklid, njegove koncentracije pa so navadno okrog 10 000-krat nižje od koncentracij Be-7. V letu 2023 je bila v Ljubljani povprečna koncentracija aktivnosti Na-22 $0,36 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

OCENA UČINKOV

Ker so koncentracije aktivnosti radionuklidov v aerosolih, ki izvirajo iz drugih virov (globalno onesnaženje z umetnimi radionuklidi, naravna radioaktivnost), dosti večje od koncentracij aktivnosti radionuklidov v razredčenih zračnih izpustih NEK (imisijah) na lokacijah vzorčenja aerosolov, prispevka slednjih ni mogoče izolirati. Pri oceni koncentracij aktivnosti umetnih radionuklidov, ki so v zračnih izpustih iz NEK, si pomagamo z računskimi modeli, ki na posameznih lokacijah ocenijo razredčitev aktivnosti radionuklidov od točke izpusta. Za zahtevne razmere, kakršne nastopajo v okolici NE Krško, od 2007 dalje namesto Gaussovega uporabljamo Lagrangeev model širjenja izpuščenih snovi v zraku, upoštevajoč konfiguracijo tal in dejanske meteorološke razmere. Model uporablja vse merjene podatke v sistemu ekološkega informacijskega sistema EIS, ki ga upravlja NEK. Za emisije je to pretok plinov skozi glavni izpuh. Model uporablja še temperaturo in druge meteorološke parametre ter hitrost izpuščenih plinov in presek ventilacijskega izpusta. Po posvetovanju z NEK je bila za temperaturo dimnih plinov določena temperatura $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Glavni izpuh je v model postavljen z realnimi koordinatami: UTM33: X = 539944 Y = 5087290 in višina 60 m. Model ne vidi reaktorske zgradbe, ker ima ločljivost 250 m, področje opiše z uporabo terena "industrija", ki ima zelo veliko hrapavost terena [3].

Model s temi podatki in tridimenzionalno meteorologijo izpušča delčke na vsakih 10 sekund in jih usmerja glede na njihovo kinetično in toplotno energijo, ki jo imajo na izstopu iz ventilacijskega sistema, ter glede na vremenske razmere v prostoru, kjer so delci. Dimnega dviga model ne računa eksplicitno, temveč kot povprečje dvigov posameznih delčkov.

Koncentracije aktivnosti izpuščenih snovi v zunanjem zraku (imisije) na določeni lokaciji proč od izpusta ocenimo na podlagi razredčitvenih koeficientov (χ/Q) iz modela širjenja. Razredčitveni koeficient je normirano merilo za redčenje v ozračju in nam pove, kolikšna je koncentracija izpuščene snovi v obravnavani točki okolja pri enotski emisiji 1 Bq/s . Razredčitveni koeficient se izračuna iz meteoroloških podatkov za vsak polurni interval v obravnavanem letu posebej, in sicer za mrežo celic na obravnavanem območju modeliranja ($25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ z NEK v središču). Nato se za vsako celico izvede časovno povprečenje razredčitvenega koeficienta ob predpostavki konstantne emisije v tem časovnem intervalu.

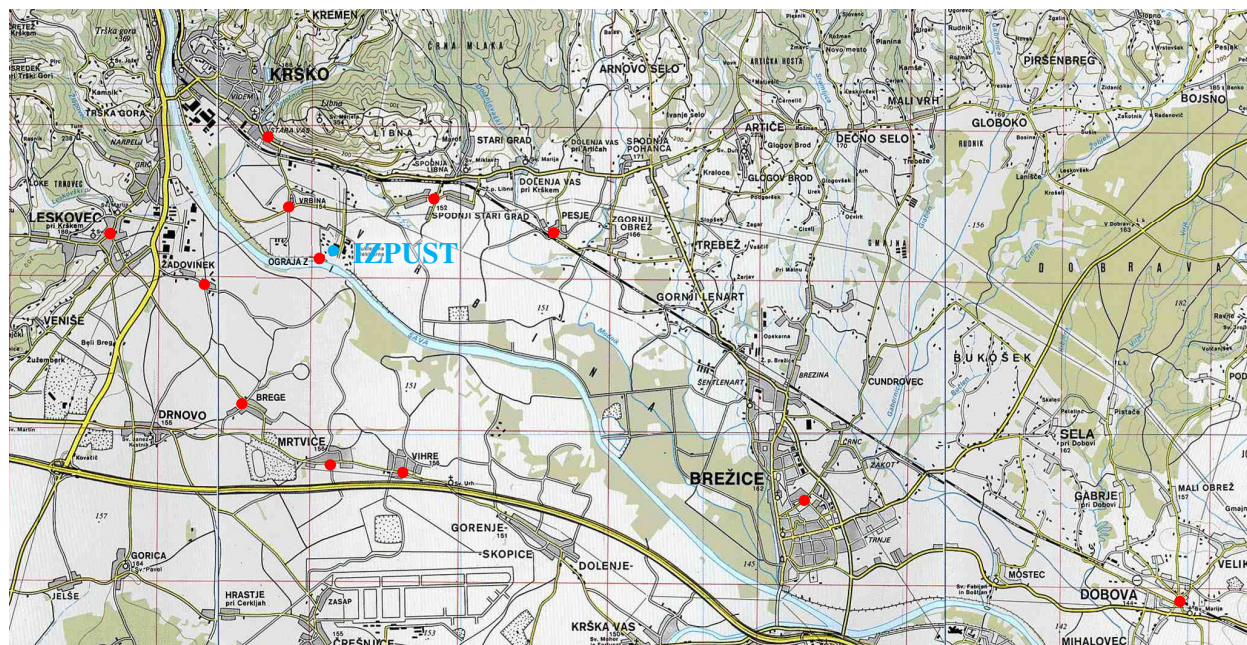
Kot lokacije za izračun razredčitvenih faktorjev in kasneje tudi za oceno doz so bila izbrana nekatera naselja bodisi v neposredni bližini NEK bodisi z večjim številom prebivalcev. Lokacije so navedene v tabeli 4.3 in prikazane na sliki 4.6.



Tabela 4.3: Razredčitveni koeficienti $(\chi/Q)/(s/m^3)^*$ v letu 2023 za naselja v okolici NEK, ki jih je izračunalo in posredovalo podjetje MEIS storitve za okolje z uporabo Lagrangeevega modela

2023	Sp. Stari Grad 1,5 km	Vrbina 0,8 km	Brežice 7,1 km	Vihre 3,1 km	Mrtvice 2,8 km	Brege 2,3 km	Žadovinek 1,7 km	Leskovec 2,9 km	Krško - Stara vas 1,7 km	Pesje 3,0 km	Dobova 12,1 km	Ograja NEK 0,2 km
Januar	5,00E-07	2,56E-07	3,84E-08	3,26E-08	6,15E-08	1,09E-07	2,83E-07	1,41E-07	1,85E-07	3,89E-07	2,84E-08	5,72E-07
Februar	2,58E-07	1,27E-07	1,06E-08	1,29E-08	1,84E-08	4,66E-08	1,59E-07	1,58E-07	5,98E-08	2,15E-07	3,12E-08	2,31E-07
Marec	2,67E-07	1,47E-07	6,73E-08	3,71E-08	4,46E-08	8,34E-08	2,05E-07	1,49E-07	7,44E-08	2,50E-07	2,64E-08	3,54E-07
April	2,81E-07	2,00E-07	5,29E-08	5,06E-08	7,68E-08	1,28E-07	2,85E-07	1,37E-07	8,13E-08	3,17E-07	2,46E-08	3,40E-07
Maj	3,31E-07	5,01E-07	5,45E-08	5,13E-08	1,00E-07	2,49E-07	5,58E-07	1,86E-07	1,58E-07	2,14E-07	2,74E-08	5,51E-07
Junij	3,58E-07	4,06E-07	6,56E-08	6,89E-08	9,55E-08	2,30E-07	4,75E-07	1,10E-07	1,96E-07	2,83E-07	2,40E-08	9,78E-07
Julij	3,77E-07	4,87E-07	1,53E-07	9,97E-08	1,24E-07	2,08E-07	3,40E-07	1,58E-07	1,34E-07	3,44E-07	1,27E-08	1,58E-06
Avgust	4,13E-07	3,90E-07	8,45E-08	6,13E-08	8,93E-08	1,76E-07	4,14E-07	1,89E-07	1,12E-07	1,90E-07	2,23E-08	1,04E-06
September	3,97E-07	4,60E-07	1,69E-07	7,48E-08	9,58E-08	1,71E-07	2,62E-07	1,15E-07	2,07E-07	5,03E-07	7,44E-09	1,17E-06
Oktober	4,82E-07	2,65E-07	8,06E-08	6,41E-08	9,03E-08	2,13E-07	3,65E-07	1,68E-07	1,21E-07	4,99E-07	2,18E-08	8,47E-07
November	4,94E-07	3,20E-07	1,07E-07	5,96E-08	9,07E-08	1,93E-07	3,46E-07	1,95E-07	1,79E-07	3,90E-07	2,20E-08	6,75E-07
December	2,69E-07	1,96E-07	8,16E-08	4,01E-08	6,24E-08	1,22E-07	2,50E-07	1,97E-07	1,12E-07	4,11E-07	2,24E-08	4,05E-07

* Drsni v posameznih celicah pomenijo relativno velikost razredčitvenega faktorja, posebej za ograjo NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja) (rdeče), in za vse druge lokacije skupaj (sivo). Tako so hitro razvidne morebitne sezonske/meteorološke variacije.



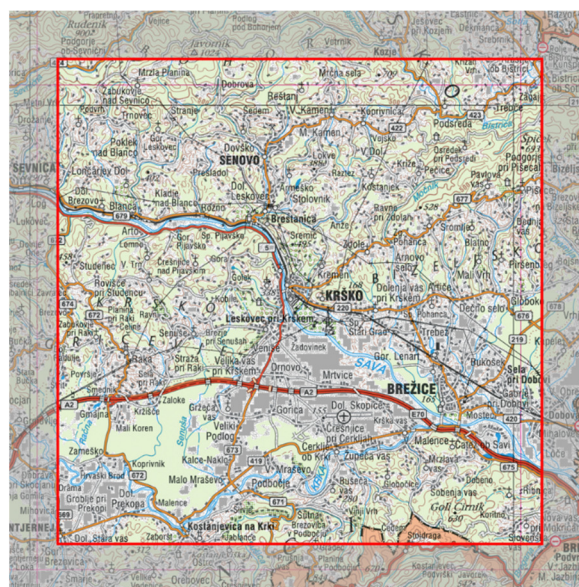
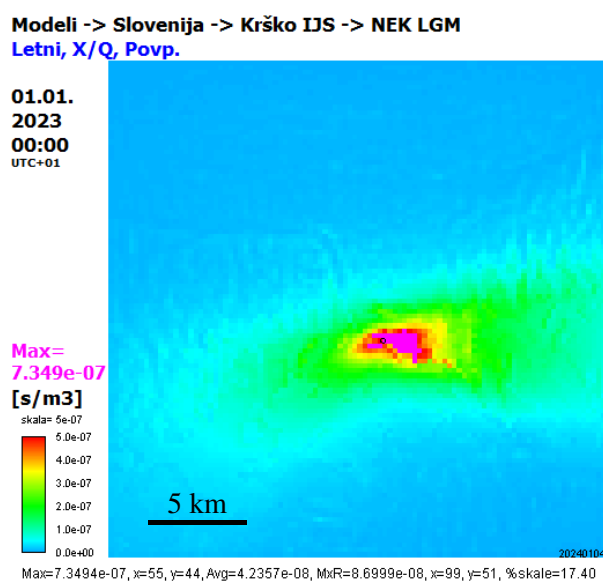
Slika 4.6: Načrt okolice NE Krško z vrisanimi okvirnimi lokacijami za bližnja naselja, v katerih so izračunani razredčitveni faktorji in naknadno izračunane doze



Na slikah 4.7a in 4.7b so predstavljeni povprečni letni razredčitveni koeficienti (χ/Q), na osnovi izračunanih mesečnih koeficientov χ/Q , tako za leto 2023 (slika 4.7a) in za primerjavo še iz prejšnjih let od 2013 do 2022 (slika 4.7b). Na slikah je vidno, da sta prevladujoči smeri, v katerih se v povprečju gibljejo izpusti NEK, jugozahod in jugovzhod.

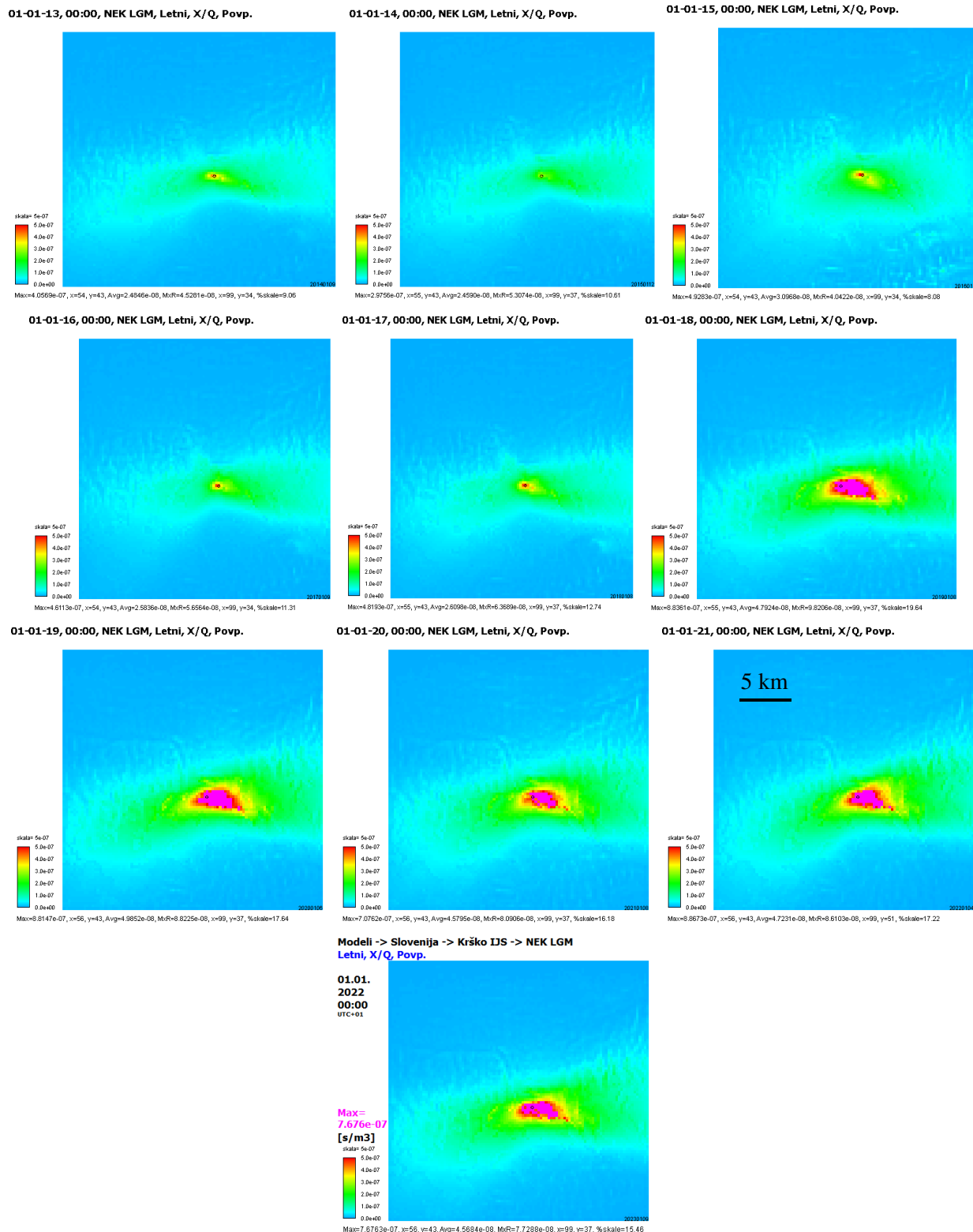
Na sliki 4.8 je prikazan časovni potek rezultatov modeliranja z Lagrangeevim modelom, kjer so prikazani mesečni povprečni razredčitveni koeficienti od leta 2013 dalje. Na zgornjem grafu je časovni potek za najbližjo lokacijo izpusta, in sicer na zahodni ograji NEK, na spodnjem grafu slike 4.8 pa časovni potek za bližnja naselja Spodnji Stari Grad, Vrbinja, Krško – Stara vas in Žadovinek. Na zahodni ograji NEK je zelo močno viden vpliv stabilnega vremena in s tem manjšega redčenja, kjer so razredčitveni faktorji v poletnih mesecih zelo visoki v primerjavi z ostalimi meseci. Takšni vrhovi so bistveno manj izraziti na ostalih lokacijah Spodnji Stari Grad, Vrbinja, Krško – Stara vas in Žadovinek, ki so bolj oddaljene od mesta izpusta.

V časovnem poteku povprečnih mesečnih razredčitvenih faktorjev je opazen dvig faktorjev od vključno leta 2018 dalje na lokacijah Spodnji Stari Grad, Vrbinja in Žadovinek. Kakšnih posebnih pojasnil nimamo, najverjetneje so bile meteorološke razmere takšne, da je bilo vreme v povprečju stabilnejše in posledično razredčitveni faktorji višji.



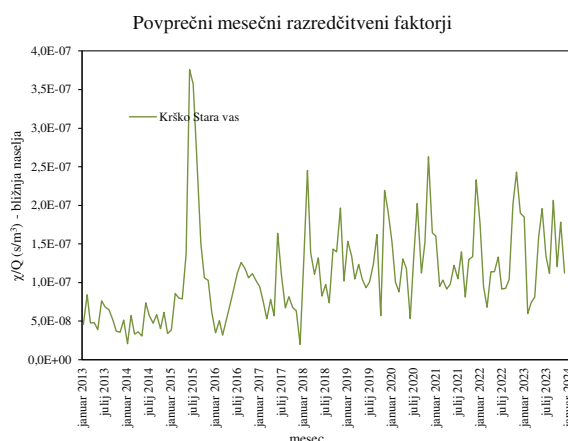
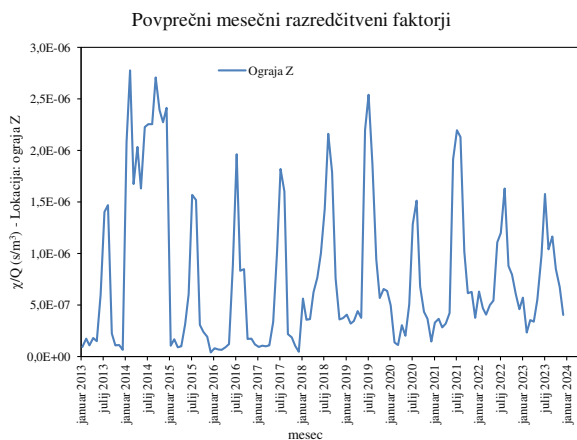
a) Leto 2023

Slika 4.7a: Povprečni letni razredčitveni koeficienti (χ/Q) z enoto s/m^3 , izračunani po Lagrangeevem modelu za izpust z višine 60 m za okolico NEK za leto 2023 (območje modeliranja je v rdečem okviru, 25 km × 25 km) [91]. Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.



b) Leta od 2013 do 2022

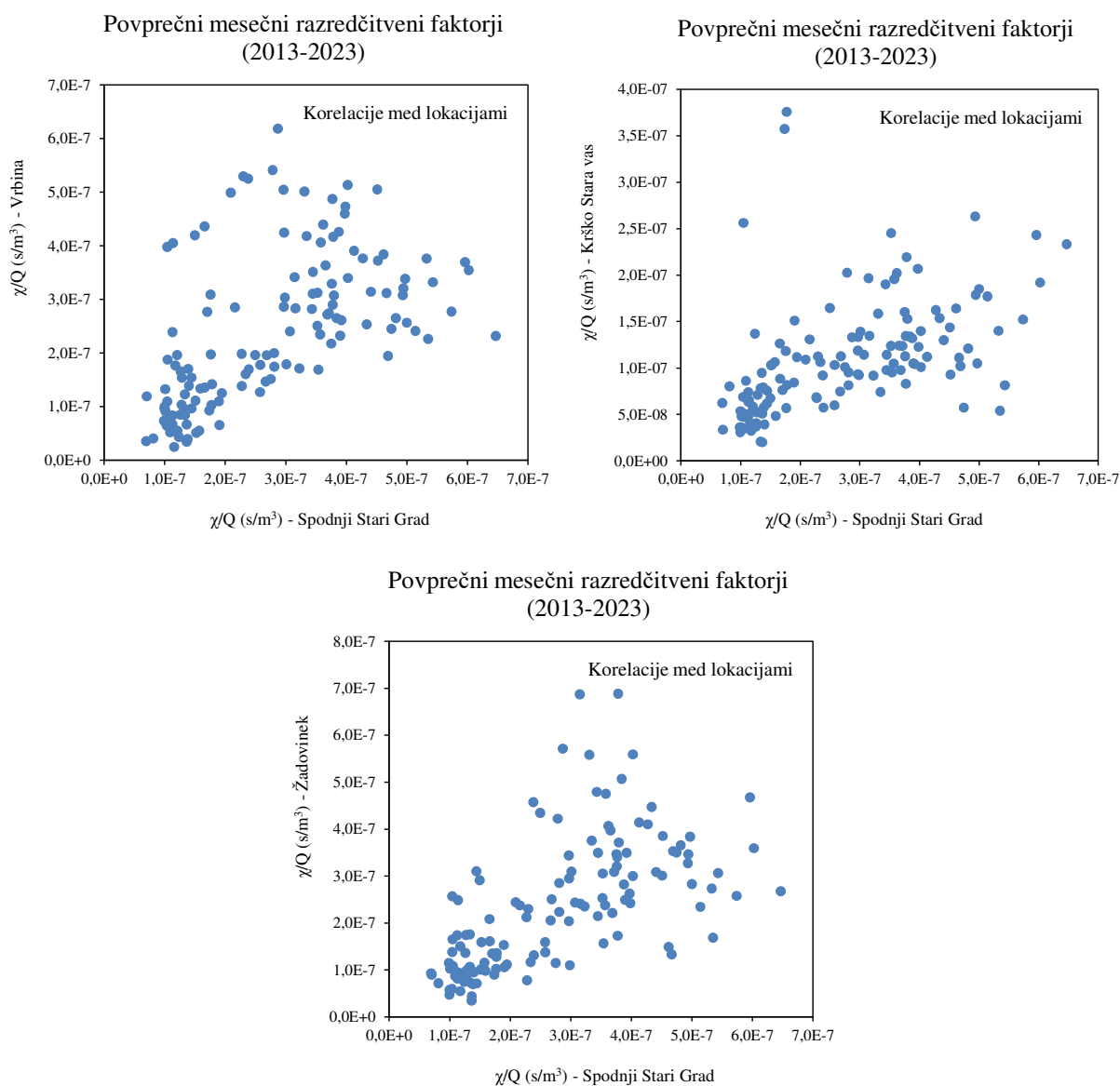
Slika 4.7b: Povprečni letni razredčitveni koeficienti (χ/Q) z enoto s/m^3 , izračunani po Lagrangeevem modelu za izpust z višine 60 m za okolico NEK za leta 2013–2022. Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.



Slika 4.8: Povprečni mesečni razredčitveni koeficienti (χ/Q) z enoto s/m^3 , izračunani po Lagrangeevem modelu za izpust z višine 60 m za okolico NEK za leta 2013–2023. Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.



Kot je bilo ugotovljeno in je lepo vidno na slikah 4.7a in 4.7b, sta prevladujoči smeri, v katerih se v povprečju gibljejo izpusti NEK, jugozahod in jugovzhod. Zato smo preverili, ali so takšne smeri gibanja izpustov med seboj korelirane, oziroma antikorelirane. Na sliki 4.9 smo primerjali med seboj mesečne razredčitvene koeficiente na referenčni lokaciji in v bližnjih naseljih okrog NEK – Vrblina, Krško – Stara vas ter Žadovinek. Lokacije za prikaz na sliki 4.9 so izbrane v različnih smereh glede na točko izpusta. V primeru sezonsko prevladujočih smeri vetrov oziroma smeri razširjanja izpustov bi morali biti razredčitveni faktorji na različnih straneh od izpusta NEK antikorelirani, vendar na sliki 4.9 to ni opazno. Zato lahko privzamemo, da se vreme oziroma smer razširjanja v okolici NEK spreminja z urno ali dnevno periodo.



Slika 4.9: Korelacija povprečnih mesečnih razredčitvenih koeficientov (χ/Q) z enoto s/m^3 , na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad in v bližnjih naseljih za leta 2013–2023. Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.



Meritve emisij na izpuhu NEK opravljata NEK in IJS. V tabeli 4.4 so pri aerosolih predstavljene vrednosti, ki so dobljene tako, da konservativno upoštevamo višjo vrednost od obeh izvajalcev. O aktivnosti žlahtnih plinov poroča le NEK. Iz teh meritev in podatkov o izračunanih povprečnih mesečnih razredčitvenih koeficientih (χ/Q) za posamezna mesta v okolici NEK (tabela 4.3) lahko izračunamo inhalacijski in imerzijski prispevek k letni efektivni dozi zaradi zračnih emisij NEK.

Tabela 4.4: Zračni izpusti iz ventilacijskega izpusta NEK v letu 2023 na višini 60 m

	Radionuklid	Letni izpust (Bq)
Pare, plini	I-131	7,3E+06
	I-132	–
	I-133	2,7E+06
	I-135	–
	HTO	6,3E+12
	HT + CHT	1,1E+12
	C-14 v CO ₂	1,3E+11
	C-14 v CH ₄	3,8E+09
Aerosoli	Na-22	–
	Mn-54	2,0E+06
	Co-57	1,5E+03
	Co-58	9,2E+06
	Co-60	1,1E+04
	Zr-95	–
	Nb-95	–
	Ru-103	–
	Ag-110m	–
	Sb-125	–
	Te-123m	–
	Te-125m	–
	Te-127m	6,8E+03
	Cs-134	1,9E+06
	Cs-137	1,1E+06
	Fe-55	–
	Sr-89/Sr-90	7,8E+02
Se-75	4,3E+05	
Žlahtni plini	Xe-131m	3,7E+11
	Xe-133	4,7E+10
	Xe-133m	–
	Xe-135	2,1E+07
	Xe-135m	–
	Ar-41	5,4E+09
	Kr-85	–
	Kr-85m	–
Skupna izpuščena aktivnost za pare, pline in aerosole		7,5E+12
Skupna izpuščena aktivnost žlahtnih plinov		4,2E+11
Skupna izpuščena aktivnost		7,9E+12



Pri tem je treba povedati, da se pri poročanju o merskih rezultatih v bližini meje detekcije uporablja priporočilo Evropske komisije [62], ki določa, da se navede četrtnina meje detekcije (MDA) določenega radionuklida za vsak mesec, če je le-ta bil detektiran vsaj enkrat v letu. Takšen način poročanja lahko pomeni, da je letna izpuščena aktivnost precenjena in torej zelo konservativna. Na primer, v letu 2015 se je tako pokazalo, da je bil izpust Cs-137 precenjen za 72 %, Ru-103 za 42 %, Xe-131m za 59 % itd. Teoretično bi lahko le ob eni mesečni meritvi tik ob meji detekcije bila navedena letna aktivnost, ki je 3,75-krat višja od dejansko izmerjene ($11 \times 0,25 \text{ MDA} + 1 \text{ MDA}$). Tako sta tudi ocenjeni učinkoviti dozi zaradi vdihavanja in zunanjega sevanja žlahtnih plinov lahko precenjeni za nekaj odstotkov (v letu 2015 na primer 5 %), v ekstremnih primerih pa celo bistveno več. Tovrstno poročanje je pomanjkljivo tudi s stališča metrologije, saj se izgubi informacija o negotovosti rezultatov meritev in letne vsote [60].

Metodologija izračuna učinkovite doze za referenčne osebe zaradi radioaktivnosti v zraku

Iz tabele 4.4 je razvidno, da skozi ventilacijski izpust uhaja največ tritija v obliki vodne pare (HTO). To je glavni prispevek k modelski oceni učinkovite doze zaradi vdihavanja na izbranih lokacijah v okolici NEK (tabela 4.5). Znatne so tudi izpuščene aktivnosti žlahtnih plinov, vendar je treba v tem primeru za modelsko oceno učinkovite doze¹⁴ upoštevati imerzijo oziroma zunanje sevanje, ki pa je za red velikosti nižja od učinkovite doze zaradi vdihavanja hlapov, plinov in partikulatov z radionuklidi iz NEK, izračunane na lokacijah v okolici NEK (tabela 4.7).

Iz podatkov o meritvah mesečnih emisij posameznih radionuklidov (tabela 4.4) ter iz izračunanih mesečnih razredčitvenih koeficientov (χ/Q) (tabela 4.3), so bile izračunane koncentracije aktivnosti posameznih radionuklidov po mesecih a_{jl} na lokaciji l :

$$a_{jl, \text{mes}} = a_{js, \text{mes}} \cdot \Phi_v \cdot (\chi/Q)_l \quad (4.1)$$

Tu je a_{js} mesečna koncentracija aktivnosti radionuklida j na točki izpusta, Φ_v pretok oziroma hitrost izpusta v enotah m^3/s ter $(\chi/Q)_l$ razredčitveni faktor na lokaciji l v enotah s/m^3 .

Namen spremljanja radioaktivnosti v vzorcih zraka je ocena doz, ki jih prejmejo prebivalci v okolici NEK zaradi notranjega obsevanja (vdihavanje) in zunanjega obsevanja. Predvidena učinkovita doza $E_{l, \text{inh}, \text{mes}}(g)$, ki jo prejme referenčna oseba v starostni skupini prebivalstva g v enem mesecu na lokaciji l , se ugotavlja kot vsota vseh prispevkov zaradi vnosa različnih radionuklidov z vdihavanjem:

$$E_{l, \text{inh}, \text{mes}}(g) = \sum_j h(g)_{j, \text{inh}} A_{jl, \text{inh}, \text{mes}} \quad (4.2)$$

pri čemer je $h(g)_{j, \text{inh}}$ učinkovita doza na enoto vnosa j -tega radionuklida zaradi vdihavanja, izražena v Sv/Bq [10], in $A_{j, \text{inh}, \text{mes}}$ posamezni mesečni vnos j -tega radionuklida z vdihavanjem, izražen v Bq . V našem primeru mesečni vnos j -tega radionuklida $A_{j, \text{inh}, \text{mes}}$ izračunamo kot:

$$A_{j, \text{inh}, \text{mes}} = a_{jl, \text{mes}} \frac{1}{12} V(g) \quad (4.3)$$

kjer je $a_{jl, \text{mes}}$ koncentracija/specifična aktivnost j -tega radionuklida iz enačbe (4.1) in $V(g)$ letna hitrost dihanja za določeno starostno skupino g . V enačbi (4.3) smo privzeli, da je hitrost dihanja enakomerna celo leto. Z upoštevanjem ustreznih doznih pretvorbennih faktorjev $h(g)_{j, \text{inh}}$ ([10], [40]) za posamezne radionuklide in posamezno starostno skupino dobimo oceno za mesečni prispevek posameznega radionuklida k letni dozi. Letna učinkovita doza zaradi vdihavanja za posamezno starostno skupino referenčne osebe je potem vsota mesečnih učinkovitih doz, ki jih izračunamo iz enačbe (4.2).

¹⁴ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejelo najvišje doze.



Efektivno dozo zaradi imerzije (zunanjega sevanja) izračunamo ob predpostavki zanemarljivega prispevka inhalacije (vdihavanja) žlahtnih plinov v primerjavi z zunanjim sevanjem, ki ga povzroča polneskončni oblak žlahtnih plinov. Mesečno efektivno dozo zaradi imerzije na lokaciji l izračunamo kot:

$$E_{l,im,mes} = \sum_j h_{j,im} A_{jl,im,mes} \quad (4.4)$$

pri čemer je $h_{j,im}$ efektivna doza ((Sv/d)/(Bq/m³)) j -tega radionuklida, prejeta v enem dnevu na enoto koncentracije aktivnosti v zraku ([10], [40]). Pretvorbeni dozni koeficienti so enaki za vse starostne skupine. Aktivnost $A_{jl,im,mes}$ na lokaciji l izračunamo iz zveze, ki jo podaja enačba:

$$A_{jl,im,mes} = A_{jS,mes} (\chi/Q)_l \quad (4.5)$$

kjer je $A_{jS,mes}$ izpuščena mesečna aktivnost, pomnožena s pretokom in obdobjem izpuščanja, in $(\chi/Q)_l$ razredčitveni faktor na lokaciji l . Letna efektivna doza zaradi imerzije je potem za vse starostne skupine vsota mesečnih efektivnih doz, ki jih izračunamo iz enačbe (4.4).

Pri opisu metodologije izračuna doz je treba poudariti, da je za oceno prispevka NEK k dozi smiselno upoštevati le vrednosti, dobljene z modelnimi izračuni (enačba 4.1) razširjanja radioaktivnih emisij. Tako lahko ugotovimo na primeru tipično merljivega umetnega radionuklida Cs-137 v okolju, da izmerjene mesečne koncentracije aktivnosti, ki na aerosolnih filtrih v okolici NEK znašajo nekaj $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, niso posledica imisij zaradi izpustov iz NEK, temveč posledica okoljske radioaktivnosti, tj. splošne onesnaženosti okolja zaradi černobilske nesreče in poskusnih jedrskih eksplozij v petdesetih in šestdesetih letih dvajsetega stoletja ter v manjši meri nesreče v Fukušimi. V letu 2023 je bil tako med izpusti NEK radionuklid Cs-137 prisoten v majhni količini 1,1 MBq, meritve na filtrih v okolici NEK pa so pokazale koncentracije, primerljive s preteklimi leti. Iz meritev izpustov v preteklih letih smo že večkrat pokazali, da so koncentracije aktivnosti Cs-137, modelsko izračunane iz enačbe (4.1), tudi v primeru najvišje izračunane mesečne koncentracije več velikostnih razredov nižje od izmerjenih vrednosti v okolju.

Imisijske doze NEK

(izračun iz emisij in modelsko ugotovljenih koncentracij aktivnosti radionuklidov na mestih vzorčenja)

Na podlagi zgoraj opisane metodologije je tako narejen izračun imisijskih doz, tj. preko radioaktivnih izpustov NEK z modelskimi preračuni dobljenih koncentracij radionuklidov v zraku in z upoštevanjem ustreznih pretvorbenih faktorjev. V tabelah 4.5 in 4.7 so izračunane inhalacijske in imerzijske doze v okolici NEK. Najvišje izračunane doze so bile v letu 2023 v Spodnjem Starem Gradu in nato v Žadovinku.

Iz povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti za okolico NEK ter za Ljubljano so izračunane predvidene efektivne doze za tri starostne skupine: 1) odrasle, starejše od 17 let, 2) otroke, stare od 7 do 12 let, in 3) dojenčke, stare do enega leta (tabela 4.8). Pri tem smo upoštevali dozne pretvorbene faktorje $h(g)_{j,inh}$ (predvidena efektivna doza na enoto vnosa) iz referenc [10] in [40] in hitrosti dihanja 17 L/min (9 000 m³ na leto) za odraslega posameznika, 10,6 L/min za otroka (5 585 m³ na leto) in 2,0 L/min (1 044 m³ na leto) za dojenčka. Metodologija sledi priporočilom ICRP 101 [40] in daje konservativnejšo oceno doze kot določbe uredbe UV2 [10].



Tabela 4.5: Ocenjene letne učinkovite doze zaradi inhalacije (vdihanja) in imerzije (zunanega sevanja) posameznih radionuklidov zaradi izpustov NEK za odraslega prebivalca (referenčne osebe) na lokaciji Spodnji Stari Grad (smer VSV, razdalja 1,5 km od osi reaktorja) in na najbližji lokaciji na ograji NEK, ki je v izključitvenem območju (0,5 km) – prispevki v letu 2023.

	Radionuklid	Letna učinkovita doza (μSv)	
		Spodnji Stari Grad	Ograja NEK (okvirno velja tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja)
Pare, plini (inhalacija - vdihanje)	I-131	7,5E-06	1,3E-05
	I-132		
	I-133	5,5E-07	9,7E-07
	I-135		
	HTO	1,2E-02	2,2E-02
	HT + CHT	1,8E-05	2,6E-05
	C-14 v CO_2	1,1E-04	1,7E-04
	C-14 v CH_4	2,3E-04	4,5E-04
Aerosoli (inhalacija – vdihanje)	Na-22		
	Mn-54	4,1E-07	7,3E-07
	Co-57	1,4E-10	2,2E-10
	Co-58	2,6E-06	4,6E-06
	Co-60	4,3E-08	6,6E-08
	Zr-95		
	Nb-95		
	Ru-103		
	Ag-110m		
	Sb-125		
	Te-123m		
	Te-125m		
	Te-127m	8,4E-09	1,4E-08
	Cs-134	5,3E-06	9,2E-06
	Cs-137	6,0E-06	1,1E-05
	Fe-55		
Sr-89/90	1,1E-08	2,1E-08	
Se-75	5,3E-08	9,2E-08	
Žlahtni plini (imerzija - zunanje sevanje)	Xe-131m	4,8E-05	9,0E-05
	Xe-133	2,7E-05	4,6E-05
	Xe-133m		
	Xe-135	1,1E-07	1,9E-07
	Xe-135m		
	Ar-41	1,2E-04	2,4E-04
	Kr-85		
	Kr-85m		
Inhalacijska doza		1,2E-02	2,3E-02
Imerzijska doza		1,9E-04	3,8E-04
DOZA – SKUPAJ		1,3E-02	2,4E-02



Tabela 4.6: Letne efektivne doze zaradi inhalacije (vdihavanja) in imerzije (zunanjega sevanja) zaradi izpustov NEK ter prispevka H-3 in C-14 za odraslega prebivalca (referenčna oseba) na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad in na najbližji lokaciji na ograji NEK (okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja) za zadnjih 10 let

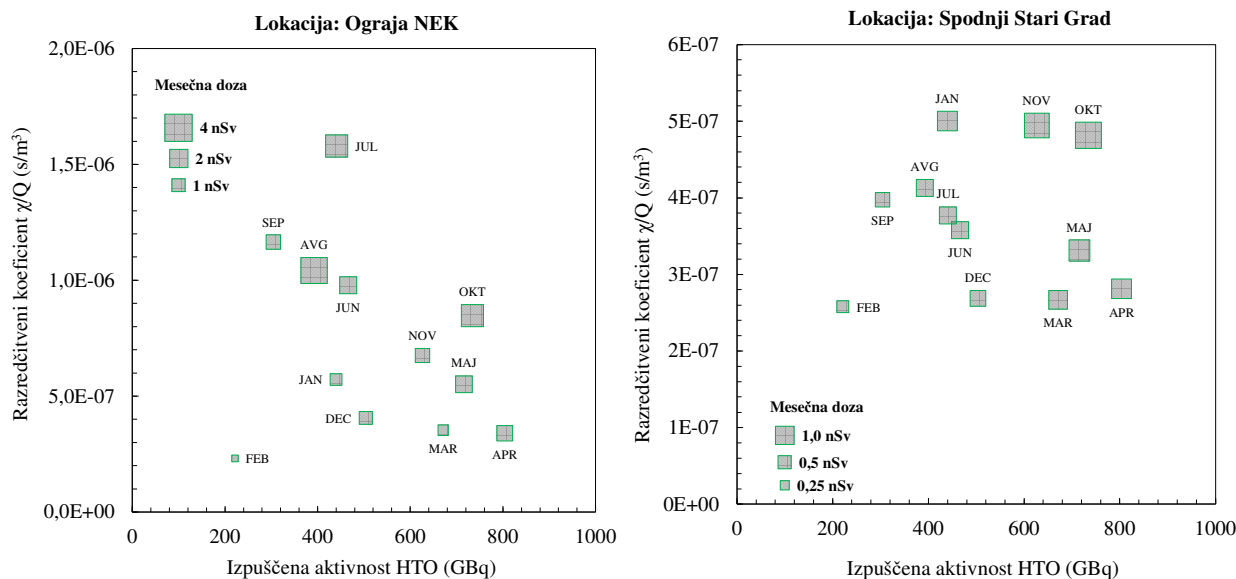
Leto	Spodnji Stari grad				Ograja NEK (okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja)			
	H-3	C-14	Letna inhalacijska doza (nSv)	Celotna letna doza (nSv)	H-3	C-14	Letna inhalacijska doza (nSv)	Celotna letna doza (nSv)
	Prispevek k celotni dozi (nSv)				Prispevek k celotni dozi (nSv)			
2011	3,5	0,01	3,5	3,7	10,5	0,05	11	11
2012 ^R	5,3	0,05	5,4	5,7	31	0,26	31	32
2013 ^R	3,7	1,4	5,2	5,7	11,7	3,1	15	16
2014	3,0	0,17	2,8	3,0	48	0,09	48	53
2015 ^R	3,9	0,02	4,0	4,8	15	0,05	15	16
2016 ^R	5,2	0,3	5,5	5,8	12,1	0,09	13	14
2017	4,5	2,2	6,7	7,0	12,2	11	24	24
2018 ^R	10	3,6	14	14	24	5,9	30	31
2019 ^R	5,1	1,2	6,3	6,8	13	3,0	16	17
2020	5,7	0,6	6,3	6,6	6,4	0,9	7,3	7,9
2021 ^R	10,8	0,7	11,4	11,7	17,8	0,8	18,7	19,2
2022 ^R	8,2	0,5	8,7	8,9	18,0	1,0	19,0	19,4
2023 ^R	12,0	0,3	12,4	12,6	22,5	0,6	23,1	23,5

Oznaka ^R pomeni, da je v tem letu potekal remont

Iz tabele 4.6 je razvidno, da je skoraj vsa inhalacijska doza za odrasle v letu 2023 posledica zračnih emisij tritija (97%), preostanek pa prispeva C-14. Ocenjeni prispevki k skupni inhalacijski dozi vseh drugih umetnih radionuklidov so bistveno manjši. Mesečne vrednosti efektivne doze so sicer lahko visoke v poletnih mesecih zaradi neugodnih vremenskih razmer (visok razredčitveni faktor, ko je ta odvisnost močno poudarjena na ograji NEK zaradi manjše oddaljenosti) in v mesecih, ko lahko neugodne vremenske razmere sovpadajo z remontom in bistveno višjimi izpusti. Inhalacijska doza po mesecih v letu 2023 za posameznika iz prebivalstva skozi leto precej variira na lokacijah Spodnji Stari Grad in na ograji NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja). V poletnih vremensko neugodnih mesecih leta 2023 so bili izpusti tritija na srednje nizki ravni v primerjavi z izpusti v času remonta ali izpusti v spomladanskem času. Mesečni izpusti HTO (z največjim prispevkom k inhalacijski dozi) in izračunani mesečni razredčitveni faktor so medsebojno prikazani na sliki 4.10 za lokaciji na ograji NEK in na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad, kjer je točka na sliki izrisana tako, da njena velikost (okvirna površina) približno predstavlja izračunano mesečno inhalacijsko dozo. Na tak način hitro pojasnimo, zakaj je pri nekaterih nižjih izpustih aktivnosti HTO lahko doza višja. Med remontom v letu 2023 so bile relativno neugodne vremenske razmere, zato inhalacijske doze v tem času delno odstopajo od doz ostalih mesecev.

Na prispevek doze C-14 vpliva njegova kemijska oblika v izpustu, saj je pretvorbeni dozni faktor za CH₄ višji kot za CO₂. Zaradi izvedenih del med obratovanjem ali remontom in ustrezno večjimi izpusti v obliki CH₄ je prispevek C-14 k dozi zaradi inhalacije višji (na primer v letih 2013, 2017, 2018 in 2019) [68]. V letu 2023 so bili kljub remontu izpusti C-14 v obliki CH₄ majhni oziroma nemerljivi (podobno tudi v letih 2011, 2012, 2015, 2020 in 2022), kar je rezultiralo v nižjih dozah kljub neugodnim vremenskim razmeram v času remonta.

Prispevki obeh radionuklidov k letni inhalacijski dozi in celotni letni dozi v letih od 2011 do 2023 so prikazani v tabeli 4.6. Kot je razvidno iz tabele, so doze v preteklih letih v bližini NEK približno dva- do trikrat večje kot pa na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad. Izjema je leto 2020, ko so bili izpusti v vremensko neugodnih mesecih relativno nizki, zato je razlika v dozi na obeh lokacijah precej manjša.



Slika 4.10: Skupen prikaz izpuščene aktivnosti HTO v enotah GBq in povprečnega mesečnega razredčitvenega koeficienta (χ/Q) z enoto s/m^3 na ograji NEK in na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad v letu 2023. Površina posamezne točke v danem mesecu približno kaže tudi izračunano mesečno dozo v enotah nSv.

V letu 2023 je bil v izpustih izmerjen relativno majhen prispevek joda (7,3 MBq med izrednim remontom, ostale mesece ni bilo izpustov), kar kaže, da je bila integriteta goriva v 33. gorivnem ciklu (2023–2024) bistveno boljša kot v gorivnih ciklih 2012–2013, 2013–2015 (ko so nastale večje poškodbe gorivnih palic) in 2015–2016. Med gorivnimi cikli z dobro integriteto goriva v letu 2020 v izpustih ni bilo izmerjenega prispevka joda, sicer pa so bile izmerjene nizke aktivnosti joda v izpustih v letu 2022 (2,5 MBq), v letu 2021 (0,18 MBq), v letu 2019 (1 MBq), v letu 2018 (27 MBq) in letu 2017 (3,4 MBq), ki so za dva do tri velikostne rede nižje kot v ostalih gorivnih ciklih s slabšo integriteto ali poškodbami gorivnih palic (2016 8,0 GBq, 2015 200 GBq, 2014 4,6 GBq, 2013 90 GBq).

Zunanje sevanje zaradi radionuklidov v zraku (imerzijska doza) je v letu 2023 predvsem posledica izpustov žlahtnih plinov različnih izotopov ksenona in Ar-41. Celotna letna imerzijska doza za Spodnji Stari Grad za leto 2023 je bila 0,2 nSv, za ograjo NEK (in okvirno za razdaljo 500 m od osi reaktorja), pa 0,4 nSv: vrednosti so zelo nizke v primerjavi z inhalacijsko dozo na istih mestih (približno dva velikostna red razlike). Mesečne variacije imerzijskih doz so enake kot pri inhalacijskih dozah, visoke v poletnih mesecih, povišane v času med izrednim remontom in po njem (oktober in november).

Predvidene skupne letne efektivne doze za odraslega človeka so po modelskih ocenah na različnih lokacijah v razponu od 0,8 nSv (Dobova) do 24 nSv (ograja NEK, okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja) (tabela 4.7). Razlike med lokacijami so posledica razredčitvev, kar upoštevamo s povprečnimi mesečnimi razredčitvenimi koeficienti χ/Q [56]–[59].



Tabela 4.7: Ocene inhalacijskih in imerzijskih doz zaradi atmosferskih izpustov v okolici NEK v letu 2023 z uporabo Lagrangeevega modela – imisijske doze NEK. Uporabljeni so podatki za dozne pretvorbene faktorje iz referenc [10] in [40] za odrasle in otroke.

PREGLED SKUPNIH LETNIH DOZ								
Naselje	Razdalja od NEK [km]	Inhalacijska doza [μ Sv]			Imerzijska doza [μ Sv]	Skupna doza* [μ Sv]		
		Odrasli	Otroci	Dojenčki	Odrasli (otroci, dojenčki)	Odrasli	Otroci	Dojenčki
Spodnji Stari Grad	1,5	1,2E-02	9,8E-03	3,8E-03	1,9E-04	1,3E-02	9,8E-03	3,8E-03
Vrbina	0,8	1,0E-02	8,2E-03	3,2E-03	1,6E-04	1,1E-02	8,2E-03	3,2E-03
Brežice	7,1	2,6E-03	2,1E-03	8,1E-04	4,3E-05	2,7E-03	2,1E-03	8,1E-04
Vihre	3,1	1,8E-03	1,5E-03	5,7E-04	2,9E-05	1,9E-03	1,5E-03	5,7E-04
Mrtvice	2,8	2,7E-03	2,2E-03	8,4E-04	4,1E-05	2,8E-03	2,2E-03	8,4E-04
Brege	2,3	5,6E-03	4,5E-03	1,7E-03	8,4E-05	5,7E-03	4,5E-03	1,7E-03
Zadovinek	1,7	1,1E-02	9,1E-03	3,5E-03	1,7E-04	1,2E-02	9,1E-03	3,5E-03
Leskovec	2,9	5,4E-03	4,3E-03	1,7E-03	8,5E-05	5,5E-03	4,3E-03	1,7E-03
Krško - Stara vas	1,7	4,4E-03	3,5E-03	1,4E-03	7,0E-05	4,5E-03	3,5E-03	1,4E-03
Pesje	3,0	1,1E-02	8,9E-03	3,5E-03	1,8E-04	1,1E-02	8,9E-03	3,5E-03
Dobova	12,1	7,7E-04	6,1E-04	2,4E-04	1,2E-05	7,8E-04	6,1E-04	2,4E-04
Ograja NEK (zahod)	0,2	2,3E-02	1,8E-02	7,2E-03	3,8E-04	2,4E-02	1,8E-02	7,2E-03

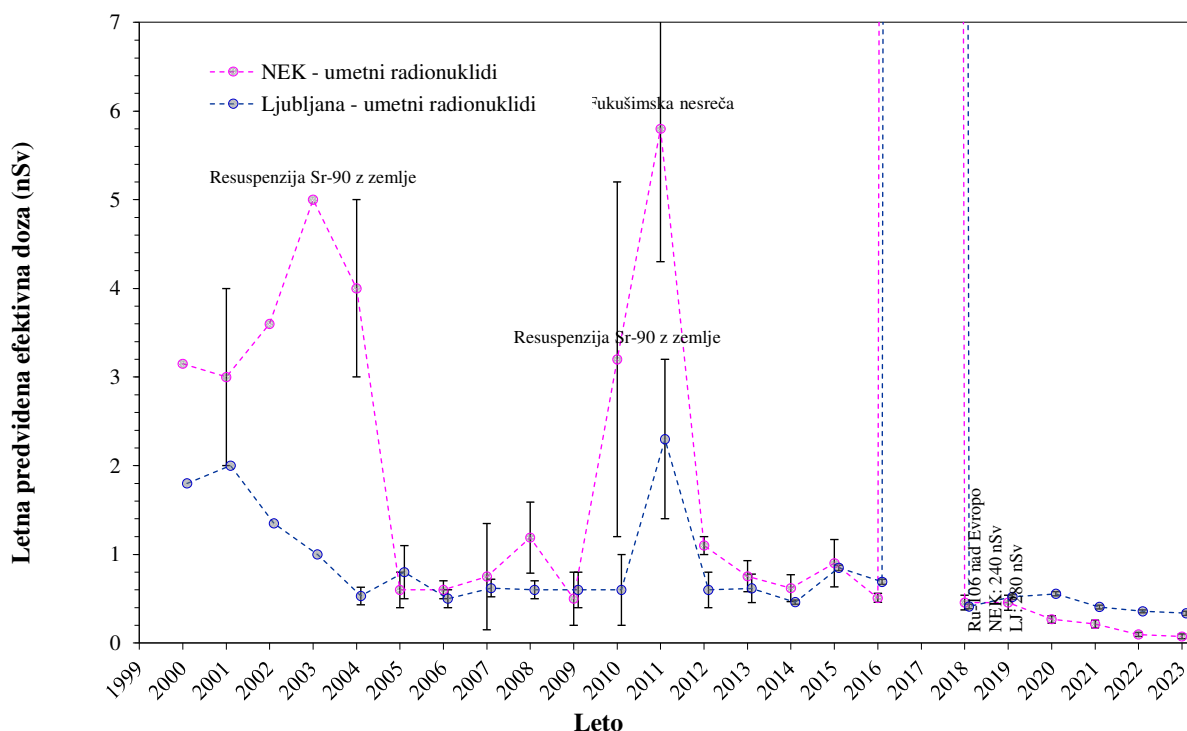
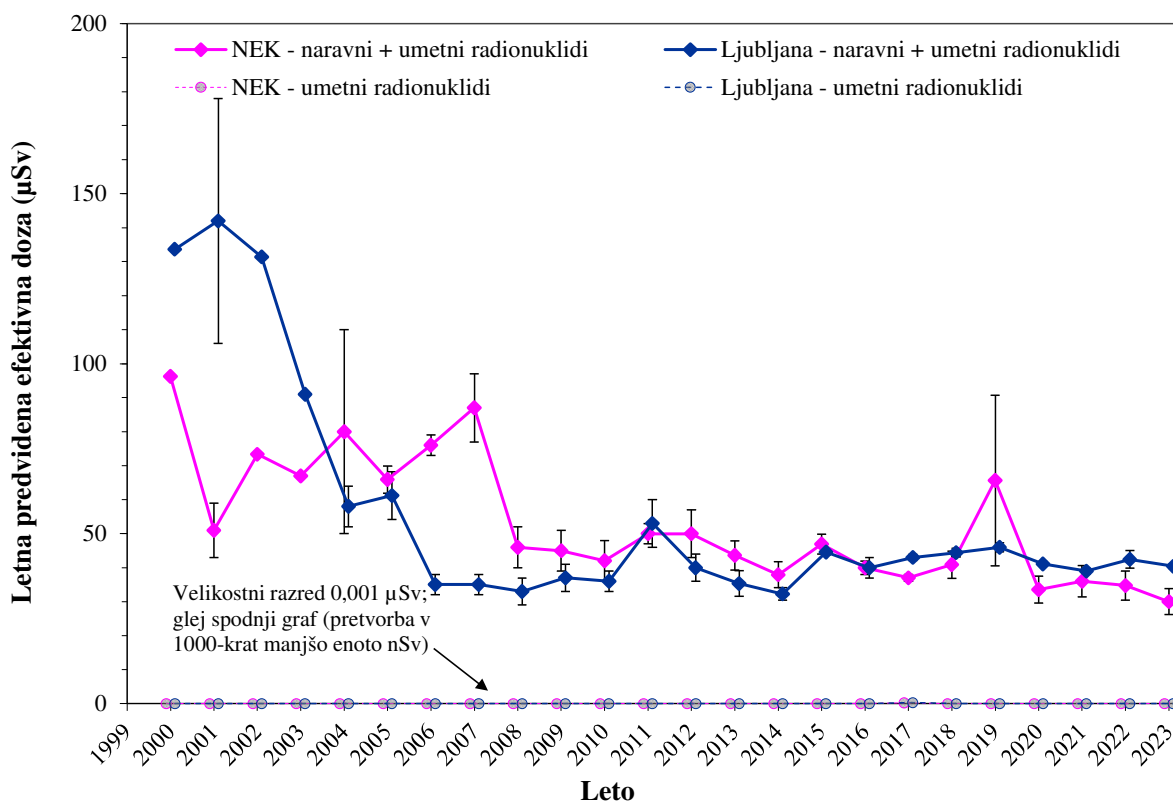
* dolžina sivega drsnika za posamezno starostno skupino sorazmerno izraža skupno dozo.

Doze zaradi radioaktivnosti zraka v okolju (efektivne okoljske doze)

Efektivne okoljske doze za okoliške prebivalce izračunamo iz izmerjenih koncentracij radionuklidov v okolju, in sicer na aerosolnih filtrih zračnih črpalk v okolici NEK (glej sliko 4.2) ob upoštevanju pretvorbene faktorje in značilnosti referenčne osebe. S seštevanjem predvidenih učinkovitih doz posameznih radionuklidov dobimo predvideno učinkovito dozo zaradi inhalacije (vdihavanja) umetnih radionuklidov in inhalacije vseh radionuklidov v aerosolih vključno z naravnimi, pri čemer pa niso všteti prispevki kratkoživih potomcev radona in torona. Rezultati izračunov so zbrani v tabeli 4.8.

Na sliki 4.11 so predstavljene letne predvidene učinkovite okoljske doze zaradi naravnih (v enotah μ Sv) in umetnih radionuklidov (v enotah nSv) za odraslega človeka (referenčna oseba), izračunane iz koncentracij aktivnosti radionuklidov v okolju oziroma iz meritev aerosolnih filtrov v okolici NEK in v Ljubljani v letih od 2000 dalje. Kot je razvidno s slike, je prispevek umetnih radionuklidov v Ljubljani in okolici NEK zelo podoben in je bil v preteklih letih okoli 1 nSv ali manj.

Radionuklida Cs-137 in Sr-90 sta sicer prisotna v globalni kontaminaciji zaradi jedrske nesreče v Černobilu in v manjši meri zaradi jedrske nesreče v Fukušimi ter jedrskih poskusov. Izračunana predvidena učinkovita doza za odraslo referenčno osebo zaradi teh dveh umetnih radionuklidov v globalni kontaminaciji je bila v preteklih letih več kot 10 000-krat manjša od izračunane doze zaradi naravnih radionuklidov (z izjemo leta 2017 zaradi prispevka Ru-106, katerega vir je najverjetneje izpust med predelavo jedrskega goriva na jugu Urala [67]). Povprečna izračunana učinkovita doza za odraslo osebo v okolici NEK zaradi umetnih radionuklidov je bila v obdobju 2007–2022 ($1,1 \pm 0,1$) nSv (brez osamelca 2017). V letu 2023 je bil prispevek Cs-137 k letni dozi ($0,07 \pm 0,03$) nSv, prispevka Sr-90 ni bilo, ker ni bil izmerjen na lokaciji vzorčenja v Stari vasi.



Slika 4.11: Primerjava letnih predvidenih efektivnih okoljskih doz za leta 2000–2023 v okolici NEK in Ljubljani za odrasle osebe iz meritev aerosolov za naravne in umetne radionuklide skupaj v enotah μSv (zgornja slika) in posebej za umetne radionuklide v 1000-krat manjši enoti nSv (spodnja slika). Vrisane negotovosti imajo faktor pokritja $k = 1$ (68-odstotna zanesljivost).



Tabela 4.8: Povzetek vsot predvidenih efektivnih okoljskih doz zaradi inhalacije (vdihavanja) za odrasle, otroke in dojenčke, ki so izračunane iz okoljskih koncentracij radionuklidov, izmerjenih na aerosolnih filtrih v letu 2023 v T-44 do T-55 ter doznih pretvorbennih faktorjev iz referenc [10] in [40].

STAROSTNA SKUPINA	VSOTA PRISPEVKOV PO VRSTAH RADIONUKLIDOV	LETNA EFEKTIVNA OKOLJSKA DOZA IZ KONCENTRACIJ AKTIVNOSTI NA AEROSOLNIH FILTRIH	
		OKOLICA NEK	LJUBLJANA
ODRASLI	umetni radionuklidi	$0,08 \pm 0,03$ nSv	$0,33 \pm 0,02$ nSv
	umetni in naravni radionuklidi	30 ± 4 μ Sv	40 ± 1 μ Sv
OTROCI	umetni radionuklidi	$0,02 \pm 0,02$ nSv	$0,26 \pm 0,02$ nSv
	umetni in naravni radionuklidi	24 ± 3 μ Sv	32 ± 1 μ Sv
DOJENČKI	umetni radionuklidi	$0,02 \pm 0,01$ nSv	$0,11 \pm 0,01$ nSv
	umetni in naravni radionuklidi	11 ± 1 μ Sv	15 ± 1 μ Sv

Na sliki 4.11 je vidnih nekaj odstopanj od sicer pretežno stalnih vrednosti. Visoka doza umetnih radionuklidov v letu 2003 je bila posledica prispevka Sr-90, ki je to leto prispeval kar tri četrtine doze, vendar prispevek ni posledica izpustov iz NEK, temveč resuspenzije z zemlje. Podobno povišan prispevek resuspendiranega Sr-90 z zemlje je bilo opaziti v izmerkkih v letih 2000–2004 in 2010–2011, kjer je bil prispevek k letni dozi nekaj nSv. Višja doza zaradi umetnih radionuklidov v letu 2011 je opazna tako v Ljubljani kot okolici NEK. To je posledica izmerjenih vrednosti Cs-134, Cs-137 in I-131 v marcu in aprilu 2011 zaradi jedrske nesreče v Fukušimi. V letu 2017 je izračunana efektivna doza za odraslo osebo zaradi umetnih radionuklidov (240 ± 20) nSv skoraj izključno zaradi vdihavanja Ru-106, kar je povprečje letnih doz po lokacijah aerosolnih črpalk v okolici NEK. Prispevek Sr-90 k dozi v Ljubljani ni ovrednoten, ker se v zračnih filtrih v okviru nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju Slovenije v Ljubljani ne ugotavlja vsebnosti Sr-90.

Za efektivne okoljske doze naravnih radionuklidov je značilno, da variirajo po letih, kar velja tako za lokacije v okolici NEK kot za lokacijo v Ljubljani. Največji prispevek k efektivni dozi naravnih radionuklidov povzroča Pb-210, kar ni toliko posledica visokih koncentracij v zraku, temveč velikega doznega pretvorbennega faktorja, ki ga ima ta izotop [10]. Prispevek Pb-210 k letni predvideni efektivni dozi v okolici NEK za odraslega človeka je bil v letu 2023 (9 ± 1) μ Sv, kar je zelo podobno dozam iz preteklih let: (21–49 μ Sv na leto v obdobju 2005–2022). Druga dva naravna radionuklida po prispevku k efektivni dozi v letu 2023 sta Th-228 ($0,8 \pm 0,1$) μ Sv in Th-230 ($0,6 \pm 0,4$) μ Sv. Iz meritev koncentracij aktivnosti na aerosolnih filtrih v letu 2023 v Ljubljani so prispevki k dozi v okviru variacij v preteklih letih podobni prispevkom v okolici NEK in sicer (15 ± 1) μ Sv na leto zaradi Pb-210 in ($0,28 \pm 0,02$) μ Sv na leto zaradi Th-228, Th-230 pa v letu 2023 ni bil izmerjen. Velika merska negotovost pri dozi zaradi Th-230 je posledica izmerkkih koncentracij aktivnosti, ki so zelo blizu meje detekcije. V splošnem lahko rečemo, da so na prostem v okolici NEK efektivne doze zaradi vdihavanja naravnih radionuklidov podobne kot drugod po Sloveniji in so nekaj 10 μ Sv na leto [15].

Izračunana predvidena letna efektivna okoljska doza zaradi inhalacije (vdihavanja) za referenčno osebo v okolici NEK za leto 2023 je v okviru negotovosti vsote vseh prispevkov primerljiva z dozo za prebivalca v Ljubljani. Prispevek umetnih radionuklidov globalne kontaminacije je tako v okolici NEK kot v Ljubljani zanemarljiv in za pet velikostnih redov nižji. Povzetek vsot predvidenih efektivnih okoljskih doz, izračunanih iz meritev aerosolnih filtrov, je pokazan v tabeli 4.8.



Primerjava imisijskih doz NEK zaradi umetnih nuklidov in učinkovitih okoljskih doz zaradi naravnih radionuklidov

Ko primerjamo vrednosti iz tabel 4.7 in 4.8 ob upoštevanju tabele 4.5, lahko ugotovimo, da so ocenjene in modelsko izračunane imisijske doze (učinek NEK), zaradi vdihavanja izpuščenih umetnih radionuklidov in imerzije le-teh (13 nSv na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad), za približno 3-4 velikostne rede nižje od učinkovitih okoljskih doz naravnih radionuklidov v okolju, preračunanih iz izmerjenih koncentracij v aerosolih v okolici NEK (30 μ Sv).

SKLEPI

Sedanji program vzorčenja in meritev omogoča primeren vpogled in nadzor zračnih emisij NEK in koncentracij aktivnosti radionuklidov v zraku v okolici NEK. Tako merilne kot tudi evalvacijske metode dajejo konsistentne in zanesljive podatke, ki omogočajo primerjavo za vrsto let nazaj.

Ovrednotenje učinkovitih okoljskih doz temelji na evalvaciji meritev aerosolnih filtrov v okolici NEK, imisijske doze NEK pa dobimo iz izmerjenih atmosferskih izpustov z modelnimi izračuni razredčitvenih koeficientov, ki temeljijo na dejanskih vremenskih podatkih. Tako za leto 2023 velja, da **izpusti hlapov in plinov, ki vsebujejo tritij oziroma C-14**, največ prispevajo k učinkoviti dozi zaradi **vdihavanja (inhalacijska doza)**. Ta je v Spodnjem Starem Gradu za odraslega posameznika iz prebivalstva (referenčno osebo) 12,0 nSv oziroma 0,3 nSv na leto zaradi tritija oziroma C-14, ob ograji NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja), pa 22,5 nSv oziroma 0,6 nSv na leto. Prispevki drugih radionuklidov k inhalacijski dozi so bistveno manjši, vendar pri tem niso vključene posledice prehoda radionuklidov iz zraka v druge prenosne poti. **Izpusti žlahtnih plinov** iz NEK (izotopi Xe in Ar) povzročajo dozo predvsem zaradi **zunanjega sevanja (imerzijska doza)**, ki je za odraslega posameznika iz prebivalstva (naselje Spodnji Stari Grad) 0,2 nSv na leto; na ograji NEK pa 0,4 nSv na leto.

Ocenjena **skupna imisijska letna učinkovita doza NEK** v 2023 za odraslega posameznika iz prebivalstva, ki je posledica inhalacije (vdihavanja) in imerzije (zunanjega sevanja) **zaradi izpustov NEK**, je v Spodnjem Starem Gradu 13 nSv, ob ograji NEK pa 24 nSv.

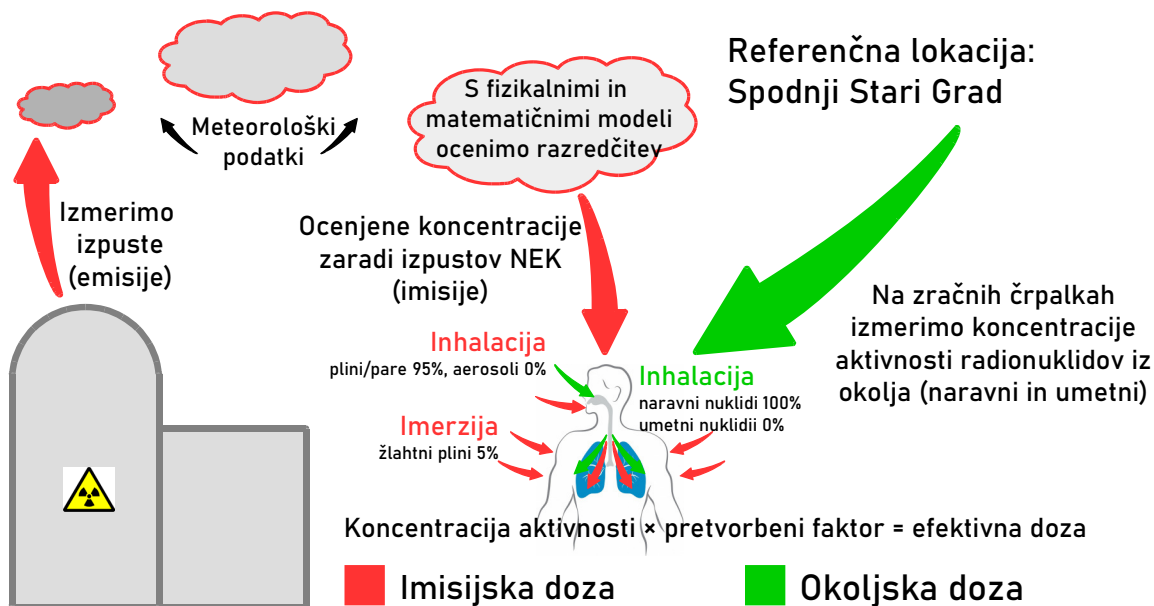
Predvidena **učinkovita okoljska doza zaradi inhalacije** (vdihavanja) aerosolov v okolici NEK je predvsem posledica inhalacije **dolgoživih naravnih radionuklidov** in je za odraslega posameznika (30 \pm 4) μ Sv na leto; doza je v okviru pričakovanj in na ravni povprečne vrednosti zadnjih let. Predvidena **učinkovita okoljska doza zaradi inhalacije** (vdihavanja) **umetnih radionuklidov** v aerosolih v okolici NEK je posledica radionuklidov, ki so del globalne kontaminacije zaradi jedrskih poskusov in černobilske kontaminacije, in je za odraslega posameznika (0,08 \pm 0,03) nSv na leto. Ocenjene in modelsko izračunane imisijske doze NEK zaradi umetnih radionuklidov so za nekaj velikostnih redov nižje od učinkovitih okoljskih doz zaradi naravnih radionuklidov.

V letu 2008 je Evropska komisija izdala poročilo [69], v katerem so izračunane predvidene letne učinkovite doze zaradi izpustov iz jedrskih elektrarn in obratov za predelavo jedrskega goriva v Evropi. Doze v poročilu Evropske komisije so izračunane za referenčno osebo za vse objekte ob enakih predpostavkah in na enakih razdaljah 500 m in 5 000 m od objekta. Pri ocenjevanju doze zaradi plinastih izpustov je učinkovita doza za 75 % objektov manjša od 1,4 μ Sv na leto na razdalji 500 m (rob izključitvenega območja) in manjša od 0,24 μ Sv na leto na razdalji 5 000 m. Kot je razvidno iz tabele 4.7, so za NEK ocenjene doze bistveno nižje: na razdaljah 200 m (ograja NEK) oziroma 800 m (Vrbina) od NEK (ekvivalent 500 m) sta dozi 0,0235 μ Sv in 0,0105 μ Sv na leto, na večjih razdaljah 3 000 m (Pesje) oziroma 7 100 m (Brežice) od NEK (ekvivalent 5 000 m) pa 0,0114 μ Sv in 0,0027 μ Sv na leto.



GRAFIČNI PRIKAZ PRISPEVKOV ZA OCENO EFEKTIVNE DOZE PO ZRAČNI PRENOSNI POTI

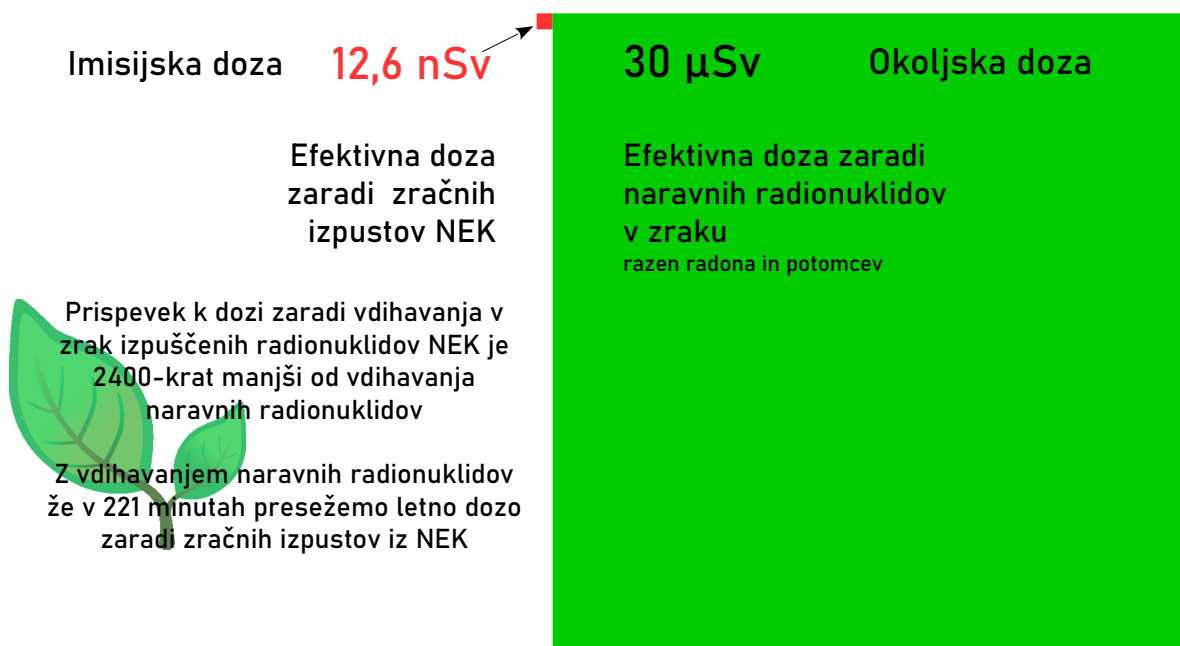
Kako ocenimo doze zaradi zračnih izpustov?



Kakšne so letne efektivne doze zaradi vdihavanja radionuklidov?

Efektivne doze zaradi zračnih izpustov NEK oziroma zaradi naravnih radionuklidov v okolju so označene z rdečim ■ oziroma zelenim ■ kvadratom

Površina kvadrata ustreza dozi!







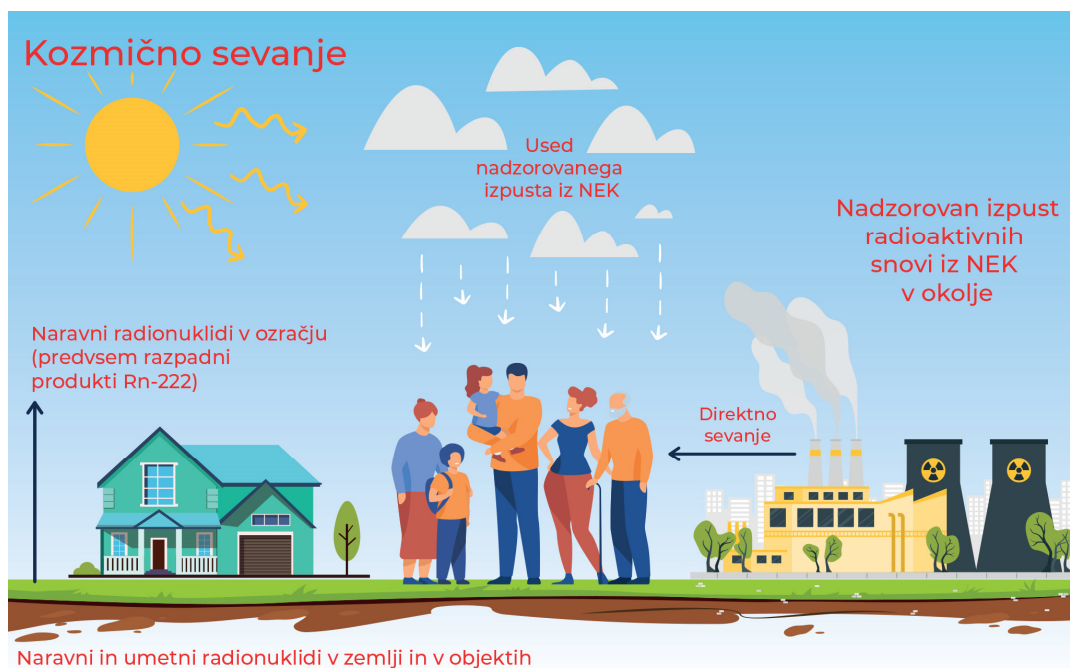
5 ZUNANJE SEVANJE

POVZETEK

Zunanje sevanje, ki mu je izpostavljeno prebivalstvo, vključuje kozmično sevanje, sevanje naravnih radionuklidov (predvsem potomcev radona) v ozračju, sevanje iz radioaktivnega oblaka ob izpustu radioaktivnih snovi iz NEK v okolje in zunanje sevanje zaradi useda, ki se odloži po prehodu oblaka, ter sevanje naravnih in umetnih radionuklidov v zemlji in v objektih. Ocena dozne obremenitve (okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$) zaradi zunanjega sevanja se izračuna iz ugotovljene radioaktivnosti zemlje in zraka, neposredno pa se meri s termoluminiscenčnimi dozimetri in kontinuirnimi merilniki hitrosti doze.

Za izračun prispevka k sevalni obremenitvi prebivalstva zaradi sevanja naravnih in umetnih radionuklidov v zemlji je v letu 2023 v okviru nadzora radioaktivnosti potekalo vzorčenje zemlje na treh lokacijah v okolici NEK. Rezultati meritev kažejo, da se specifične aktivnosti naravnih radionuklidov z globino ne spreminjajo, so pa manjše na Kusovi Vrbini, ki je največkrat poplavljena. Vrednosti $H^*(10)$ zaradi radioaktivnosti v zemlji pri predpostavki enakomerne porazdelitve za naravne radionuklide in realne porazdelitve za Cs-137 so v letu 2023 v okolici NEK ($0,50 \pm 0,02$) mSv za zemljo v Kusovi Vrbini, ($0,65 \pm 0,03$) mSv za zemljo na Gmajnicah in ($0,66 \pm 0,02$) mSv za zemljo v Ameriki. Iz meritev globinske odvisnosti specifične aktivnosti Cs-137 na posameznih lokacijah lahko sklepamo na kompleksnost delovanja površinske in podtalne vode.

V letu 2023 so bile v teku obratovalnega nadzora radioaktivnosti NEK opravljene neodvisne meritve doze zunanjega sevanja s termoluminiscenčnimi dozimetri (TLD) in kontinuirnimi merilniki hitrosti doze (Envinet MIRA, AMES/MFM, Atomtex/MFM in Gihmm). Meritve s TLD in merilniki hitrosti doze kažejo v okviru merske negotovosti enako vrednost letnega okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ kot v zadnjih letih. Povprečni letni dozni ekvivalent $H^*(10)$ je bil v okolici NEK ($0,78 \pm 0,10$) mSv, na ograji NEK ($0,55 \pm 0,03$) mSv, v okolici Zagreba na Hrvaškem pa ($0,81 \pm 0,11$) mSv. Prispevki k zunanjemu sevanju zunaj ograje NEK zaradi sevanja iz objektov NEK in atmosferskih izpustov radioaktivnih snovi so bili, enako kot v prejšnjih letih, v letu 2023 nemerljivi. Posredno smo konservativno ocenili, da je bila letna efektivna doza zunanjega sevanja zaradi useda iz oblaka kot posledica izpustov iz NEK manjša od $1,0 \text{ E-}10$ mSv.



Slika 5.1: Prispevki k okoljskemu doznemu ekvivalentu $H^*(10)$ zaradi zunanjega sevanja. Direktno sevanje iz objektov NEK je nedoločljivo.



UVOD

Viri ionizirajočega sevanja v človekovem naravnem in bivalnem okolju so primarni kozmični žarki, zrak in zemlja. Primarni kozmični žarki izvirajo iz vesolja in Sonca, zato je izpostavljenost kozmičnemu sevanju večja na večjih višinah. Kozmični žarki tudi povzročajo jedrske reakcije visoko v ozračju, radioaktivni produkti teh reakcij pa z zračnimi tokovi dosežejo nižje zračne plasti, od koder se izpirajo in odlagajo na površino zemlje. Hitrost doze zaradi galaktičnih in izvengalaktičnih kozmičnih žarkov je odvisna od sončne aktivnosti, ker sončni veter odklanja primarne kozmične žarke, ki v stratosferi in zgornji troposferi povzročajo plazove sekundarnih kozmičnih žarkov, to je nabitih delcev, nevtronov in rentgenskih žarkov. Hitrost doze zaradi kozmičnih žarkov je zato odvisna od sončne aktivnosti, ki kaže 11-letni cikel [70].

Naravno sevanje iz zemlje izvira od členov razpadnih verig urana U-238 z razpolovno dobo $4,45 \cdot 10^9$ let, torija Th-232 z razpolovno dobo $1,41 \cdot 10^{10}$ let ter radioaktivnega izotopa kalija, K-40, z razpolovno dobo $1,28 \cdot 10^9$ let. Ti radionuklidi so nastali, ko je nastala snov, iz katere je zemeljska skorja. Časovna odvisnost hitrosti doze na določeni lokaciji zaradi radioaktivnosti v zemlji ni konstantna. Spreminja se zaradi atenuacije žarkov gama, ki je odvisna od vlage v zemlji in pozimi zaradi snega. Tudi po površini zemlje ni enakomerno porazdeljena, ker uran, torij in kalij niso porazdeljeni enakomerno.

Med členi uranove in torijeve razpadne verige je tudi žlahtni plin radon, ki z difuzijo prehaja iz zemlje, kjer je nastal, v zrak in tam razpada. Potomci radona ostanejo delno v zraku, delno pa se odlagajo na površino zemlje z izpiranjem in usedanjem. Ker so razpadni produkti radona, ki sevajo žarke gama, kratkoživi, časovna odvisnost te radioaktivnosti sledi vremenskim pogojem, v katerih so prehajanje iz zemlje ter izpiranje in usedanje iz ozračja posebej izraziti. V teh pogojih lahko hitrost doze na površini zemlje naraste tudi za red velikosti. Hitrost doze zaradi izpiranja in usedanja iz zraka je torej določena z vremenskimi pogoji, ki so v času neenakomerno porazdeljeni. Zato časovna odvisnost doze zaradi usedanja radonovih potomcev neurejeno niha.

Razen naravne radioaktivnosti so v zemlji prisotne tudi radioaktivne snovi zaradi kontaminacije ozračja, ki izvira iz človekove dejavnosti. Umetna radioaktivnost je posledica jedrskih eksplozij v ozračju, nesreč pri skladiščenju in predelavi radioaktivnih snovi, nesreč v jedrskih elektrarnah, načrtovanih izpustov radioaktivnih snovi v okolje ter neposrednega sevanja iz jedrskih objektov (jedske elektrarne, raziskovalni reaktorji, predelovalni obrati...) in uporabnikov radioaktivnih snovi. Geografska porazdelitev usedov umetnih radioaktivnih snovi je določena z zračnimi tokovi v času izpusta radioaktivnosti. Ta globalna kontaminacija zemlje je nastala zaradi izpiranja radioaktivnosti iz zraka, hitrost doze zaradi te kontaminacije pa se s časom manjša zaradi radioaktivnega razpada in izpiranja kontaminacije v globlje zemeljske sloje. Če želimo ločiti prispevke k zunanji dozi zaradi kozmičnega sevanja, izpiranja in usedanja naravne in umetne radioaktivnosti iz zraka ter radioaktivnosti zemlje, lahko to naredimo na podlagi časovnih odvisnosti doze ali njene hitrosti.

Izpostavitev prebivalstva zunanjemu sevanju določamo na dva načina: z neposrednimi meritvami zunanjega sevanja in iz meritev kontaminacije, to je iz koncentracij radioaktivnih snovi v okolju. Program meritev je določen v *Zakonu o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-1)* [6] in *Pravilniku o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8]. Da bi ugotovili učinek delovanja NEK na okolje, izvajamo v okolici NEK neprekinjene meritve zunanjega sevanja, neprekinjena vzorčenja aerosolov v zraku in periodične meritve aerosolov ter periodična vzorčenja in meritve radioaktivnosti zemlje in suhega useda. Učinek jedrske elektrarne na zunanje sevanje ugotavljamo s primerjavo meritev v okolici NEK z meritvami, ki so bile izvedene na večjih oddaljenostih, učinek izpustov NEK v zrak in vodo pa z meritvami radioaktivnosti zraka, radioaktivnosti rečnega sedimenta in radioaktivnosti zemlje na lokacijah, kjer Sava poplavlja, in na lokacijah, kjer Sava ne poplavlja, ter suhega useda.

Za sprotne meritve zunanjega sevanja uporabljamo sistem kontinuirnih merilnikov hitrosti doze, ki so porazdeljeni v okolici jedrske elektrarne, in sistem merilnikov zunanjega sevanja, ki so razporejeni po Sloveniji (Envinet MIRA, AMES/MFM, Atomtex/MFM in Gihmm). Ta dva sistema se uporabljata tudi za zgodnje opozarjanje v primeru povišane radioaktivnosti v zraku.



Meritve zunanjega sevanja izvajamo tudi s pasivnimi merilniki TLD (termoluminiscenčnimi dozimetri), ki merijo dozo v časovnem intervalu, ko so izpostavljeni. Tudi pri teh meritvah ugotavljamo učinek NEK s primerjavo med dozami, izmerjenimi s sistemom merilnikov, porazdeljenih v okolici NEK, in dozami, izmerjenimi s sistemom merilnikov, ki so razporejeni po Sloveniji.

Medtem ko z merilniki doze in hitrosti doze merimo skupno dozo naravnega in umetnega sevanja, lahko pri meritvah kontaminacije ločimo prispevke naravne radioaktivnosti, globalne kontaminacije zaradi eksplozij atomskih bomb in nesreč v jedrskih elektrarnah ter možne kontaminacije zaradi izpustov NEK. Meritve kontaminacije vzorcev, zbranih v okolici NEK, opravljamo z visokoločljivo spektromerijo gama, s katero merimo kontaminacijo vzorcev s posameznimi sevalci gama. Ker so v izpustih NEK sevalci gama, ki ne pripadajo niti naravni radioaktivnosti niti globalni kontaminaciji, lahko učinek jedrske elektrarne določimo na podlagi koncentracij sevalcev gama, ki so specifični za te izpuste. Doze sevanja zaradi posameznih sevalcev gama določimo računsko iz koncentracij in doznih koeficientov za zunanje sevanje za posamezne predpostavljene prostorske porazdelitve kontaminacije (poglavje *Zrak*).

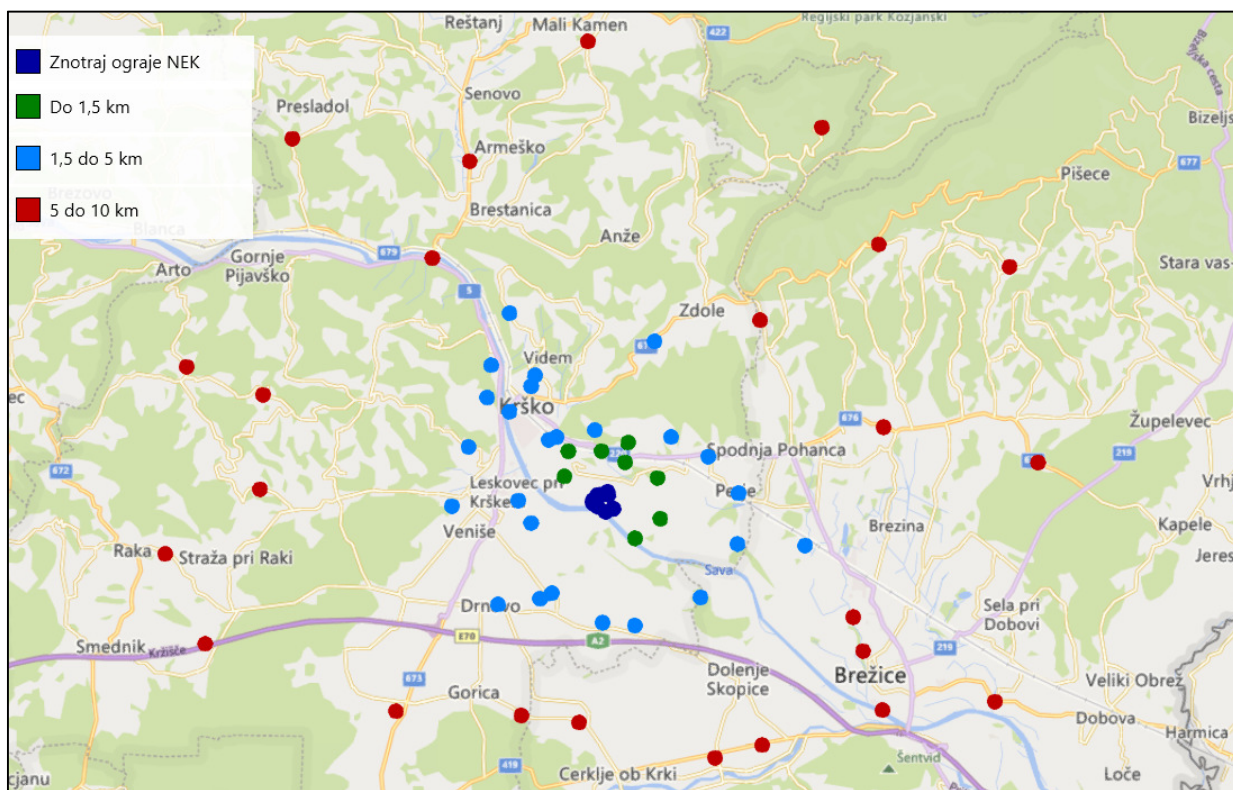
Meritve TLD

Rezultati meritev doze zunanjega sevanja (sevanja gama in ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja) za leto 2023 so v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645* v tabelah T-53/b in T-53/c za dozimetre v okolici NEK, za dozimetre na ograji NEK in okolici suhega skladišča NEK. Na sliki 5.2 prikazujemo mesta, kjer so postavljeni termoluminiscenčni dozimetri. V tabeli 5.1 in na sliki 5.3 so povzeti povprečni letni okoljski dozni ekvivalenti za okolico NEK, za ograjo NEK, za Slovenijo in za okolico Zagreba v letu 2023. V okviru merske negotovosti so letni okoljski dozni ekvivalenti v različnih oddaljenostih od NEK primerljivi s tistimi v preteklih letih.

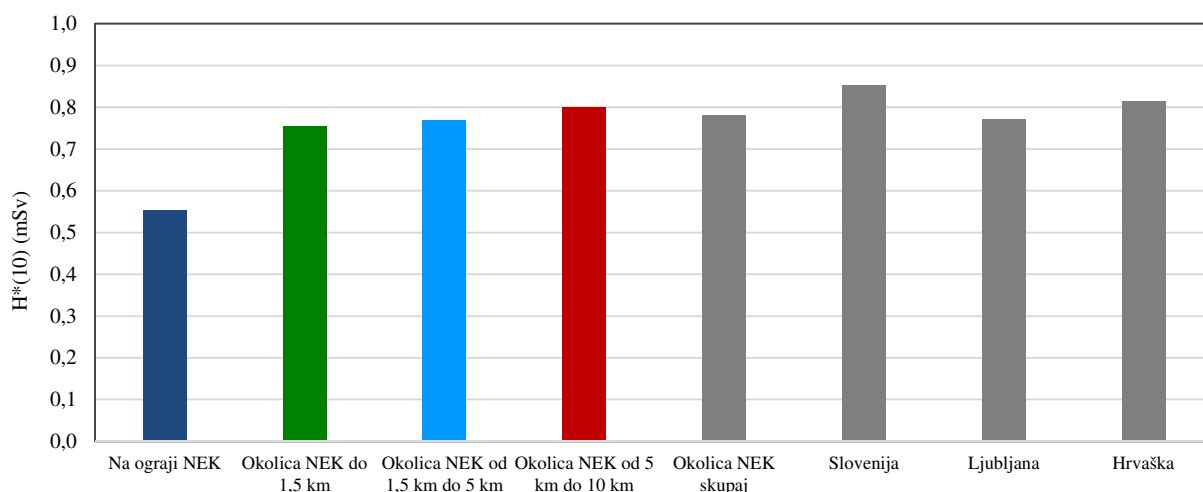
Tabela 5.1: Letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ na ograji NEK, v okolici NEK, v Sloveniji, Ljubljani in na Hrvaškem v letu 2023

Lokacija	Št. TLD	$H^*(10)$ (mSv)	Razpon $H^*(10)$ (mSv)
Na ograji NEK	9	$0,55 \pm 0,03$	0,49–0,60
Suho skladišče NEK	7	$0,58 \pm 0,004$	0,57–0,58
Okolica NEK skupaj	57	$0,78 \pm 0,10$	0,61–1,05
Okolica NEK do 1,5 km	8	$0,75 \pm 0,14$	0,61–1,05
Okolica NEK od 1,5 km do 5 km	25	$0,77 \pm 0,09$	0,64–0,92
Okolica NEK od 5 km do 10 km	24	$0,80 \pm 0,10$	0,62–0,96
Slovenija	50	$0,85 \pm 0,15$	0,58–1,32
Ljubljana – referenčna lokacija	1	$0,77 \pm 0,09$	–
Hrvaška	10	$0,81 \pm 0,11$	0,66–1,01

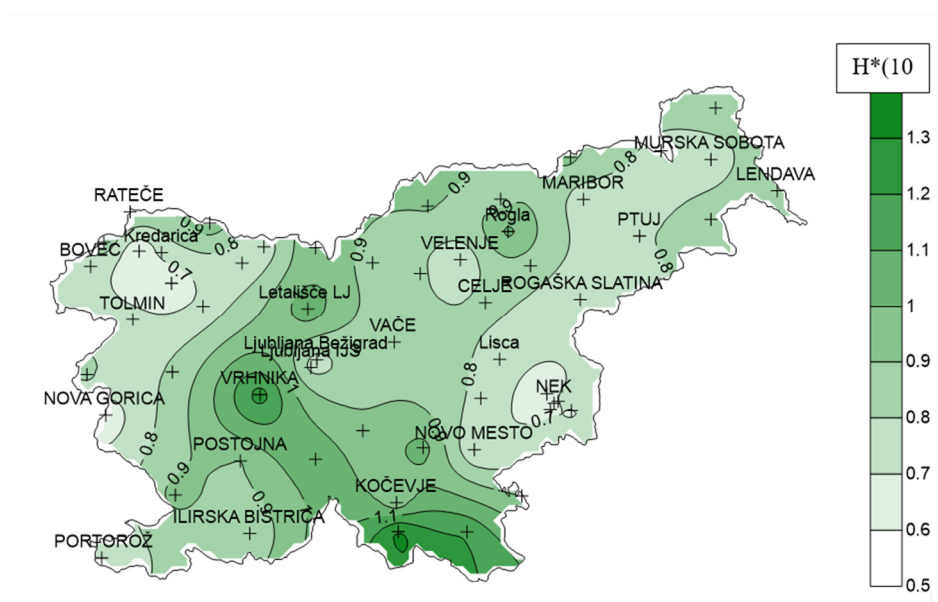
Meritve v Sloveniji v letu 2023 (slika 5.4) [19] kažejo, da je povprečni letni okoljski dozni ekvivalent v okolici NEK sistematično nekoliko nižji kot v življenjskem okolju v Sloveniji. Iz tabele 5.1 in slike 5.3 je razvidno, da so letne doze na ograji NEK za približno 30 % nižje kot sicer doze v okolju. Razliko pripisujemo prodnatim tlom z odstranjeno plastjo zemlje in zaščitnemu delovanju zgradb ter asfaltiranih površin znotraj ograje NEK, ki slabijo zunanje sevanje naravnih radionuklidov iz zemljišča. Tudi dodatni dozimetri ob zahodni ograji NEK, kjer je suho skladišče izrabljenega goriva, so pokazali povprečen letni dozni ekvivalent, ki je v okviru stresanja podatkov primerljivo z letnim doznim ekvivalentom, ki smo ga izmerili s TLD na ograji NEK. Neposredni učinek sevanja iz elektrarniških objektov na ograji ni merljiv [1]. Na sliki 5.5 so povzeti rezultati meritev povprečnih letnih okoljskih doznih ekvivalentov, izmerjenih v okolici NEK, na ograji NEK, v Sloveniji in na Hrvaškem od leta 1989 do leta 2023.



Slika 5.2: Prikaz razporeditve TLD meritev zunanje sevanja s 57 dozimetri v okolici NEK in z 9 dozimetri na ograji NEK

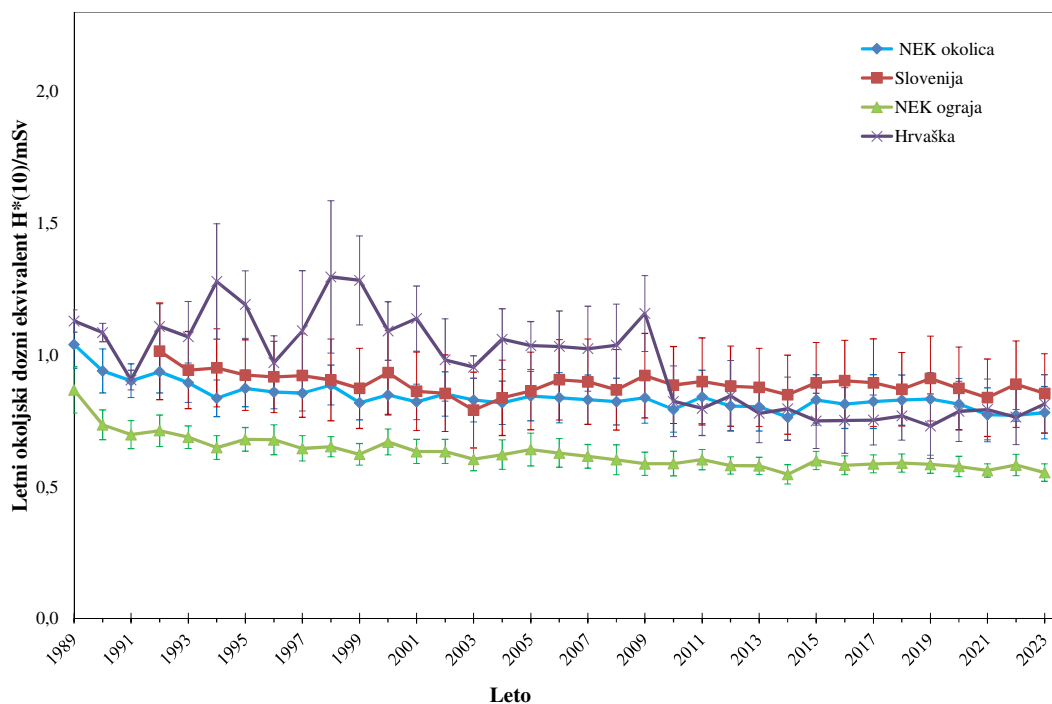


Slika 5.3: Primerjava med povprečnimi okoljskimi dozimi ekvivalenti $H^*(10)$, izmerjenimi v okolici NEK, na referenčni lokaciji v Ljubljani, povprečnimi ekvivalenti, izmerjenimi na Hrvaškem v okviru programa nadzora radioaktivnosti v okolici NEK, ter povprečnimi ekvivalenti, izmerjenimi v okviru meritev radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v letu 2023.

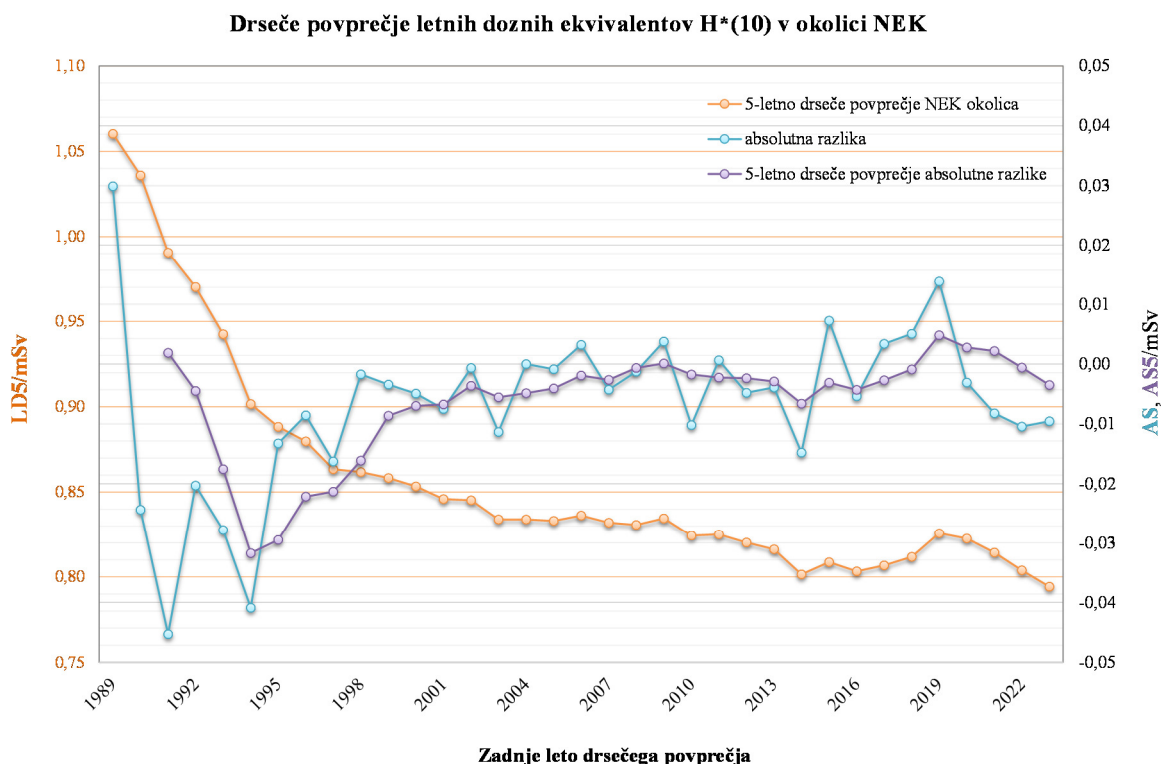


Slika 5.4: Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ po Sloveniji v letu 2023 [19]

Za meritve, narejene na območju Slovenije, je značilno izrazito zmanjševanje letne doze, predvsem v prvih letih po černobilski nesreči, ki se je zgodila leta 1986, sedaj pa je okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ konstanten. Vzroka sta razpad usedlih kratkoživih sevalcev gama, ki so v začetnem obdobju največ prispevali k zunanjemu sevanju, in prodiranje Cs-137 v globino. V zadnjih desetih letih, ko je v okolju še edini umetni sevalec gama Cs-137, je upadanje, ki ga lahko pripišemo radioaktivnemu razpadu Cs-137, izzvenelo, saj je njegov učinek na zmanjšanje letne doze manjši od razsutja izmerkov. Na sliki 5.6 je prikazano 5-letno drseče povprečje absolutnih sprememb letnih doz (AS5) v okolici NEK.



Slika 5.5: Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ v okolici NEK, na ograji NEK, v Sloveniji ter na Hrvaškem od leta 1989 do 2023.



Slika 5.6: Petletno drseče povprečje letnih doznih ekvivalentov $H^*(10)$ (LD_5), absolutna sprememba 5-letnega drsečega povprečja (AS) in 5-letno drseče povprečje absolutne spremembe (AS_5) v okolici NEK od 1989 do 2023. Zaradi boljše preglednosti negotovosti na sliki niso prikazane.

OKOLJSKI VZORCI

Značilnosti vzorčenja in meritev

Zemljo vzorčimo na treh lokacijah na poplavnih področjih nizvodno od NEK. Najpogosteje je poplavljen lokacija Kusova Vrbina, navadno pri pretoku Save, ki je večji od 1 000 m³/s. Na tej lokaciji je torej prisotnost umetnih radionuklidov v zemlji lahko posledica radioaktivnega useda iz zraka ali pa izpustov NEK v reko Savo. Poplavljanje lahko spremeni globinsko porazdelitev odloženih radionuklidov, ki jih pričakujemo v zemlji.

Lokacije, kjer vzorčujemo, so na neobdelanih površinah. Vzorčenje poteka v štirih plasteh na globinah 0–5 cm, 5–10 cm, 10–15 cm in 15–30 cm. Tako določimo, kako je kontaminacija porazdeljena po globini. Hkrati z vzorci zemlje zberemo še vzorce trave. Pomembno je, da so mesta, kjer periodično zbiramo vzorce, blizu skupaj, da lahko primerjamo rezultate odvzemov na isti lokaciji.

Zemlja se vzorči spomladi in jeseni na naslednjih lokacijah:

- Amerika, levi breg Save, nizvodna razdalja od NEK 3,5 km, tip zemlje je rjava naplavina;
- Gmajnice, desni breg Save, nizvodna razdalja od NEK 2,5 km, tip zemlje je mivkasta borovina;
- Kusova Vrbina – Trnje, levi breg Save, nizvodna razdalja od NEK 8,5 km, tip zemlje je mivkasta borovina.

Metoda vzorčenja je predpisana s *Pravilnikom o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8], postopek pa je opisan v navodilu *Zbiranje in priprava vzorcev zemlje (LMR-DN-07)*.



Skladno z *Zakonom o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti* [7] in s *Pravilnikom o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8] se zunanje sevanje v okolici NEK meri neprekinjeno z okoljskimi termoluminiscenčnimi dozimetri (TLD). Ti dozimetri merijo sevanje gama in ionizirajočo komponento kozmičnih žarkov. Neposredne meritve zunanjega sevanja se izvajajo s 57 dozimetri v okolici NEK in z 9 dozimetri na ograji NEK. Vsi dozimetri so tipa TLD-IJS-05 (CaF₂:Mn) in so nameščeni na razdaljah do 10 km od NEK. Postavljeni so na lokacijah v urbanem in ruralnem okolju z obdelanim in neobdelanim zemljiščem in so nameščeni na višini 1 m od tal. Odčitavanje poteka po sistemu IJS MR 200 (C) v *Laboratoriju za dozimetrijo (TLD)* na IJS. S tem sistemom lahko merimo okoljske doze (okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$) v intervalu od 7,5 μ Sv do 5 Sv [73]. V okviru nadzornega programa NEK so na Hrvaškem postavljeni merilniki TLD LiF:Mg,Cu,P (MCP-N, Poljska), CaF₂ (IJS, Slovenija), OSL Al₂O₃:C (Rusija) in radiofotoluminiscentni merilniki FD-7 (Japonska) na desetih lokacijah.

Neodvisno od programa monitoringa sevanja v okolici NEK poteka v Sloveniji meritev doze zunanjega sevanja z dozimetri TLD na 50 lokacijah po vsej državi. Kot referenčni dozimeter pri obdelavi rezultatov meritev doze zunanjega sevanja se uporablja TLD, ki je postavljen na dvorišču IJS. Vsi dozimetri TLD, ki so postavljeni v Sloveniji, se odčitavajo polletno, v obdobju junij–julij in december–januar. Dozimetri so bili kalibrirani v *Laboratoriju za dozimetrične standarde (NDS)* na IJS v fotonskem sevalnem polju od 40 keV do 1 332 keV. Dozimetri, ki merijo dozo zunanjega sevanja na Hrvaškem, so bili kalibrirani v *Sekundarnem standardnem dozimetrijskem laboratoriju (SSDL)* na IRB v Zagrebu [73], [74].

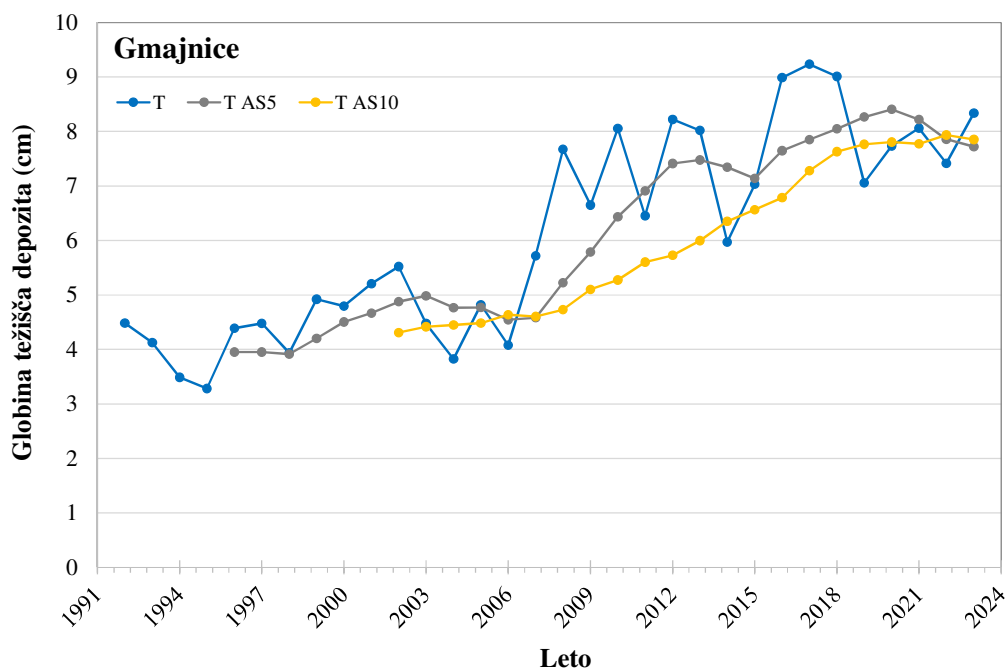
V okolici NEK je postavljenih 14 kontinuirnih merilnikov hitrosti doze, od tega jih 13 nadzira NEK, en pa deluje v sklopu mreže URSJV. Ta mreža je del mreže URSJV – MOP za zgodnje zaznavanje sprememb zunanjega sevanja, v kateri deluje 84 merilnikov. Podatki o teh meritvah so sprotno dostopni na spletnem naslovu <http://www.radioaktivnost.si>.

REZULTATI MERITEV IN ZNAČILNI ČASOVNI POTEKI

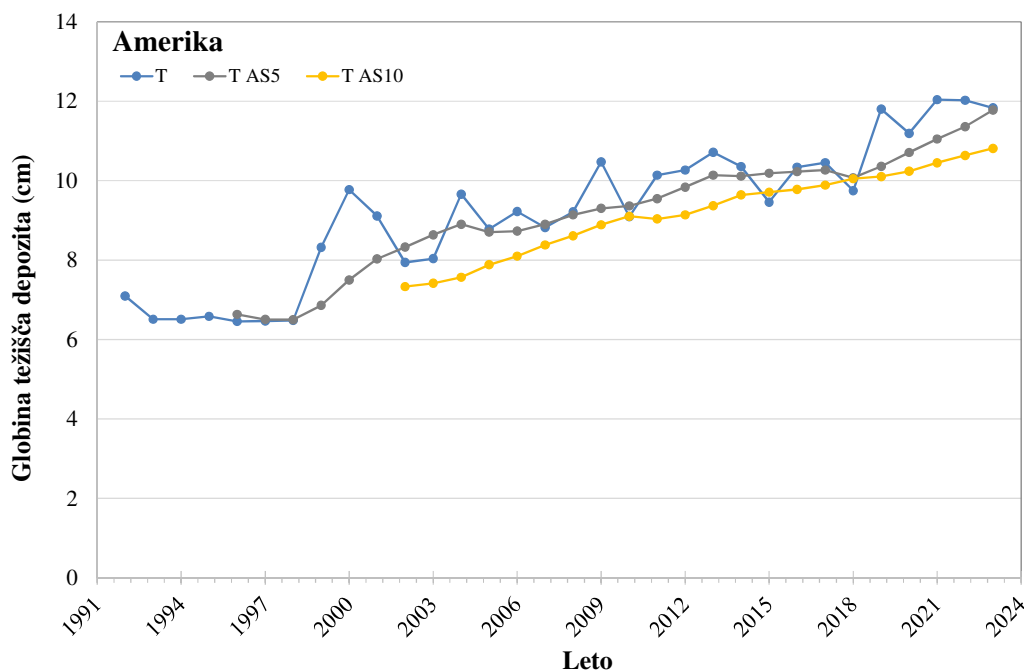
Cs-137 v zemlji

Rezultati meritev specifične aktivnosti radionuklidov v vzorcih zemlje so zbrani v tabelah T-57, T-58, T-59 in T-60, ki so na priloženi zgoščenci v poročilu *Merski rezultati - nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023*, IJS-DP-14645, marec 2024. Izmerjeni so bili naravni radionuklidi ter umetna radionuklida Cs-137 in Sr-90, ki sta prisotna zaradi globalne kontaminacije. Drugi radionuklidi, ki se pojavljajo v izpustih NEK (plinasti izpusti), so prikazani v tabeli 5.4, tekoči izpusti se obravnavajo v poglavju *Radioaktivnost v reki Savi*. Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v zemlji iz uranovega in torijevega razpadnega niza ter K-40 se pri spomladanskem in jesenskem vzorčenju v okviru negotovosti tipično ujemajo. Te aktivnosti ne kažejo nobene izrazite odvisnosti od globine vzorčenja. Izjema je Pb-210, ki se kot razpadni produkt Rn-222 izpira iz atmosfere in so zato njegove koncentracije višje v zgornjih plasteh zemlje. Zaradi tega ne moremo pričakovati ujemanja specifičnih aktivnosti pri pomladnem in jesenskem vzorčenju. Podobno velja za kozmogeni Be-7, ki pa se zaradi kratkega razpadnega časa pojavlja v merljivih koncentracijah le v zgornjih plasteh zemlje. Tudi pri Cs-137 se lahko vrednosti, določene pri posameznih vzorčenjih, razlikujejo zunaj okvira negotovosti zaradi prerazporeditve Cs-137 na mikrolokacijah. Specifični aktivnosti obeh članov torijevega razpadnega niza Ra-228 in Th-228 se ujemata, pri uranovi razpadni vrsti pa je zaradi večje topnosti urana specifična aktivnost U-238 nižja od specifične aktivnosti Ra-226. Rezultati meritev kažejo, da so specifične aktivnosti radionuklidov iz uranovega in torijevega razpadnega niza ter K-40 nižje na lokacijah, ki so izpostavljene rednim poplavam. Specifične aktivnosti K-40, U-238 in Ra-226 so primerljive s povprečnimi aktivnostmi, ki jih navaja UNSCEAR [42] za države južne Evrope.

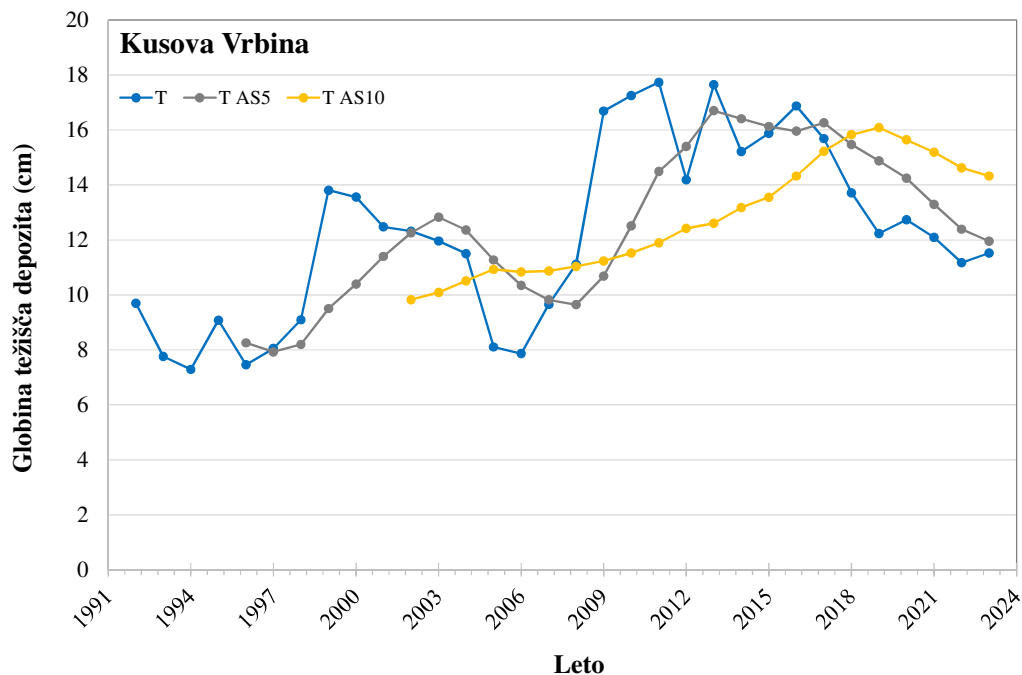
Na slikah 5.7a–5.7c (skale na ordinatnih oseh so različne) je prikazana časovna odvisnost globine težišča nanosa (depozita) na podlagi meritev od leta 1992 dalje za lokacije Gmajnice, Amerika in Kusova Vrbina.



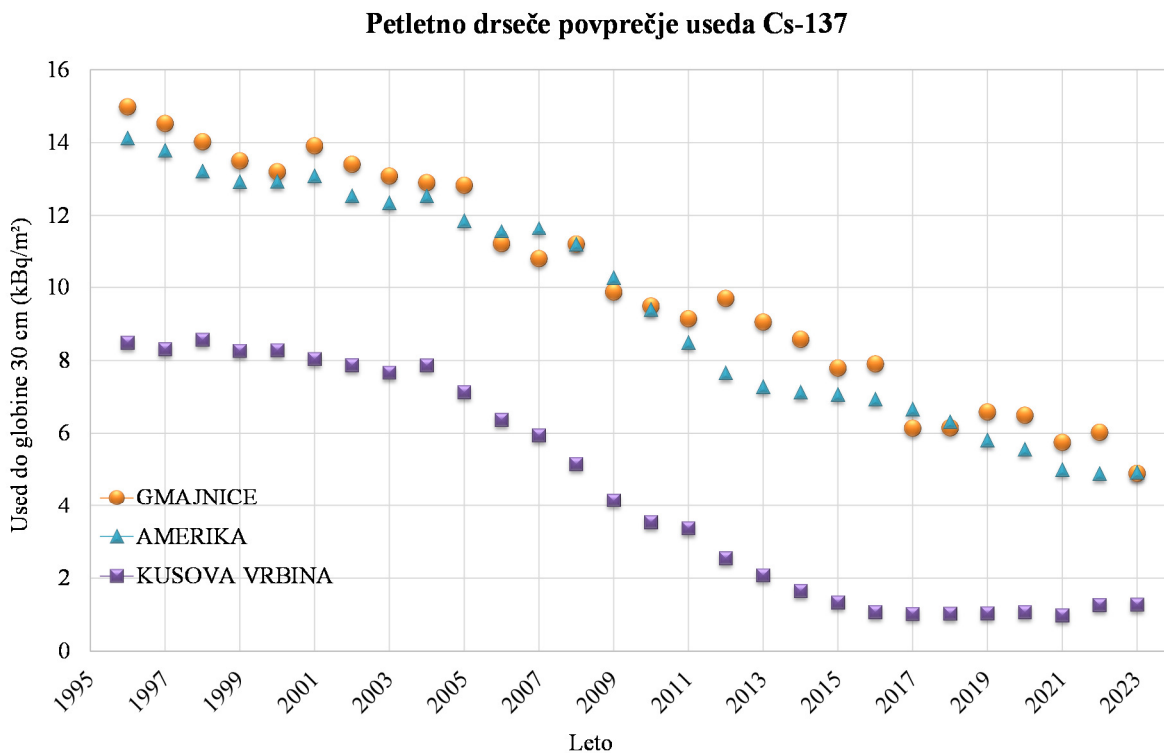
Slika 5.7a: Globina težišča nanosa Cs-137, izračunanega na podlagi letnih vzorčenj za lokacijo Gmajnice. Prikazano je tudi 5-letno (T AS5) in 10-letno (T AS10) drseče povprečje globine težišča depozita.



Slika 5.7b: Globina težišča nanosa Cs-137, izračunanega na podlagi letnih vzorčenj za lokacijo Amerika. Prikazano je tudi 5-letno (T AS5) in 10-letno (T AS10) drseče povprečje globine težišča depozita.



Slika 5.7c: Globina težišča nanosa Cs-137, izračunanega na podlagi letnih vzorčenj za lokacijo Kusova Vrbina. Prikazano je tudi 5-letno (T AS5) in 10-letno (T AS10) drseče povprečje globine težišča depozita.



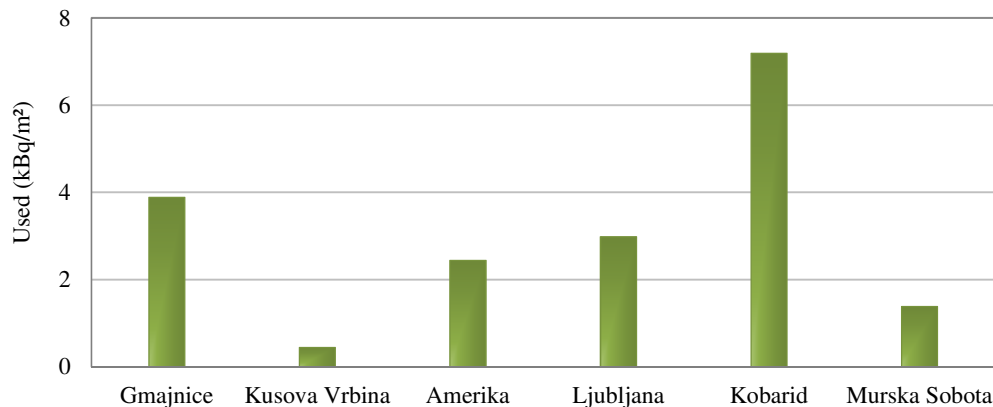
Slika 5.8: Petletno drseče povprečje useda Cs-137 do globine 30 cm za lokacije Gmajnice, Amerika in Kusova Vrbina.



Opazno je precejšnje razsutje vrednosti, izračunanih iz rezultatov meritev specifičnih aktivnosti v posameznih letih. Vzroka sta lahko dva. Prvi je nehomogenost svežega nanosa po černobilski nesreči in vpliv prednostnih smeri toka vode v zemeljski ruši, ki lahko bistveno spremeni pričakovano porazdelitev radionuklidov v zemlji tudi na bližnjih lokacijah [42]. Drugi in bolj vpliven vzrok je prerazporeditev useda na mikrolokaciji. Prerazporeditev je posledica hidrogeoloških procesov, ki vplivajo na prodiranje Cs-137 v zemljinu. Vpliv teh procesov je še posebej opazen na sliki 5.7c, ki prikazuje globino težišča nanosa na lokaciji Kusova Vrbina, ki je pogosto poplavljena. Dva izrazita skoka v globini težišča sta vsekakor posledica poplav, ki so povzročile dodaten nanos sveže mivke. To je tudi razlog, da je prodiranje Cs-137 v zemljinu, kot ga kaže 10-letno drseče povprečje na sliki 5.7c, navidezno hitrejše kot na drugih dveh lokacijah. Začetna globina težišča nanosa na lokaciji Kusova Vrbina, če upoštevamo podatke od leta 1992, je ustrezno večja. S slik je razvidno, da šele 10-letno drseče povprečje izpovpreči lokalno nehomogenost useda in vpliv hidrogeoloških procesov v zgornjih plasteh.

Usedanje iz zraka in poplavljanje reke Save sta glavni prenosni poti, po katerih lahko izpusti iz NEK dosežejo lokacije, kjer se zbirajo vzorci zemlje. Used Cs-137 do globine 30 cm, izmerjen v zadnjih letih na neobdelanih površinah, je predstavljen na sliki 5.8.

Prikazano je petletno drseče povprečje useda do globine 30 cm za lokacije Gmajnice, Amerika in Kusova Vrbina. Velikost useda se zmanjšuje. Ocena pokaže, da je zmanjševanje v glavnem posledica radioaktivnega razpadanja Cs-137, saj je le-to okrog 2,3 % letno. Zanimivo je, da je časovna odvisnost useda na lokaciji Kusova Vrbina, ki je najpogosteje poplavljena, zelo različna od odvisnosti na lokacijah Gmajnice in Amerika, kar pomeni, da ima poplavljanje tukaj prevladujoč vpliv na preporazdelitev useda. Globina težišča nanosa do globine 30 cm je po letu 2010 približno 15 cm (slika 5.7c), kar kaže na to, da je porazdelitev približno homogena. Iz tega sledi, da je naplavljen vsa plast zemlje, kjer poteka vzorčenje, in da izmerjena kontaminacija ne opisuje razmer v Kusovi Vrbini v času černobilske kontaminacije, ampak razmere na področju, od koder izvira naplavljeni material.



Slika 5.9: Primerjava med usedi Cs-137 na lokacijah, kjer je bila vzorčevana zemlja v okviru programa nadzora radioaktivnosti v okolici NEK in okviru meritev radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji.

V okviru nadzora radioaktivnosti v okolju v Republiki Sloveniji se meri used do globine 30 cm v Ljubljani, Kobaridu in Murski Soboti. V letu 2023 so bili na teh lokacijah izmerjeni povprečni usedi Cs-137 ($2,98 \pm 0,08$) kBq/m², ($7,19 \pm 0,13$) kBq/m² in ($1,39 \pm 0,02$) kBq/m². Te vrednosti so v povprečju višje ali primerljive z vrednostmi ($3,89 \pm 0,07$) kBq/m², ($0,44 \pm 0,01$) kBq/m² in ($2,44 \pm 0,09$) kBq/m², ki so bile izmerjene do globine 30 cm v Gmajnicah, Kusovi Vrbini in Ameriki. Primerjava med usedi na sliki 5.9 kaže, da izmerjeni used Cs-137 v okolici NEK ni posledica izpustov NEK. Vredno je omeniti, da je prispevek Cs-137 k letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu iz plasti 15–30 cm največ 5 % prispevka iz plasti 0–15 cm.



V izpuhu NEK se, razen žlahtnih plinov, radionuklidov joda, Cr-51, Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Se-75, Zr-95, Sr-90, in Cs-137 v letu 2023 niso pojavili drugi sevalci gama. Tekočinski izpusti NEK so vsebovali aktivacijske in fisijske produkte, sevalce gama, Mn-54, Co-58, Co-60, Fe-55, Ag-110m, I-131, Xe-133, Sr-90 in Cs-137. Noben od teh radionuklidov, ki so bili prisotni v tekočinskih izpustih, ni bil izmerjen v vzorcih zemlje. Izjema je Cs-137, pri katerem izmerjene vrednosti na lokacijah okrog NEK v primerjavi z vrednostmi na referenčni lokaciji v Ljubljani kažejo, da ni posledica izpustov iz NEK, ampak zgolj globalne kontaminacije.

Sevanje iz zemlje

Iz meritev specifičnih aktivnosti naravnih radionuklidov v zemlji lahko ocenimo prispevek zemeljskega sevanja. Za izračun letnega okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ uporabimo enačbo (5.1), ki jo dobimo iz enačbe (8) v [4]:

$$H^*(10)_{\text{letno}} = \sum_i w_i C_i \quad (5.1)$$

V enačbi smo s C_i označili specifične aktivnosti Ra-226, Th-232 (Ra-228, Th-228), K-40 in Cs-137 v zemlji, izražene z enoto Bq/kg. Koeficienti w_i so značilni za posamezne radionuklide ali radionuklide v razpadni shemi določenega radionuklida, ustrezne vrednosti za posamezni radionuklid pa so po vrsti: 4,94, 6,56, 0,449 in 1,68, izraženi v enotah $\mu\text{Sv}/(\text{Bq}/\text{kg})$. Te vrednosti so izračunane na podlagi koeficientov enačbe (9) v [4] ob predpostavki zadrževanja na prostem 8 760 ur. Enačba (9) v [4] je primerna za izračun letnega okoljskega doznega ekvivalenta, če je porazdelitev radionuklidov neodvisna od globine. To dobro velja za naravne radionuklide, ne velja pa za porazdelitev cezija, ki se spreminja z globino [4]. Zato je bil prispevek Cs-137 izračunan na podlagi realne porazdelitve, kot je opisano v poglavju *Ocena učinkov*. Iz rezultatov meritev specifičnih aktivnosti radionuklidov v zemlji, ki so zbrani v tabelah T-57, T-59 in T-60, lahko povzamemo povprečne aktivnosti U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228, K-40 in Cs-137 v globinah od 0 cm do 15 cm na lokacijah v Gmajnicah, Kusovi Vrbini in Ameriki. Rezultati spektrometrijskih analiz zemlje so v tabelah T-57, T-58, T-59 in T-60, ki so na priloženi zgoščenci v poročilu *Merski rezultati - nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023*, IJS-DP-14645, marec 2024.

Na lokacijah Gmajnice in Amerika se vzorči neobdelana zemlja, ki je podobna kot podlaga pri večini lokacij za TLD. Na lokaciji Kusova Vrbina pa se vzorči mešanica naplavin in zemlje, ki je podobna podlagi, na kateri stoji TLD v neposredni bližini. Iz povprečnih specifičnih aktivnosti Ra-226, Ra-228, Th-228, K-40 in Cs-137 v zemlji na lokacijah Gmajnice, Kusova Vrbina in Amerika po enačbi (5.1) izračunamo letni okoljski dozni ekvivalent za omenjene lokacije. Rezultati so zbrani v tabeli 5.2.

Povprečne svetovne specifične aktivnosti v zemlji, ki jih navaja UNSCEAR, so 420 Bq/kg za K-40, 33 Bq/kg za U-238 in 45 Bq/kg za Th-232 [42]. Te vrednosti se dobro ujemajo z izmerjenimi vrednostmi v zemlji v okolici NEK, ki so navedene v tabeli 5.2. Iz tabele sledi, da se doza zaradi sevanja iz tal in ionizirajoče komponente kozmičnih žarkov ujema z dozo, izmerjeno z dozimetrom TLD v Kusovi Vrbini, kjer poteka vzorčenje zemlje v neposredni bližini dozimetra. Na lokacijah Amerika in Gmajnice ujemanja ni, kar pojasnujemo s tem, da se lokacije vzorčenja zemlje ne ujemajo povsem z lokacijo, kjer je postavljen dozimeter TLD.

Z uporabo programa EXPACS ([75], [76], [77]) izračunamo, da je letni okoljski dozni ekvivalent kozmičnih žarkov v Krškem (nadmorska višina 155 m) 0,39 mSv, od tega odpade 0,08 mSv na dozo zaradi nevtronov, na katere dozimetri TLD niso občutljivi. V Velikem Trnu (nadmorska višina 434 m) pa je letni okoljski dozni ekvivalent 0,45 mSv, od česar odpade 0,11 mSv na nevtrone, kar pomeni, da je doza zaradi sevanja žarkov gama in direktne ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja na nadmorski višini dozimetrov v okolici jedrskega objekta v Krškem enaka 0,31 mSv. Ionizirajočo komponento kozmičnega sevanja prištejemo prispevku sevanja tal, da ocenimo letni dozni ekvivalent v tabeli 5.2.



Tabela 5.2: Primerjava izračunanega in izmerjenega letnega okoljskega doznega ekvivalenta v letu 2023 za tri lokacije vzorčenja zemlje v okolici NEK. Sevanje žarkov gama in direktnega ionizirajočega kozmičnega sevanja 0,31 mSv je izračunana s pomočjo programa EXPACS ([75], [76], [77]).

Radionuklid	Povprečna specifična aktivnost (0–15 cm) (Bq/kg)	Letni okoljski dozni ekvivalent, $H^*(10)$		Letni okoljski dozni ekvivalent, $H^*(10)$ (TLD) (mSv)
		Sevanje tal	Sevanje tal in direktno ionizirajoče kozmično sevanje	
Gmajnice				št. dozimetra 59
U-238	32,5 ± 2,3	0,65 ± 0,03	0,96 ± 0,02	0,71 ± 0,12
Ra-226	40,0 ± 3,2			
Ra-228	33,0 ± 0,7			
Th-228	31,9 ± 0,5			
K-40	385 ± 8			
Cs-137	34,3 ± 0,9			
Kusova Vrbina				št. dozimetra 21
U-238	23,5 ± 1,9	0,50 ± 0,02	0,81 ± 0,02	0,69 ± 0,11
Ra-226	35,0 ± 2,0			
Ra-228	26,1 ± 0,5			
Th-228	26,7 ± 0,5			
K-40	342 ± 8			
Cs-137	3,1 ± 0,1			
Amerika				št. dozimetra 63
U-238	33,7 ± 2,2	0,66 ± 0,02	0,97 ± 0,02	0,79 ± 0,13
Ra-226	43,7 ± 2,4			
Ra-228	33,9 ± 0,7			
Th-228	33,0 ± 0,6			
K-40	433 ± 12			
Cs-137	17,3 ± 0,9			

Iz tabele 5.2 lahko ocenimo, da je prispevek zemeljskega sevanja k letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu v okolici NEK v razponu od 0,50 mSv do 0,66 mSv. Izračunani prispevek kozmične komponente je približno eno tretjino celotne letne doze brez nevtronske komponente.

Hitrost doze v okolici NEK se meri s štirinajstimi kontinuirnimi merilniki hitrosti doze. Rezultati so v tabeli T-56/a na priloženi zgoščenci v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645*. Pri rezultatih meritev s temi merilniki je lastno ozadje merilnikov upoštevano in odšteto od izmerkov. V letu 2023 je bil izmerjen povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ ($0,80 \pm 0,09$) mSv v območju od 0,64 mSv do 0,97 mSv. Ta vrednost se ujema s povprečnim letnim okoljskim doznim ekvivalentom, ki je bil izmerjen s TLD v okolici NEK (tabela 5.1). Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent pri preostalih 64 kontinuirnih merilnikih v Sloveniji, ki so pod nadzorom URSJV, je bil v letu 2023 ($0,78 \pm 0,16$) mSv v območju od 0,46 mSv do 1,20 mSv. Ta vrednost je v okviru negotovosti enaka povprečni vrednosti, določeni na podlagi meritev s TLD na območju Slovenije (tabela 5.1). Iz primerjave letnih okoljskih doznih ekvivalentov v tabeli T-56, izmerjenih s kontinuirnimi merilniki, z letnimi okoljskimi doznimi ekvivalenti, izmerjenimi s TLD po Sloveniji (tabela T-54/b v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo*



za leto 2023, IJS-DP-14645), je mogoče ugotoviti, da se na posameznih lokacijah vrednosti, izmerjene s kontinuirnimi merilniki in TLD, lahko razlikujejo tudi za 30 %, kar je posledica različne podlage na mestih, kjer sta postavljena kontinuiran merilnik in TLD na določeni lokaciji. Na IJS, kjer sta oba merilnika postavljena v neposredni bližini, se vrednost ($0,74 \pm 0,02$) mSv, določena s kontinuirnimi merilnikom v okviru negotovosti ujema z vrednostjo ($0,77 \pm 0,09$) mSv, določeno s TLD.

OCENA UČINKOV

Iz dejanske globinske porazdelitve specifične aktivnosti Cs-137 je bil ocenjen letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$, ki je posledica globalne kontaminacije. Za izračun hitrosti doze so bili uporabljeni rezultati simulacije Monte Carlo, ki omogočajo določitev prispevkov Cs-137 iz različnih globin [71]. Okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ je bil izračunan iz zveze $H^*(10) = w \cdot D$ po standardu ISO 4037-3:2019 [44], pri čemer je D absorbirana doza v zraku na letni ravni, $w = 1,21$ pa je konverzijski faktor za pretvorbo absorbirane doze v okoljski dozni ekvivalent za Cs-137. Iz tabele 5.3 je razvidno, da so ocenjeni letni okoljski dozni ekvivalenti zaradi Cs-137 na lokacijah v okolici NEK v območju med 0,003 mSv in 0,023 mSv. To je primerljivo z vrednostmi na lokacijah, kjer se zemlja vzorčuje v okviru nadzora radioaktivnosti v Republiki Sloveniji. Tam so ocenjene letne doze $H^*(10)$ v območju od 0,014 mSv do 0,072 mSv.

Tabela 5.3: Ocenjena letna vrednost $H^*(10)$ zaradi globalne kontaminacije s Cs-137 do globine 30 cm v letu 2023

LOKACIJA	$H^*(10)$ (mSv)	LOKACIJA	$H^*(10)$ (mSv)
Gmajnice	$0,023 \pm 0,005$	Ljubljana	$0,026 \pm 0,005$
Kusova Vrbina	$0,003 \pm 0,001$	Kobarid	$0,072 \pm 0,014$
Amerika	$0,015 \pm 0,003$	Murska Sobota	$0,014 \pm 0,003$

Kot je bilo ugotovljeno, prispevkov NEK k dozi zunanjšega sevanja ni mogoče neposredno meriti z merilniki TLD in kontinuirnimi merilniki hitrosti doze. Mreža TLD meri skupno dozo sevanja gama naravnih radionuklidov v okolju, sevanje gama in direktne ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja ter prispevka globalne kontaminacije s Cs-137. Povprečni izmerjeni letni okoljski dozni ekvivalent v okolici NEK je bil v letu 2023 ($0,78 \pm 0,10$) mSv, kar se ujema z vrednostjo ($0,79 \pm 0,10$) mSv v letu 2022.

Ker okoljski TLD ne merijo doze nevtronske komponente kozmičnega sevanja, je bila le-ta izračunana z uporabo programa EXPACS ([75], [76], [77]). Program omogoča izračun doze, ki je posledica posameznih komponent kozmičnega sevanja vključno z nevtronsko komponento za poljubno geografsko dolžino in širino. Za leto 2023 je prispevek nevtronov k letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu 0,08 mSv. V preteklosti so bile opravljene tudi meritve hitrosti doze nevtronov zunaj ograje NEK, pri katerih se je pokazalo, da je bilo izmerjeno le naravno ozadje kozmičnih nevtronov [72]. Torej lahko za vse vrste sevanj sklenemo, da je prispevek iz objektov znotraj ograje NEK k zunanji dozi zunaj ograje zanemarljiv.

Letne efektivne doze zunanjšega sevanja ob prehodu oblaka (imerzijske doze) pri atmosferskih izpustih iz NEK so ocenjene v poglavju *Zrak* na podlagi podatkov o izpuščenih aktivnostih in ob upoštevanju razredčitvenih koeficientov, dobljenih iz Lagrangeevega modela.

Okoljskega doznega ekvivalenta zaradi usedanja iz oblaka ne moremo izmeriti, lahko pa ga računsko ocenimo na podlagi emisij iz NEK, razredčitvenih koeficientov in doznih pretvorbenih koeficientov. Used se računa za lokacije, na katerih poteka vzorčenje zraka. Podatki, ki so potrebni za izračun, so izpusti iz NEK in depozicijski faktorji na posameznih lokacijah. Depozicijski faktorji se računajo po Lagrangeevem modelu, ki upošteva realne meteorološke podatke o gibanju zračnih mas in o padavinah. Rezultati izračuna za leto 2023 vključno z modelirano domeno so predstavljeni v poglavju o radioaktivnosti v zraku. Iz



podatkov o gibanju zračnih mas se določijo razredčitveni koeficienti χ/Q , ki opisujejo koncentracijo radionuklidov v posameznih celicah modelne domene. Velikost modelne domene v NEK je $25 \text{ km} \times 25 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ in je razdeljena na 100×100 celic v horizontalni smeri in 20 celic po vertikali. Celica je velika $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$, navpična dimenzija celice pa je spremenljiva in je odvisna od višine, v kateri je celica. Tabelirane vrednosti depozicijskih faktorjev in razredčitvenih koeficientov so v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645*, marec 2024.

Depozicijski faktor (imenovan tudi *koeficient relativne depozicije*) D/Q za določeno lokacijo z enoto s/m^2 se izračuna po enačbi:

$$D/Q = k_T \cdot (\chi/Q)_1 \cdot h_1 + k_{\text{WDD}} \cdot \sum_{i=1}^N (\chi/Q)_i \cdot h_i \quad (5.2)$$

Pri tem je k_T faktor dotika, ki pove, kolikšen del radionuklidov se odloži pri stiku zračnih mas s tlemi, $(\chi/Q)_1$ razredčitveni koeficient prvega prizemnega nivoja, h_1 višina prvega prizemnega nivoja, k_{WDD} faktor mokrega in suhega nanosa, $(\chi/Q)_i$ razredčitveni koeficienti nivoja i , h_i višina nivoja i in N število nivojev v domeni.

Tabela 5.4: Ocena letne efektivne doze zunanjega sevanja zaradi useda radioaktivnih snovi za izbrane lokacije z značilnimi razdaljami od NEK za leto 2023

Lokacija			Ograja NEK	Vrbina	Spodnji Stari Grad	Žadovinek	Vihre	Brežice
Oddaljenost od ventilacijskega izpusta NEK (km)			0,2	0,8	1,5	1,7	3,1	7,1
Radionuklid	Izpust (Bq na leto)	DCF (Sv na leto) / (Bq/m ²)	Letna efektivna doza zunanjega sevanja zaradi useda radioaktivnih snovi (mSv)					
I-131	7,33E+06	9,40E-11	6,91E-12	4,38E-13	4,76E-13	4,11E-13	6,37E-14	6,01E-14
I-133	2,71E+06	–	4,06E-12	2,57E-13	2,79E-13	2,41E-13	3,74E-14	3,53E-14
H-3	4,95E+12	–	–	–	–	–	–	–
C-14	1,30E+11	1,27E-13	5,25E-12	3,32E-13	3,61E-13	3,12E-13	4,84E-14	4,56E-14
Cr-51	–	2,66E-11	–	–	–	–	–	–
Mn-54	2,01E+06	4,39E-09	4,09E-12	2,59E-13	2,82E-13	2,43E-13	3,77E-14	3,56E-14
Co-57	1,47E+03	–	4,24E-16	2,69E-17	2,92E-17	2,52E-17	3,91E-18	3,69E-18
Co-58	9,16E+06	2,04E-09	2,18E-11	1,38E-12	1,50E-12	1,30E-12	2,01E-13	1,90E-13
Co-60	1,08E+04	1,74E-08	–	–	–	–	–	–
Zr-95	–	1,41E-09	6,34E-14	3,65E-15	4,46E-15	4,70E-15	5,94E-16	5,17E-16
Nb-95	–	8,15E-10	–	–	–	–	–	–
Sb-124	–	3,16E-09	–	–	–	–	–	–
Te-125m	–	6,38E-11	–	–	–	–	–	–
Te-127m	6,83E+03	3,46E-11	1,93E-16	1,23E-17	1,33E-17	1,15E-17	1,78E-18	1,68E-18
Cs-134	1,91E+06	–	7,28E-12	4,61E-13	5,01E-13	4,33E-13	6,71E-14	6,33E-14
Cs-137	1,12E+06	4,45E-09	8,03E-16	5,09E-17	5,53E-17	4,77E-17	7,40E-18	6,98E-18
Se-75	4,26E+05	1,24E-09	4,02E-13	2,55E-14	2,77E-14	2,39E-14	3,71E-15	3,50E-15
Sr-90	7,84E+02	2,21E-12	5,58E-19	3,54E-20	3,84E-20	3,32E-20	5,15E-21	4,86E-21
VSOTA			4,99E-11	3,16E-12	3,43E-12	2,96E-12	4,60E-13	4,34E-13



Prispevki k letni efektivni dozi zaradi useda iz oblaka so zbrani v tabeli 5.4. Letna efektivna doza za posamezni radionuklid na določeni lokaciji je produkt letnega izpusta, depozicijskega faktorja iz enačbe (5.2), ki so ga izračunali v podjetju MEIS storitve za okolje, d. o. o., in doznega pretvorbene koeficienta *DCF* [78]. Ta upošteva izpostavljenost zaradi useda in resuspenzije s tal po štirih dneh, pri končni oceni efektivne doze pa smo konzervativno privzeli, da se je izpust celoletne aktivnosti ponavljal vsake 4 dni vse leto (skupni ocenjeni letni izpust je vsota približno 91 dejanskih izpustov v tem letu). Iz rezultatov je razvidno, da je bila v letu 2023 letna efektivna doza največja na oddaljenosti 0,2 km od ventilacijskega izpusta NEK (zahodna ograja, okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja), vendar je tudi ta prispevek popolnoma zanemarljiv glede na druge prispevke zunanega sevanja. Tega prispevka NEK ni mogoče izmeriti niti s TLD niti z merilniki, ki neprekinjeno merijo ionizirajoče sevanje v okolici NEK, saj je daleč pod mejo detekcije. Že same variacije letnih efektivnih doz na posameznih lokacijah zaradi različnosti naravnega sevanja daleč presegajo prispevek NEK.

Učinek usedanja in izpiranja iz ozračja umetne radioaktivnosti zaradi izpustov NEK je predstavljen v tabeli 5.4. Ocena vrednosti letnega okoljskega doznega ekvivalenta iz izpustov NEK je na lokacijah v okolici NEK večja od ocen vrednosti za leto 2022, ker so bili izpusti v atmosfero večji. Vredno je omeniti, da približno dve tretjini doze prispeva C-14, eno tretjino pa Cs-137. Ostali izotopi prispevajo približno 2 %. Ker C-14 seva le žarke beta s kratkim dosegom, je doza izračunana pri konzervativni predpostavki, da je površina telesa v neposrednem kontaktu s kontaminirano površino.

V tabeli 5.5 so povzete ocenjene letne vrednosti $H^*(10)$ za prebivalstvo¹⁵ v okolici NEK. Prevladuje izpostavitve zaradi naravnega sevanja in useda Cs-137 zaradi globalne kontaminacije. Prispevek NEK je zanemarljiv.

Tabela 5.5: Doze $H^*(10)$ zaradi zunanega sevanja v letu 2023 za prebivalstvo v okolici NEK

Vir	Podatki	$H^*(10)$ (mSv)
sevanje gama + ionizirajoča komponenta kozmičnega sevanja	TLD	0,78 (91 %)
kozmični nevtroni	[42], [75], [76], [77]	0,08 (9 %)
naravno sevanje – skupaj		0,86 (100 %)
kontaminacija zaradi černobilske nesreče in poskusnih jedrskih eksplozij	Cs-137 v zemlji	0,014 (1,6 %)*
NEK – atmosferski izpusti	used (model)	5,0E–11
SKUPAJ		0,87

* Ocena deleža glede na naravno sevanje. V tej oceni ni upoštevano, da se prebivalec (referenčna oseba) zadržuje 20 % časa na prostem in da je faktor ščitenja pri zadrževanju v zgradbah 0,1, temveč je konzervativno privzeto, da se prebivalec ves čas zadržuje na prostem. Za izračun hitrosti doze so bili uporabljeni rezultati računa Monte Carlo, ki omogoča določitev prispevkov Cs-137 iz različnih globin [71].

¹⁵ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejelo najvišje doze.



SKLEPI

Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v vzorcih zemlje v letu 2023 so primerljive z vrednostmi, izmerjenimi v prejšnjih letih, in s podatki, ki jih kot svetovno povprečje navaja UNSCEAR. Letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ zaradi naravnih radionuklidov v zemlji je med 0,50 mSv in 0,66 mSv.

Prisotnost umetnih radionuklidov v okolju je posledica globalne kontaminacije zaradi jedrskih poskusov in černobilske nesreče. Učinka NEK tudi v letu 2023 ni bilo mogoče zaznati. Prispevek Cs-137 k letni dozi $H^*(10)$ je od 0,4 % do 2,4 % skupne doze zaradi naravnih in umetnih radionuklidov v zemlji. Letni okoljski dozni ekvivalent zaradi globalne kontaminacije s Cs-137 na lokacijah v okolici NEK, ocenjeni ob predpostavki realne globinske porazdelitve Cs-137, je v območju med 0,003 mSv in 0,023 mSv, kar je v povprečju manj kot na lokacijah vzorčenja v okviru nadzora radioaktivnosti v Republiki Sloveniji. To je dodatna potrditev ugotovitve, da v okolju ni mogoče opaziti učinkov zaradi izpustov iz NEK.

Okoljski dozni ekvivalent, izmerjen s TLD na ograji NEK, je za 30 % nižji kot v okolici NEK. To kaže, da je prispevek NEK k dozni obremenitvi v okolici zaradi sevanja iz objektov NEK zanemarljiv in nemerljiv.

Povprečna vrednost letnega okoljskega doznega ekvivalenta, izmerjenega s TLD v okolici NEK, se ujema s povprečno vrednostjo, izmerjeno s kontinuirnimi merilniki hitrosti doze. Povprečji, izmerjeni z merilniki TLD ($0,78 \pm 0,10$) mSv in kontinuirnimi merilniki hitrosti doze ($0,80 \pm 0,09$) mSv sta v okviru razsutja merskih vrednosti enaki. To potrjuje zanesljivost meritev, saj se rezultati, dobljeni z različnimi merskimi metodami, ujemajo.

Vrednost $H^*(10)$ zaradi zunanjega sevanja naravnih sevalcev gama, ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja in kozmičnih nevtronov v letu 2023 je bila za prebivalstvo v okolici NEK 0,86 mSv na leto in je primerljiva z oceno za svetovno prebivalstvo ter z ocenami za okolico NEK v prejšnjih letih. Ocenjena vrednost $H^*(10)$ se v okviru negotovosti ujema z izmerki TLD, kar potrjuje zanesljivost modelne ocene.

Prispevek k zunanjemu sevanju zaradi atmosferskih izpustov radioaktivnih snovi, izračunan na podlagi Lagrangeevega modela nanosa iz oblaka, je mnogo redov velikosti nižji od drugih prispevkov in popolnoma zanemarljiv. Konservativno ocenjujemo, da je letna efektivna doza zaradi zunanjega sevanja izpustov iz NEK manjša od $1,0 \cdot 10^{-4}$ nSv na robu izključitvenega območja in na večjih razdaljah, torej daleč pod detekcijsko mejo merilnikov. Meja detekcije z merilniki TLD je 7,5 μ Sv, torej bi merilniki brez težav ugotovili potencialno nevarne nivoje zunanjega sevanja zaradi izpustov NEK v ozračje. Omenjeno detekcijsko mejo bi seveda dosegli le ob večji pogostosti meritev, kot je dvakrat na leto.



6 RADIONUKLIDI V HRANI

POVZETEK

Z ugotavljanjem specifičnih aktivnosti radionuklidov v živilih, vzorčenih v okolici NEK, preverjamo učinek izpustov NEK na hrano in ocenjujemo sevalno obremenitev prebivalstva zaradi uživanja hrane, pridelane na krško-brežiškem polju. Specifične aktivnosti radionuklidov v živilih, vzorčenih v okolici NEK, smo primerjali s specifičnimi aktivnostmi radionuklidov v živilih, vzorčenih drugod po Sloveniji.

V hrani je vsebnost umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90, ki izvirata iz globalne kontaminacije okolja, povečala sevalno obremenitev odrasle referenčne osebe iz okolice NEK še za 0,4 μ Sv, kar je le 0,5 % celotne izračunane letne efektivne doze zaradi zaužitja hrane brez upoštevanja K-40. To je z biološkega vidika zanemarljivo. Sevalna obremenitev prebivalcev drugod po Sloveniji zaradi zaužitja hrane, kontaminirane s Cs-137 in Sr-90, je 0,4 μ Sv, kar je 1,5% celotne izračunane letne efektivne doze. V primerjavi merskih rezultatov za hrano iz okolice NEK in iz Republike Slovenije se upoštevajo le živila, ki so v skupnem naboru. V letu 2023 k dozi splošnih kontaminantov Cs-137 in Sr-90 v okolici NEK največ prispeva specifična aktivnost Sr-90 v listni zelenjavi, pri oceni efektivne doze drugod po Sloveniji pa specifična aktivnost Cs-137 v mesu in jajcih. Specifična aktivnost Cs-137 v divjačini v 2023 ni odstopala od vrednosti v drugih živilih.

V zračnih izpustih NEK za tritijem prevladuje radionuklid C-14. Ta se, enako kot ogljik C-12, v procesu fotosinteze vgrajuje v rastline in s hrano prehaja v živali in ljudi. Ocenjena efektivna doza referenčne osebe, prejeta zaradi zaužitja hrane, ki vsebuje C-14, je v okolici NEK – na robu izključitvenega območja in navzven od njega – (14,6 \pm 0,1) μ Sv, v krajih, kjer vpliva NEK v letu 2023 ni bilo mogoče zaznati (Dobova), pa (14,5 \pm 0,1) μ Sv. Med obema vrednostnima ni statistično značilne razlike (ob veliki negotovosti ocenjene vrednosti), doza 0,02 μ Sv pa je primerljiva z ocenami iz prejšnjih let in je z biološkega vidika zanemarljiva.

UVOD

Izpusti radionuklidov v okolje, bodisi zaradi normalnega obratovanja jedrskih objektov ali izrednih dogodkov, potencialno izpostavljajo okoliško prebivalstvo ionizirajočemu sevanju. Radionuklidi najpogosteje prehajajo v okolje prek izpustov v atmosfero ali v vodne sisteme, pri čemer prihaja do kontaminacije zraka, vode, tal, rastlinstva in živalstva. Poti vnosa radionuklidov v človeški organizem sta predvsem inhalacija in zaužitje, zato je v okolici nuklearnih objektov potreben stalen nadzor radioaktivnosti v zraku, vodi, tleh, pa tudi v hrani rastlinskega in živalskega izvora, ki se prideluje v okolici jedrskih objektov.

V hrano rastlinskega izvora prehajajo radionuklidi predvsem preko koreninskega sistema rastlin, delno pa tudi s površine listov, kamor se odložijo kot usedi iz atmosfere. Sem spada predvsem kontaminacija s Pb-210, ki je naravni radionuklid in ga v izpustih NEK ne zaznamo. Stopnja privzema radionuklidov v rastline prek koreninskega sistema je v največji meri odvisna od biorazpoložljivosti posameznih radionuklidov v tleh, na kar poleg topnosti radionuklidov vplivajo predvsem abiotski in biotski talni dejavniki [79]. Na absorpcijo radionuklidov v rastline prek listne površine vplivajo morfološke značilnosti rastlin (velikost površine, strukture na listih) in okoljski dejavniki, kot sta količina padavin in vetrovnost. Rastlinski organi se z radionuklidi površinsko kontaminirajo tudi zaradi neposrednega stika z zemljo, kar velja predvsem za gomolje, korenike, čebule ter liste in plodove, ki uspevajo pri tleh [80]. Na vsebnost radionuklidov v rastlinah vplivajo tudi človeške aktivnosti, kot so obdelovanje površin, gnojenje, uporaba pesticidov, promet in industrijsko onesnaževanje.



Specifična aktivnost radionuklidov v hranilih živalskega izvora je povezana predvsem s tem, da živali uživajo z radionuklidi kontaminirano hrano in vodo. Na stopnjo kontaminacije živalskega organizma, zlasti organizma rastlinojedov, v veliki meri vpliva preferenca prehranjevanja z določenimi vrstami rastlinske hrane [80], radionuklide pa najdemo tudi v krmilih za prehrano domačih živali. Končno koncentracijo radionuklidov v živalskem organizmu določa razmerje med asimilacijo in izločanjem. Kopičenje v posameznih organih oziroma tkivih je v veliki meri odvisno od fizikalnih in kemijskih značilnosti posameznega radionuklida, vrste hrane in vsebnosti elementov, ki s posameznim radionuklidom tekmujejo za privzem, ter od fiziološkega stanja živali. Na vnos radionuklidov v človeški organizem vplivajo podobni faktorji kot na vnos v živalski organizem, le da ljudje s predhodno pripravo in čiščenjem hrane (pranje, lupljenje) lahko dodatno zmanjšajo vnos radionuklidov v organizem [80].

V okviru nadzora radioaktivnosti v okolici NEK smo analizirali vzorce hrane ter s tem preverjali učinek izpustov NEK na vsebnost radionuklidov v hrani. Na podlagi rezultatov meritev in z upoštevanjem prehranskih navad referenčne osebe smo lahko ocenili učinkovito dozo referenčne osebe zaradi zaužitja hrane na krško-brežiškem polju.

OKOLJSKI VZORCI

Značilnosti vzorčenja

Vzorčenje živil v okolici Nuklearne elektrarne Krško poteka na mestih, ki imajo podobno sestavo tal kot tista pri vzorčenju zemlje. Za zemljo je značilna pedološka raznolikost (obrečni peščeni aluvij, diluvialna ilovica s kremenovimi produkti, apnenec). Zaradi odvisnosti prenosnih faktorjev od vrste tal se vzorci hrane odvzemajo vedno na istem mestu, če je le mogoče. V Vrbinu, Bregah in Spodnjem Starem Gradu se hrana na primer prideluje le za potrebe radiološkega nadzora. Odvzemna mesta vzorcev hrane v letu 2023, ki so označena na priloženem zemljevidu na koncu poročila, so bila: sadovnjak ob NEK (sadje), Pesje (mleko, zelenjava, sadje), Brege (mleko, zelenjava), Vihre (zelenjava), Vrbina (žito, zelenjava, sadje), Spodnji Stari Grad (jajca), Žadovinek (zelenjava), Trnje (zelenjava), Leskovec (meso, sadje), Dolenje Skopice (mleko, zelenjava), Gornji Lenart (jajca), Loče (meso), Veliki Podlog (meso), Karlče (meso), Dolenja vas (zelenjava). V letu 2023 je bilo v okolici NEK skupno vzorčenih 30 vrst živil.

Značilnosti meritev okoljskih vzorcev

V vzorcih živil so bile izmerjene specifične aktivnosti sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama (VLG) in vsebnost Sr-90/Sr-89 z radiokemijsko metodo. Vzorčenje, meritve in analize vseh vzorcev živil so bile opravljene na IJS in ZVD. Rastlinski vzorci živil, razen žit, so bili pred analizo oprani s tekočo vodo, saj je poleg vnosa radionuklidov v rastline iz tal prek koreninskega sistema del kontaminacije zelenjave in sadja z radionuklidi tudi površinska kontaminacija, sploh če so deli rastlin med gojenjem v neposrednem stiku z zemljo.

Od radionuklidov, ki jih zaznamo v izpustih NEK, je v hrani C-14, ki se pojavlja v okolju tudi naravno. Meritve vsebnosti C-14 v rastlinskih vzorcih, vzorčenih v juliju in septembru 2023 v bližnji okolici NEK (zunanji krog) in na kontrolni točki v Dobovi, so bile opravljene na IRB v Zagrebu. Specifična aktivnost C-14 je bila izmerjena v koruzi, pšenici, ajdi, travi, jabolkih in hruškah.

REZULTATI MERITEV IN ZNAČILNI ČASOVNI POTEKI

Tabele z merskimi rezultati so na priloženi zgoščenki v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2023, IJS-DP-14645*, marec 2024.

Rezultati meritev vzorcev hrane so prikazani v tabelah T-61 (mleko - Pesje), T-62 (mleko – Dolenje Skopice), T-63 (mleko - Brege), T-64 (I-131 v vzorcih mleka), T-65 do T-67 (sadje – jabolka, hruške, jagode), T-68 (rdeče in belo grozdje, bezeg), T-69 do T-73 (podzemna zelenjava: krompir, rdeča pesa, por; listna zelenjava – zelje, radič, peteršilj, blitva; plodovke – fižol v zrnju, stročji fižol, paprika, paradižnik,



feferoni, jajčevci, kumare, bučke; žita – pšenica, koruza, ječmen), T-74 in T-75 (kokošja jajca; kokošje, svinjsko, goveje in divjačinsko meso).

V vzorcih hrane so bili detektirani naravni radionuklidi iz razpadnih verig radionuklidov U-238 in Th-232 ter K-40 in kozmogeni Be-7, med umetnimi pa Cs-137 in Sr-90/Sr-89. Ker Sr-89 ni bil izmerjen v zračnih izpustih NEK, se vsi merski rezultati nanašajo na Sr-90.

V nadaljevanju so rezultati vsebnosti radionuklidov v živilih v okolici NEK podani primerjalno glede na vsebnosti radionuklidov v skupinah živil (meso in jajca, mleko, podzemna zelenjava, listna zelenjava, plodovke, žita in sadje), vzorčenih drugod po Sloveniji. Slednje meritve je izvedel ZVD. Vzorčena so bila naslednja živila: mleko; sadje – jabolka, hruške, jagode, breskev, kivi, belo grozdje; podzemna zelenjava – krompir, redkev; listna zelenjava – solata; plodovke – paradižnik, bučke; žita – pšenični zdrob in moka; jajca in meso (kokošja jajca, kokošje, svinjsko in goveje meso ter divjačina), skupno 19 vrst živil.

Tritij (H-3)

Tritij se v okviru rednega merilnega nadzora NEK v hrani ne ugotavlja. Vendar raziskave, ki so bile izvedene na IJS v zadnjih letih [82], kažejo povečane vsebnosti tritija v rastlinju neposredno ob NEK v primerjavi z rastlinjem na kontrolni točki. V letu 2023 je bil v rastlinju analiziran tudi organsko vezan tritij (OBT). Meritve so opravili na IRB [23]. Koncentracije aktivnosti v vseh merjenih vzorcih rastlinja (koruza, jabolka) so v okolici NEK od $(2,6 \pm 1,0)$ Bq/L do $(17,8 \pm 1,6)$ Bq/L in na kontrolni lokaciji v Dobovi od $(3,0 \pm 1,1)$ Bq/L do $(6,0 \pm 1,2)$ Bq/L. Izmerjene vrednosti so pod 100 Bq/L, kolikor je priporočena raven evropske komisije za H-3 v pitni vodi. Dozna obremenitev prebivalstva zaradi vsebnosti OBT v hrani je z biološkega stališča zanemarljiva (manj kot $3 \text{ E-}2 \mu\text{Sv}$).

Jod (I-131)

V vzorcih hrane I-131 ni bil prisoten.

Ogljik (C-14)

Naravni radionuklid ogljik C-14 nastaja v Zemljini atmosferi kot produkt jedrskih reakcij med jedri dušika N-14 in nevtroni iz kozmičnega sevanja [81]. Skupaj z drugimi ogljikovimi izotopi kot CO₂ vstopa v ogljikov cikel Zemlje, kjer se v procesu fotosinteze asimilira v hrano rastlinskega izvora. Izmerjena aktivnost C-14 v enoletnih rastlinah ali drevesnih letnicah tako pove povprečno vsebnost C-14 v atmosferskem CO₂ med rastno sezono. C-14 vstopa v prehranjevalno verigo, s tem pa se lahko poveča dozna obremenitev lokalnega prebivalstva zaradi zaužitja.

Jedrski objekti, še posebej jedrske elektrarne, lahko vplivajo na povišanje radioaktivnosti tako v atmosferi v svoji neposredni okolici kot tudi v rastlinju, ki tam uspeva. C-14 je merljiv tudi v izpustih NEK. Učinek jedrske elektrarne na povišanje aktivnosti C-14 v rastlinstvu oziroma hrani se ugotavlja tako, da se aktivnosti C-14 v rastlinju iz neposredne okolice NEK primerjajo s tistimi s kontrolnega področja (Dobova), kjer neposrednih učinkov ni več mogoče pričakovati.

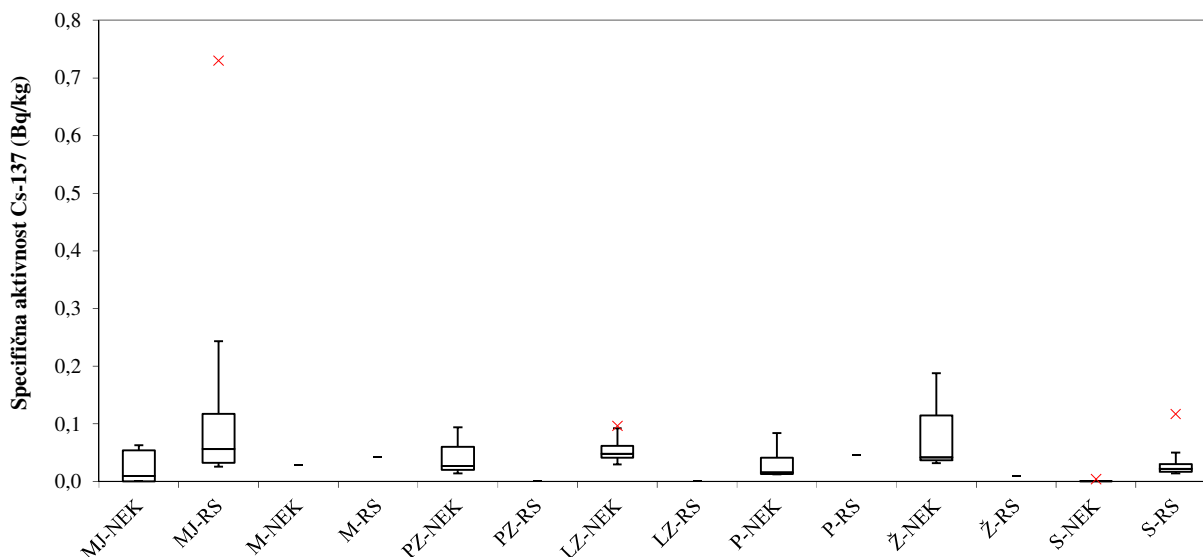
Izračunana letna efektivna doza referenčne osebe zaradi zaužitja C-14 izhaja iz predpostavke, da letno zaužijemo okrog 330 kg hrane, ki vsebuje 30 % ogljika (~100 kg ogljika letno). Atomi C-14 so namreč strukturni del organskih molekul v organizmih, medtem ko drugi radionuklidi, kot so Cs-137, K-40, Sr-90 itd., ne spadajo med strukturne elemente, zato sta postopka računanja letne efektivne doze različna.

Specifična aktivnost C-14 je bila v bližnji okolici NEK v letu 2023 izmerjena v koruzi in pšenici in sicer v juniju in septembru. Vrednosti so zbrane v tabeli 6.1. Med povprečnimi vsebnostmi C-14 v hrani in rastlinju, merjenih v juliju in septembru na istih lokacijah, ni statistično značilnih razlik. Najvišja izmerjena specifična aktivnost C-14, (252 ± 8) Bq na kilogram ogljika, je bila izmerjena v travi (lokacija Q) v juliju. Lokacije so označene na sliki 1 v poročilu [21].



Tabela 6.1: Specifične aktivnosti C-14 v rastlinju v okolici NEK v letu 2023 (povprečje ± standardna deviacija)

Območje v okolici NEK	Junij 2023	September 2023
	Bq na kilogram ogljika	
Ograja NEK (notranji krog)	(230 ± 9)	(235 ± 9)
Rob izključitvenega območja – 500 m od osi reaktorja (zunanji krog)	(227 ± 9)	(232 ± 8)
Dobova	(226 ± 12)	(231 ± 12)



Slika 6.1: Specifična aktivnost Cs-137 (Bq/kg) v skupinah živil: MJ – meso in jajca, M-mleko, PZ-podzemna zelenjava, LZ – listna zelenjava, P – plodovke, Ž – žita, S – sadje; predstavljene so minimalna in maksimalna vrednost (brki) ter mediana, prvi in tretji kvartil (pravokotnik) po skupinah posamično vzorčenih živil v letu 2023 v okolici NEK in drugod po Sloveniji (RS). Izjema je surovo mleko, ki se v okviru obratovalnega nadzora radioaktivnosti v okolici NEK zbira in analizira mesečno na treh lokacijah (Vihre, Pesje in Brege), v okviru nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v RS pa dvomesečno na treh lokacijah (Ljubljana, Kobarid in Bohinjska Bistrica). V grafu sta tako za mleko (NEK in RS) prikazani aritmetični sredini čez vse vzorce v okviru nadzora radioaktivnosti za leto 2023. V predstavitvi po živilih so bila upoštevana živila, ki spadajo v izbrano skupino; nabor živil v okviru *Monitoringa radioaktivnosti v življenjskem okolju v RS* obsega še druge vrste živil, kot so med, ribe, moka itd., ki se v okviru obratovalnega nadzora radioaktivnosti v okolici NEK ne vzorčijo. Če je bilo odvzetih več vzorcev iste vrste, je v tabeli poročana aritmetična sredina. Z znakom – so označene posamične meritve, z znakom **x** pa ubežniki (angl. *outliers*).



Cezij (Cs-137)

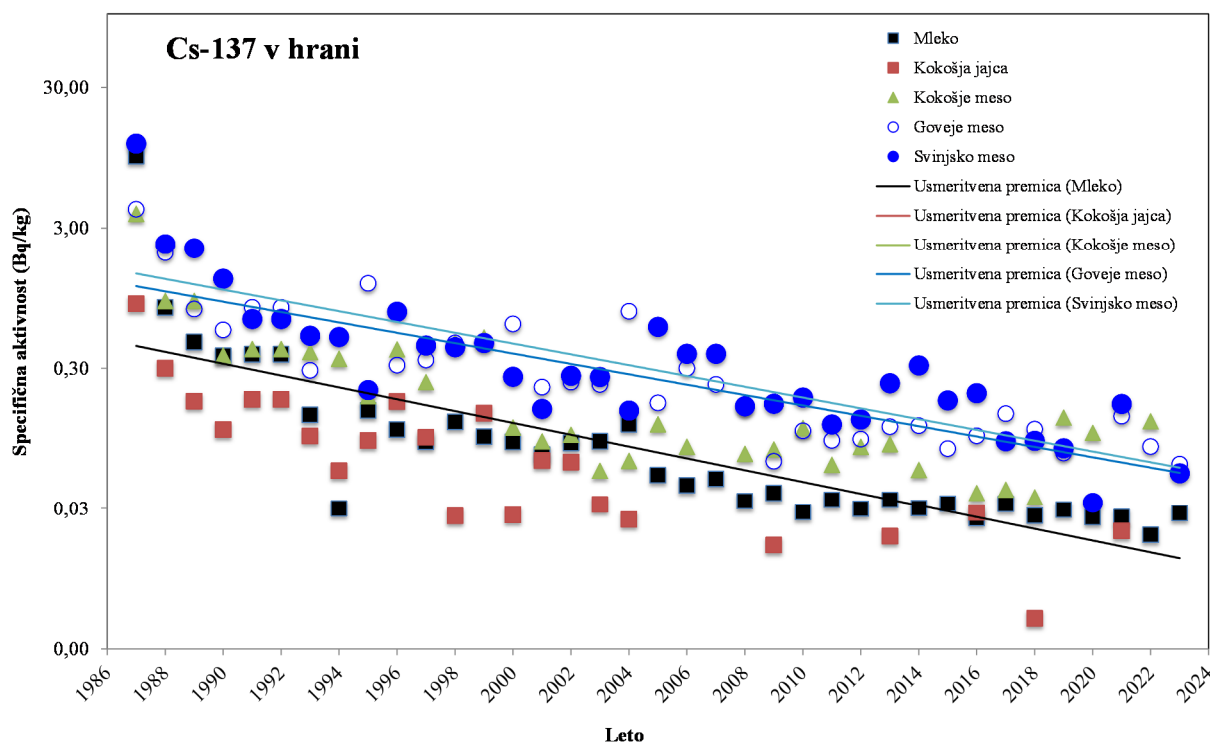
Radionuklid Cs-137 je bil v letu 2023 tako v okolici NEK kot drugod po Sloveniji detektiran v vseh skupinah vzorčenih živil. Meritve drugod po Sloveniji je izvedel ZVD.

Specifična aktivnost Cs-137 v živilih v okolici NEK je od 0 Bq/kg do 0,19 Bq/kg in je primerljiva s specifično aktivnostjo Cs-137 v živilih, vzorčenih drugod po Sloveniji, to je od 0 Bq/kg do 0,73 Bq/kg ([12], [15]). Podatki so prikazani na sliki 6.1. V divjačini (zajec in divjačina; Leskovec, Škofja Loka) je bila specifična aktivnost Cs-137 $(0,01 \pm 0,02)$ Bq/kg in $(0,12 \pm 0,01)$ Bq/kg, kar je primerljivo z ostalimi živilmi.

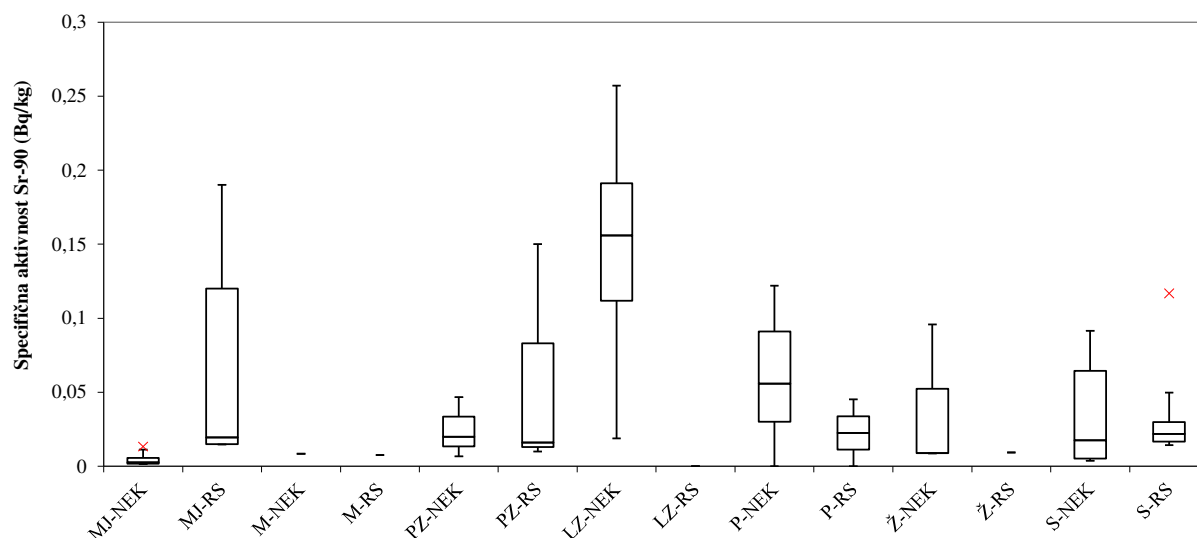
V posameznih živilih v okolici NEK je bila najvišja specifična aktivnost Cs-137 izmerjena v ječmenu $(0,19 \pm 0,08)$ Bq/kg, medtem ko je bila specifična aktivnost Cs-137 v jabolkih in hruškah, vzorčenih v sadovnjaku v neposredni bližini NEK, $< 0,001$ Bq/kg. Največja izmerjena specifična aktivnost Cs-137 v hrani, vzorčeni drugod po Sloveniji, je bila izmerjena v govejem mesu $(0,73 \pm 0,03)$ Bq/kg.

S slike 6.1 je razvidno, da največjo vsebnost Cs-137 v letu 2023 v okolici NEK in drugod po Sloveniji najdemo v žitih (okolica NEK) in mesu (drugod po Sloveniji), najmanj pa v sadju (okolica NEK), podzemni in listni zelenjavi (drugod po Sloveniji).

Kljub omenjenim težnjam pa v živilih, vzorčenih v gozdnih ekosistemih po Sloveniji, še vedno lahko ugotavljamo značilno višje specifične aktivnosti Cs-137 v primerjavi z živilmi, vzorčenimi v agrarnih ekosistemih.



Slika 6.2: Izmerjene specifične aktivnosti Cs-137 v mleku, kokošjih jajcih ter kokošjem, govejem in svinjskem mesu, vzorčenih v okolici NEK, od leta 1987 do 2023. Vrednosti so prikazane v logaritemski skali. V kokošjih jajcih je bila specifična aktivnost v letih 2005–2008 in 2010–2012 pod mejo detekcije, prav tako pa tudi v kokošjem mesu leta 2007. Leta 1994 goveje meso ni bilo vzorčeno.



Slika 6.3: Specifična aktivnost Sr-90 (Bq/kg) v skupinah živil: MJ – meso in jajca, M – mleko, PZ – podzemna zelenjava, LZ – listna zelenjava, P – plodovke, Ž – žita, S – sadje; predstavljene so minimalna in maksimalna vrednost (brki) ter mediana, prvi in tretji kvartil (pravokotnik) po skupinah posamično vzorčenih živil v letu 2023 v okolici NEK in drugod po Sloveniji (RS). Izjema je surovo mleko, ki se v okviru obratovalnega nadzora radioaktivnosti v okolici NEK zbira in analizira mesečno na treh lokacijah (Vihre, Pesje in Brege), v okviru nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v RS pa dvomesečno na treh lokacijah (Ljubljana, Kobarid in Bohinjska Bistrica). V grafu so tako prikazane aritmetične sredine čez vse vzorce v okviru nadzora radioaktivnosti za celo leto 2023. V predstavitvi po živilih so bila upoštevana živila, ki spadajo v izbrano skupino; nabor živil v okviru *Monitoringa radioaktivnosti v življenjskem okolju v RS* obsega še druge vrste živil, kot so med, ribe, mlečni izdelki itd., ki se v okviru obratovalnega nadzora radioaktivnosti v okolici NEK ne vzorčujejo. Če je bilo odvzetih več vzorcev iste vrste, je v tabeli vpisana aritmetična sredina. Z znakom – so označene posamične meritve, z znakom × pa ubežniki (angl. *outliers*).

Stroncij (Sr-90)

Radionuklid Sr-90 je bil v okolici NEK v letu 2023 detektiran v vseh skupinah živil (slika 6.3). Specifična aktivnost Sr-90 v živilih v okolici NEK je od 0 Bq/kg do 0,26 Bq/kg, specifična aktivnost Sr-90 v živilih, vzorčenih drugod po Sloveniji, pa od 0 Bq/kg do 0,19 Bq/kg.

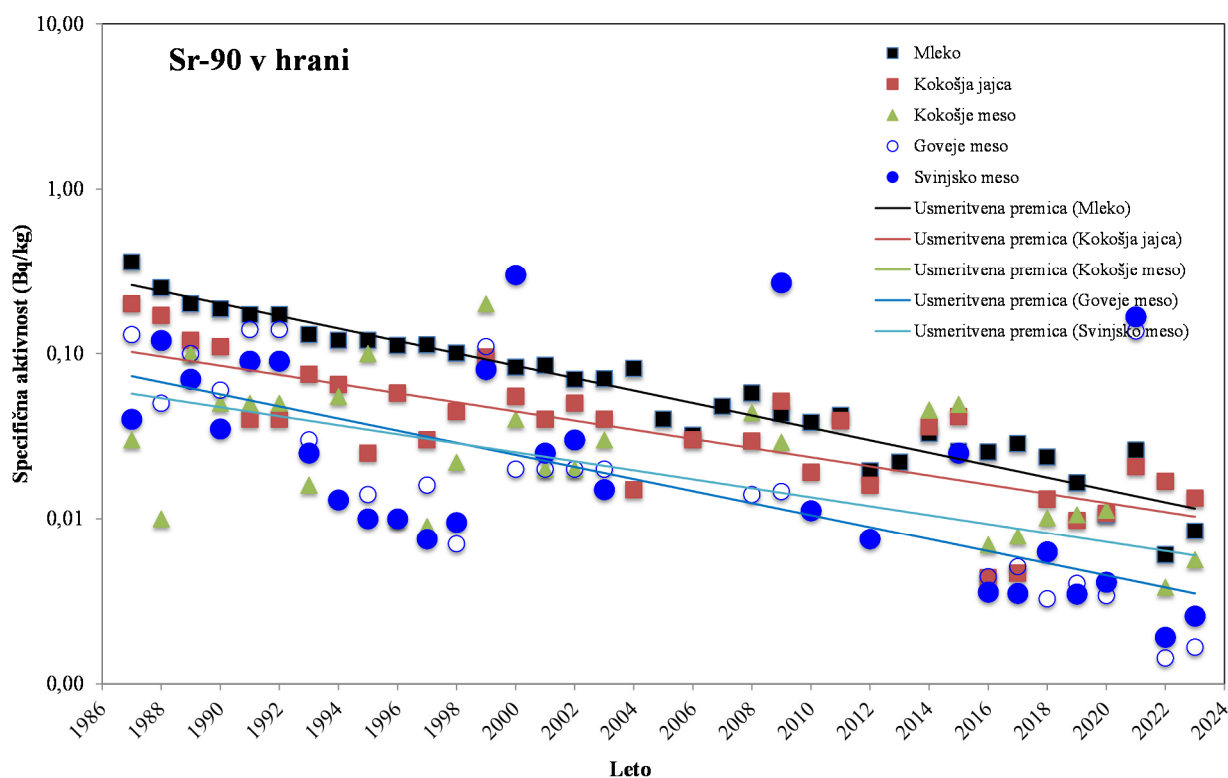
V okolici NEK v skupino živil z večjo vsebnostjo Sr-90 spada hrana rastlinskega izvora, predvsem listna zelenjava. Povprečna specifična aktivnost Sr-90 je najnižja v mesu in mleku. Pri vzorčenju drugod po Sloveniji smo največje vsebnosti Sr-90 detektirali v mesu in jajcih ter podzemni zelenjavi.

V okolici NEK so bile najvišje vrednosti detektirane v peteršilju ($0,26 \pm 0,02$) Bq/kg, drugod po Sloveniji pa v jajcih ($0,19 \pm 0,02$) Bq/kg.

Specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v hrani z leti nihajo, vendar je opazna težnja zniževanja vrednosti. Tako je s slike 6.2 razvidno, da se je specifična aktivnost Cs-137 v mleku od černobilske nesreče do danes znižala za približno 400-krat, specifična aktivnost Sr-90 pa se je v enakem obdobju v mleku znižala za faktor 10 (slika 6.4). Izmerjena specifična aktivnost Cs-137 v mleku je tako že nekaj let na ravni izpred černobilskega obdobja (1984, 1985), specifična aktivnost Sr-90 pa je tudi za faktor 2 nižja kot pred černobilsko nesrečo. Tudi za druga živila živalskega izvora je opazna težnja zmanjševanja specifičnih aktivnosti Cs-137 in Sr-90 po černobilski nesreči (sliki 6.2 in 6.4). S pobiranjem pridelka iz agrikulturnih ekosistemov konstantno odnašamo tako mineralna hranila kot radionuklide, zato se s časom koncentracije teh v tleh manjšajo. Poleg tega na kultiviranih površinah privzem Cs-137 ter Sr-90 v rastline prek koreninskega sistema omejuje predvsem vezava atomov Cs-137 in Sr-90 v tleh (na glinene in organske



delce), pa tudi povečana vsebnost kalija in s tem tudi radioaktivnega K-40 ter kalcija iz gnojil, ki močno zmanjšajo privzem obeh radionuklidov v rastline in s tem v hrano rastlinskega izvora in krmo [80]. Ta proces in pronicanje atomov Cs-137 globlje v zemljo z leti zmanjšujeta dostopnost Cs-137 rastlinam. Tako ta v manjši meri vstopa v prehransko verigo človeka. To lahko podkrepimo, če povprečnim specifičnim aktivnostim Cs-137 v živilih živalskega izvora po letih narišemo usmeritvene premice¹⁶. Iz naklonov premic, ki se med seboj odmikajo za največ 20 %, lahko izračunamo efektivni razpolovni čas Cs-137 v omenjenih živilih 6,6 let (slika 6.2). Izračunani razpolovni čas je manjši od fizikalnega razpolovnega časa Cs-137 30,1 let. Podobno lahko izračunamo efektivni razpolovni čas Sr-90 v živilih živalskega izvora 8,5 let (slika 6.4). Statistično razsutje podatkov je v primeru Sr-90 večje kot pri Cs-137, zato smo iz računanja aritmetične sredine izvzeli kokošje in svinjsko meso. Kljub temu je tudi ta izračunani efektivni razpolovni čas bistveno krajši od fizikalnega razpolovnega časa Sr-90 28,8 let.

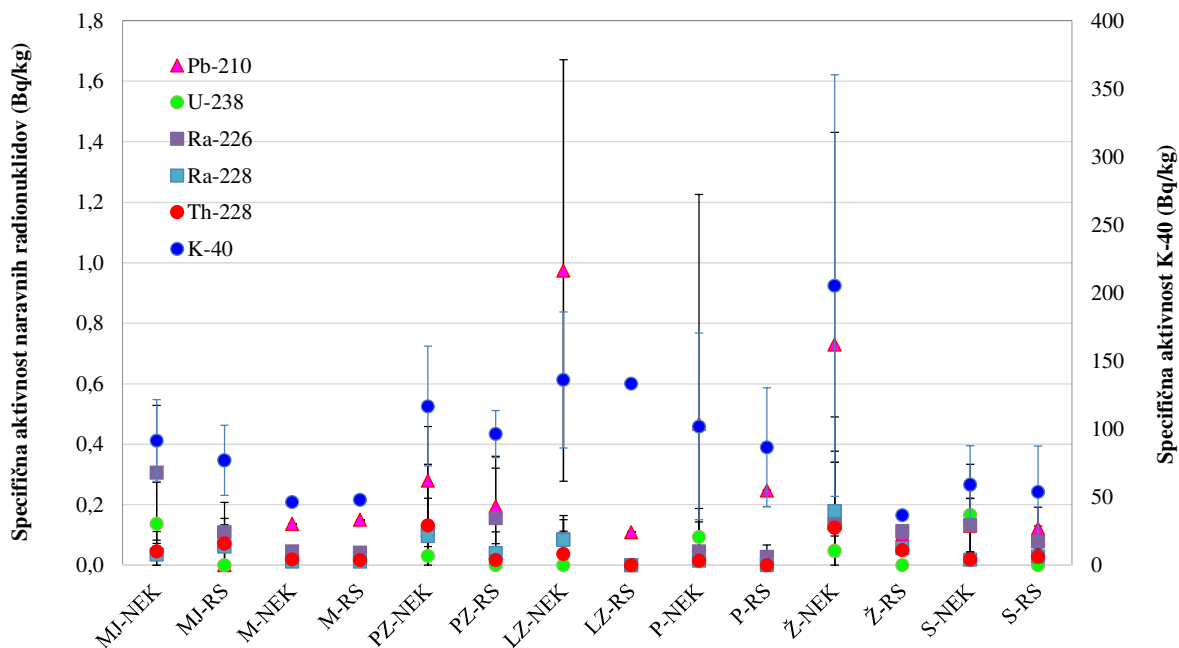


Slika 6.4: Izmerjene specifične aktivnosti Sr-90 od leta 1987 do 2023 v mleku, kokošjih jajcih ter kokošjem, govejem in svinjskem mesu, vzorčenih v okolici NEK. V letih 2004–2007 in 2011–2013 so bile izmerjene specifične aktivnosti v kokošjem, govejem in svinjskem mesu pod mejo detekcije, v svinjskem mesu pa tudi leta 2008. V kokošjih jajcih je bila izmerjena specifična aktivnost Sr-90 pod mejo detekcije v letih 2005, 2007 in 2013.

Jod (I-131)

Jod I-131 v letu 2023 v vzorcih hrane ni bil detektiran.

¹⁶ Podatkom smo prilagajali eksponentne krivulje $\sim e^{-\frac{t \ln 2}{t_{1/2}}}$. Ker so vrednosti na ordinatni osi v logaritemski skali, na sliki vidimo premice, katerih naklon je obratno sorazmeren z efektivnim razpolovnim časom $t_{1/2}$.



Slika 6.5: Izmerjene povprečne specifične aktivnosti naravnih radionuklidov (Bq/kg) v vzorčenih skupinah živilih v letu 2023 v okolici NEK in po Sloveniji (RS); MJ – meso in jajca, M – mleko, PZ – podzemna zelenjava, LZ – listna zelenjava, P – plodovke, Ž – žita, S – sadje. Predstavljene so povprečne vrednosti in standardni odmik.

Naravni radionuklidi

Med naravnimi radionuklidi v hrani, prenesenimi po različnih poteh iz zemlje, umetnih gnojil in zraka, je najmočnejše zastopan K-40, prisotni pa so tudi radionuklidi iz razpadnih vrst U-238 in Th-232. Njihove specifične aktivnosti v posameznih živilih, vzorčenih v okolici NEK in drugod po Sloveniji (RS), so prikazane na sliki 6.5.

V letu 2023 je bila specifična aktivnost K-40 v hrani, pridelani na krško-brežiškem polju, od 30 Bq/kg (jagode) do 382 Bq/kg (ječmen), v hrani, vzorčeni drugod po Sloveniji, pa od 12 Bq/kg (jabolka) do 133 Bq/kg (solata). V okolici NEK v skupino z večjo specifično aktivnostjo K-40 spada žito, med živila z manjšo aktivnostjo K-40 pa mleko in sadje. Drugod po Sloveniji v skupino z večjo specifično aktivnostjo K-40 spada žito, med živila z manjšo aktivnostjo K-40 pa mleko in žito.

Od naravnih radionuklidov (brez K-40) k letni efektivni dozi zaradi zaužitja hrane v okolici NEK in drugod po Sloveniji največ prispeva Pb-210 (76% in 67%). V letu 2023 je bilo v okolici NEK in drugod po Sloveniji največ Pb-210 v listni zelenjavi in žitu (okolica NEK) ter plodovkah (drugod po Sloveniji). Najmanjše specifične aktivnosti so bile izmerjene v mesu (okolica NEK in drugod po Sloveniji). V posameznih živilih v okolici NEK je bila najvišja specifična aktivnost Pb-210 izmerjena v bezgu ($2,5 \pm 0,2$) Bq/kg, v živilih, vzorčenih po Sloveniji, pa v krompirju ($0,29 \pm 0,12$) Bq/kg. Razpon specifičnih aktivnosti drugih naravnih radionuklidov v hrani v okolici NEK in po Sloveniji prikazujemo v tabeli 6.2.

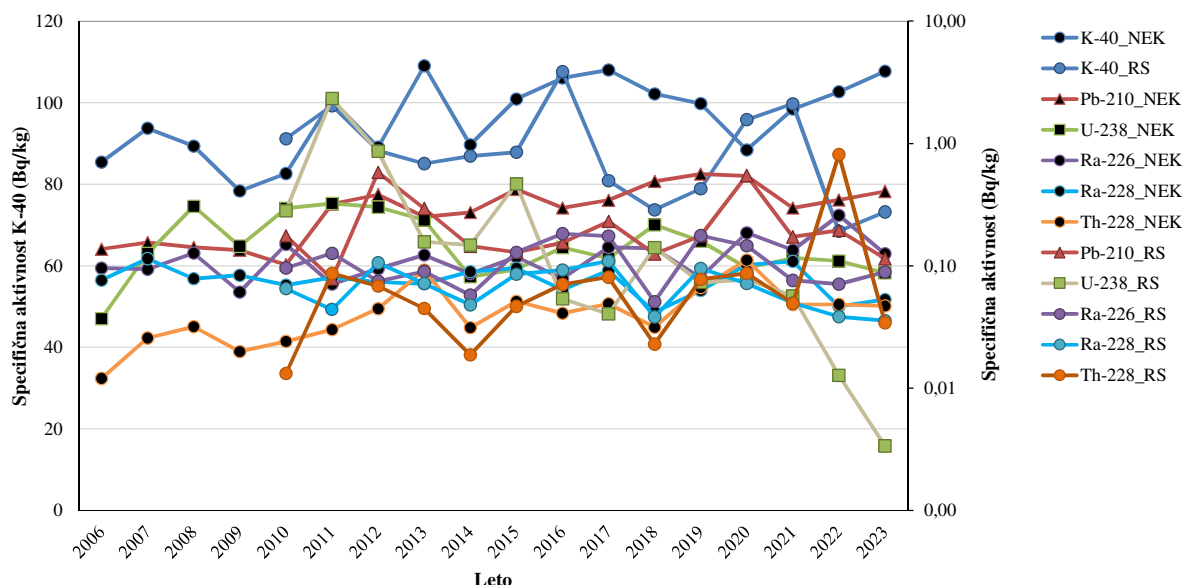


Tabela 6.2: Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v okolici NEK in po Sloveniji

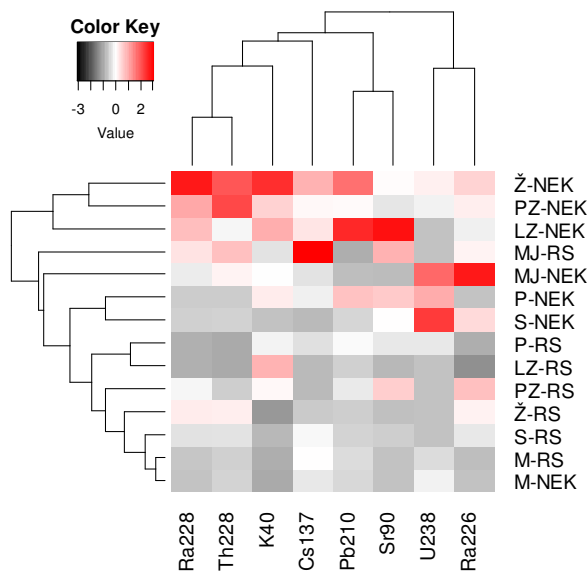
Radionuklid	NEK	Slovenija
	Specifična aktivnost (Bq/kg)	
U-238	do 0,5 (feferoni)	do 0,05 (bučke)
Ra-226	do 0,61 (kokošje meso)	do 0,39 (korenje)
Ra-228	do 0,54 (ječmen)	do 0,21 (goveje meso)
Th-228	do 0,37 (ječmen)	do 0,16 (goveje meso)

Vsebnosti naravnih in umetnih radionuklidov v hrani z leti nihajo. V letu 2023 so izmerjene specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v hrani iz okolice NEK v okviru merske negotovosti primerljive s tistimi iz preteklih let in pa s tistimi, izmerjenimi v letih od 2010 do 2023 drugod po Sloveniji (slika 6.6).

S programsko opremo »R« [88] smo statistično obdelali podatke specifičnih aktivnosti merjenih radionuklidov v 2023 za živila, vzorčena v okolici NEK in drugod po Sloveniji (RS). Z analizo gruč na podlagi evklidskih razdalj ([88]) smo med seboj primerjali z-transformirane povprečne specifične aktivnosti radionuklidov (Cs-137, Sr-90, K-40, Pb-210, U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228) v skupinah živil – meso in jajca (MJ), mleko (M), podzemna zelenjava (PZ), listna zelenjava (LZ), plodovke (P), žito (Ž) in sadje in vino (S). Barvni diagram z dvodimenzionalno analizo gruč (slika 6.7) prikazuje, da relativno največ radionuklidov vsebujejo žita (K-40, Ra228, Th-228, Cs-137, Pb210), podzemna (Ra-228, Th-228 in K-40) in listna zelenjava (Pb-210 in Sr-90) (vse v okolici NEK), najmanj pa mleko (v okolici NEK in drugod po Sloveniji), sadje in žita (drugod po Sloveniji). Razlik v vsebnosti radionuklidov v hrani iz okolice NEK in drugod po Sloveniji v večini primerov ni.



Slika 6.6: Povprečne izmerjene specifične aktivnosti (Bq/kg) naravnih radionuklidov v hrani, vzorčeni v okolici NEK, po letih od 2006 do 2023, ter drugod po Sloveniji v letih od 2010 do 2023 (specifične aktivnosti K-40 so na levi ordinati, specifične aktivnosti drugih radionuklidov pa na desni).



Slika 6.7: Barvni diagram z dvodimenzionalno analizo gruč na podlagi z-transformiranih povprečnih specifičnih aktivnosti radionuklidov v skupinah živil, vzorčenih v 2023 v okolici NEK in drugod po Sloveniji (RS) (MJ – meso in jajca, M – mleko, PZ – podzemna zelenjava, Z – zelenjava, LZ – listnata zelenjava, P – plodovke, S – sadje in vino). Črna barva pomeni vrednosti pod povprečjem, bela povprečne vrednosti, rdeča pa nad povprečjem za posamezni radionuklid.

Tabela 6.3: Okvirna poraba živil po skupinah na člana gospodinjstva glede na podatke NIJZ ([85], [86])

Živilo	SI.Menu 2017/2018 Populacijske skupine			
	Dojenčki (Malčki)	Mladostniki	Odrasli	Starejši odrasli (nad 65 let)
	Povprečje (kg/leto)			
Jajca in meso	23	56	68	58
Mleko (samo mleko)	46	41	23	20
Podzemna zelenjava (krompir)	17	28	29	30
Listna zelenjava	2,9	6,7	14	13
Plodovke	7.2	12	19	18
Žito (nepredelani žitni izdelki, moka in kruh)	59	47	49	52
Sadje in vino	72	77	88	101



OCENA UČINKOV

Oceno doznih obremenitev prebivalstva¹⁷ zaradi zaužitja hrane, ki jih povzročajo posamezni radionuklidi, dobimo, če specifično aktivnost posameznega radionuklida v hrani pomnožimo z doznim pretvorbenim faktorjem $h(g)_i$, specifično aktivnostjo posameznega radionuklida a_i in letno porabo posamezne vrste hrane m_i (glej postopek *Ocena sevalnih obremenitev (LMR-RP-01)*):

$$E_{50-70, i} = a_i h(g)_i m_i \quad (\mu\text{Sv}) \quad (6.1)$$

Celotna predvidena efektivna doza pri uživanju hrane je vsota prispevkov doz ob zaužitju posamezne vrste hrane. Podatki za letno porabo posamezne skupine živil glede na starostne skupine (malčki, mladostniki, odrasli) so prikazani v tabeli 6.3. Temeljijo na povprečni količini porabljenih živil in pijač na člana gospodinjstva, ki jo je pripravil NIJZ za 2017/2018.

Pri oceni sevalne obremenitve referenčne osebe v okolici NEK smo privzeli, da le-ta uživa hrano, pridelano na krško-brežiškem področju, pri oceni sevalne obremenitve referenčne osebe iz drugih območij v Sloveniji pa smo privzeli, da oseba uživa hrano s celotnega območja Slovenije.

Pri oceni sevalne obremenitve prebivalcev v okolici NEK in drugod po Sloveniji smo upoštevali podatke porabe posameznih skupin živil po starostnih skupinah predstavljenih v tabeli 6.3.

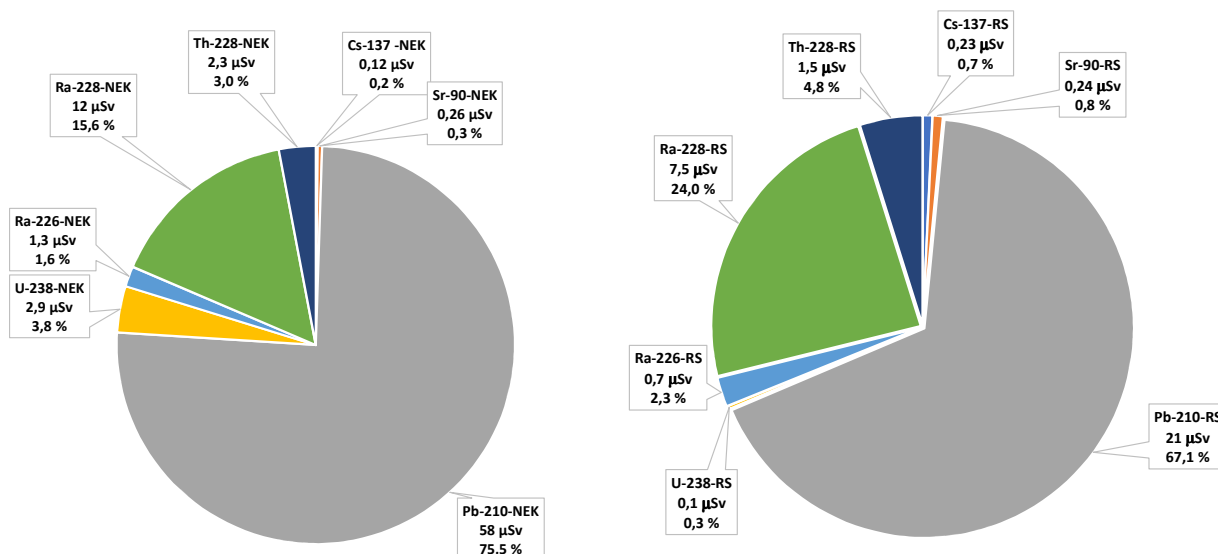
Republiški program nadzora radionuklidov v hrani predvideva vzorčenje hrane, pridelane v Sloveniji, medtem ko hrana, ki prihaja iz uvoza, ni natančneje kontrolirana, tako da podatki o vsebnosti radionuklidov niso znani in je zato težko oceniti dejanske doze, ki jih prebivalci prejmejo zaradi zaužitja hrane. Zato je letna efektivna doza zaradi zaužitja hrane izračunana ob privzetku, da prebivalci uživajo le hrano, pridelano na krško-brežiškem področju. Pri izračunu doze, prejete zaradi C-14, pa privzamemo, da prebivalci uživajo hrano iz notranjega kroga NEK (ograja NEK) in zunanjega kroga (rob izključitvenega območja) dva meseca v letu, drugih 10 mesecev pa hrano od drugod (Dobova).

Efektivna doza pri C-14 se nanaša na hrano in ne na posamezno vrsto hrane, saj se specifične aktivnosti C-14 v raznih vrstah sadja ali zelenjave ne razlikujejo. Tako ima tudi hrana živalskega izvora enako specifično aktivnost, če se živali prehranjujejo z rastlinami iz okolice NEK. C-14 je namreč del organskih molekul v organizmih, medtem ko drugi radionuklidi (Cs-137, K-40...) ne spadajo med strukturne elemente. Govorimo o zamenjavi atomov C-12 z atomi C-14 v organskih molekulah.

Ocenili smo, da je bila efektivna doza za odrasle referenčne osebe ob zaužitju vseh vrst vzorčene hrane zaradi prisotnosti radionuklidov Cs-137, Sr-90, Pb-210, U-238, Ra-226, Ra-228 in Th-228 v letu 2023 v okolici NEK (76 ± 48) μSv , skupaj s K-40 pa (259 ± 96) μSv . Razlike v skupnih dozah po letih se pojavljajo predvsem zaradi razlik v dozah, prejetih zaradi naravnih radionuklidov, kot so K-40, Pb-210, U-238 in Ra-228, ki so odvisne od specifične aktivnosti teh radionuklidov in porabe živil iz posameznih skupin. Drugod po Sloveniji je bila efektivna doza odrasle osebe zaradi zaužitja brez K-40 (31 ± 12) μSv , s K-40 pa (148 ± 32) μSv . V nadaljevanju obravnavamo doze za odrasle referenčne osebe, izračunane po skupinah živil.

Prispevki posameznih radionuklidov k efektivni dozi za odraslo osebo v letu 2023 v okolici NEK in drugod po Sloveniji so prikazani na sliki 6.8 levo, pri čemer ni upoštevana efektivna doza, prejeta zaradi K-40. K skupni efektivni dozi brez K-40 je v okolici NEK največ prispeval Pb-210 (76 %), najmanj pa Cs-137 (0,2%) in Sr-90 (0,3 %). Drugod po Sloveniji (slika 6.8 desno) je k skupni efektivni dozi brez K-40 največ prispeval Pb-210 (67 %), in najmanj U-238 (0,3 %). Deleži radionuklidov so primerljivi z vzorčenji iz preteklih let.

¹⁷ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejelo najvišje doze.



Slika 6.8: Prispevki posameznih radionuklidov k skupni efektivni dozi (μSv), izračunani za odraslo osebo zaradi radionuklidov v hrani, po anketi porabe člana gospodinjstva, izvedeni v okolici NEK, in po podatkih SURS drugod po Sloveniji. *Levo:* v okolici NEK v letu 2023; *desno:* drugod po Sloveniji v letu 2023. Efektivne doze so bile izračunane za posamezne skupine živil. Skupna efektivna doza zaradi radionuklidov v hrani brez upoštevanja K-40 je bila v okolici NEK v letu 2023 76 μSv , drugod po Sloveniji pa 31 μSv .

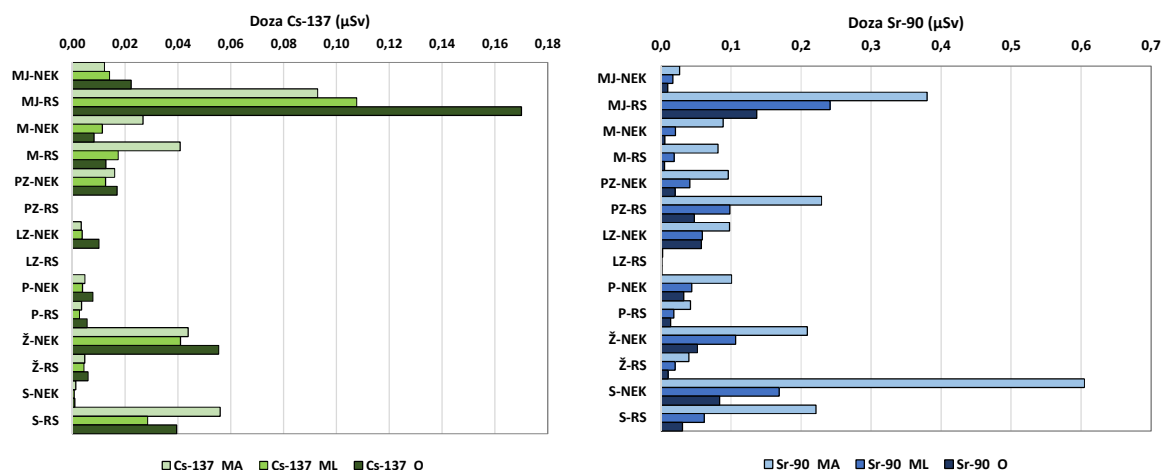
Umetni radionuklidi

Skupna letna efektivna doza za odraslo referenčno osebo, malčke in mladostnike zaradi vsebnosti Cs-137 v hrani je bila v letu 2023 v okolici NEK 0,1 μSv in drugod po Sloveniji 0,2 μSv . Skupna efektivna doza za odraslo referenčno osebo zaradi vsebnosti Sr-90 v hrani pa je bila v letu 2023 v okolici NEK 0,3 μSv in drugod po Sloveniji 0,2 μSv , za malčke 1,2 μSv in 1,0 μSv , za mladostnike pa 0,5 μSv . V okolici NEK je bil delež letne efektivne doze zaradi umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 pri uživanju hrane za odraslo referenčno osebo 0,5 % (0,2 % od Cs-137 in 0,3 % od Sr-90) od celotne prejete efektivne doze (76 μSv brez K-40). Drugod po Sloveniji je bil delež letne efektivne doze zaradi umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 pri uživanju hrane 1,6 % (0,7 % od Cs-137 in 0,8 % od Sr-90) glede na celotno prejeto efektivno dozo (31 μSv brez K-40), kar je z biološkega vidika zanemarljivo.

K letni dozi, prejeti zaradi umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 v hrani v okolici NEK (0,4 μSv in drugod po Sloveniji 0,4 μSv), je največ prispevalo prehranjevanje z mesom (Cs-137 in Sr-90) in sadjem (Sr-90) (slika 6.9).

V zračnih izpustih, ki jih v okolje spušča NEK, sta bili v letu 2023 aktivnosti Cs-137 in Sr-90 zelo majhni (1,1 MBq, 0,6 kBq). V vzorcih jabolk in hrušk iz neposredne bližine NEK (sadovnjak ob ograji) je bila vsebnost Cs-137 v letu 2023 manj kot 0,001 Bq/kg, vsebnost Sr-90 pa manj kot 0,1 Bq/kg, kar je primerljivo z vsebnostmi v drugih živilih, vzorčenih v okolici NEK in po Sloveniji.

V zračnih in tekočinskih izpustih NEK smo v letu 2023 zaznali tudi naslednje umetne radionuklide, ki niso del globalne kontaminacije: Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Se-75, I-131, I-133 in Te-127m. Vendar so bile koncentracije aktivnosti teh radionuklidov v okolju tako nizke, da tudi v letu 2023 ti radionuklidi v živilih niso bili detektirani.



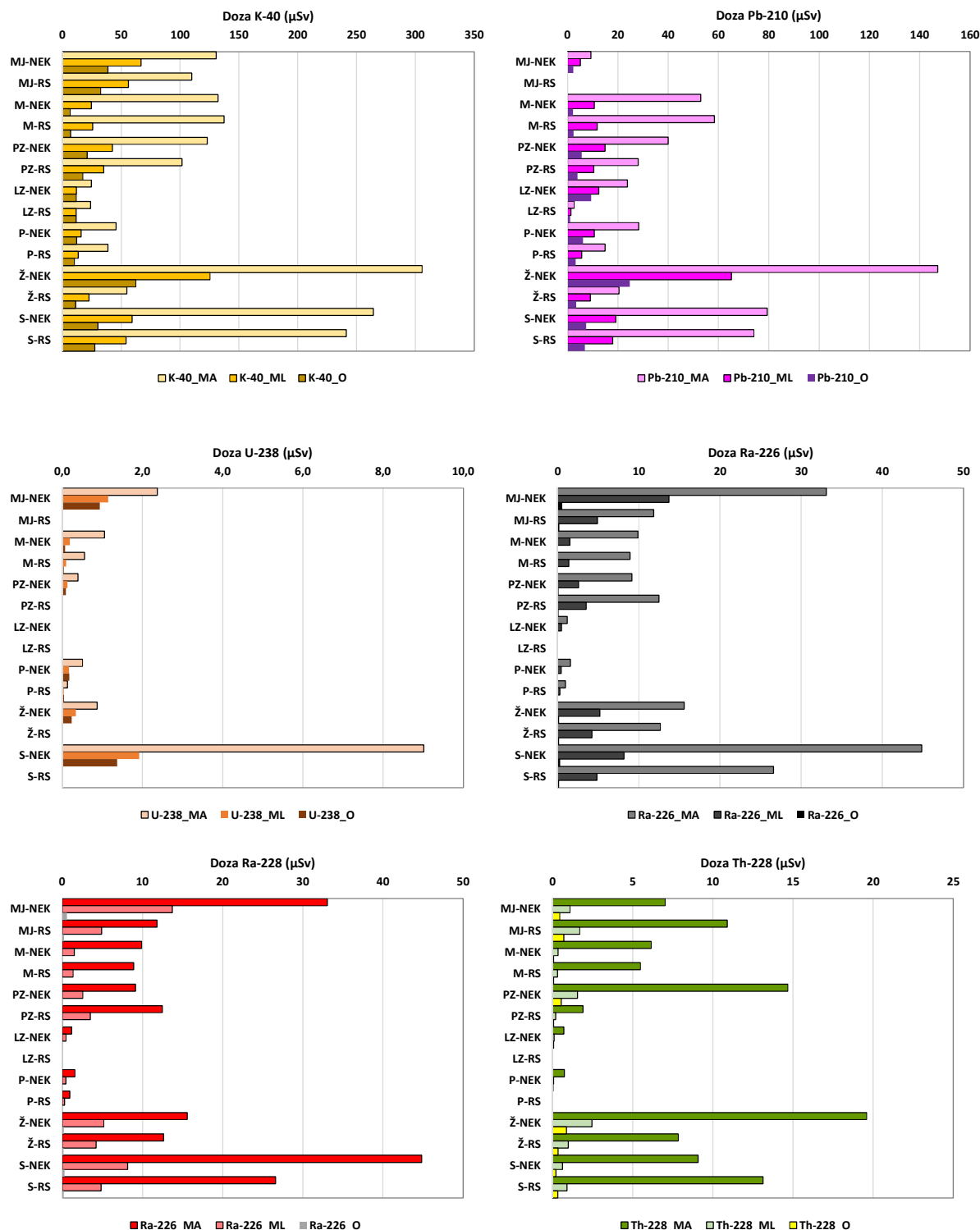
Slika 6.9: Izračunane efektivne doze (μSv) za malčke (MA), mladostnike (ML) in odraslo osebo (O) zaradi Cs-137 in Sr-90 v različnih skupinah živil, vzorčenih v okolici NEK in drugod po Sloveniji. Skupna efektivna doza zaradi Cs-137 in Sr-90 v hrani je bila v okolici NEK v letu 2023 za odraslo referenčno osebo $0,4 \mu\text{Sv}$ (Cs-137: $0,1 \mu\text{Sv}$, Sr-90: $0,3 \mu\text{Sv}$), drugod po Sloveniji pa $0,4 \mu\text{Sv}$ (Cs-137: $0,2 \mu\text{Sv}$, Sr-90: $0,2 \mu\text{Sv}$). Za malčke v okolici NEK $1,3 \mu\text{Sv}$ (Cs-137: $0,1 \mu\text{Sv}$, Sr-90: $1,2 \mu\text{Sv}$) in drugod po Sloveniji $1,2 \mu\text{Sv}$ (Cs-137: $0,2 \mu\text{Sv}$, Sr-90: $1,0 \mu\text{Sv}$), za mladostnike v okolici NEK $0,6 \mu\text{Sv}$ (Cs-137: $0,1 \mu\text{Sv}$, Sr-90: $0,5 \mu\text{Sv}$) in drugod po Sloveniji $0,7 \mu\text{Sv}$ (Cs-137: $0,2 \mu\text{Sv}$, Sr-90: $0,5 \mu\text{Sv}$).

Naravni radionuklidi

V splošnem k skupni efektivni dozi zaradi vsebnosti naravnih radionuklidov največ prispeva prehranjevanje z žiti in sadjem (slika 6.10), najmanj pa s plodovkami in listno zelenjavo.

Skupna letna efektivna doza zaradi K-40 je bila za referenčno odraslo osebo v letu 2023 v okolici NEK $183 \mu\text{Sv}$ in drugod po Sloveniji $117 \mu\text{Sv}$, za malčke $1026 \mu\text{Sv}$ in $708 \mu\text{Sv}$, za mladostnike pa $347 \mu\text{Sv}$ in $219 \mu\text{Sv}$. Količina kalija v telesu se uravnava homeostatsko, pri čemer se odvečne količine izločijo prek ledvic. Pri odraslih je vsebnost kalija v telesu $0,18 \%$, pri otrocih pa $0,20 \%$. Ob upoštevanju deleža K-40 glede na K-39 ($0,0117 \%$ naravne izotopske vsebnosti), specifične aktivnosti K-40 ($2,6 \text{ E}+08 \text{ Bq/kg}$) in doznega pretvorbenega faktorja $3 \mu\text{Sv}$ na leto na Bq/kg je po podatkih UNSCEAR letna doza, ki jo prejmejo odrasli zaradi K-40 $165 \mu\text{Sv}$, letna doza, ki jo prejmejo otroci, pa $185 \mu\text{Sv}$. K vnosu K-40 v telo je v letu 2023 največ prispevalo prehranjevanje z žiti in sadjem, najmanj K-40 pa je bilo v listni zelenjavi in plodovkah (slika 6.10).

Skupna letna efektivna doza zaradi Pb-210 v hrani je bila za referenčno odraslo osebo v letu 2023 v okolici NEK $58 \mu\text{Sv}$ in drugod po Sloveniji $21 \mu\text{Sv}$, za malčke $381 \mu\text{Sv}$ in $198 \mu\text{Sv}$ in za mladostnike $138 \mu\text{Sv}$ in $56 \mu\text{Sv}$, kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo z referenčno vrednostjo UNSCEAR [42] in meritvami iz preteklih let. Prejeta efektivna doza v okolici NEK zaradi Pb-210 se z leti močno spreminja, od $6,8 \mu\text{Sv}$ v letu 2006 do $58 \mu\text{Sv}$ v letu 2023. Pb-210 lahko prehaja iz tal v rastline prek koreninskega sistema, vendar se večina zadrži v koreninah in le slabo prehaja v nadzemne dele, sploh pa v semena in plodove [84]. Vsebnost Pb-210 v nadzemnih delih je tako večinoma posledica usedanja Pb-210 iz zraka. Usedline z rastlinskih organov lahko odstranimo s pranjem (predvsem zelenjave in sadja), v primeru trave (krme) in žit, ki jih pred uporabo ne peremo, pa je vsebnost povezana z različnimi okoljskimi dejavniki, kot so količina padavin, vetrovnost itd. Iz meritev v letu 2023 je razvidno, da je k letni dozi zaradi Pb-210 v hrani v okolici NEK največ prispevalo zaužitje žit in sadja, drugod po Sloveniji pa zaužitje mleka in mesa (slika 6.10).



Slika 6.10: Izračunane efektivne doze za malčke (MA), mladostnike (ML) in odrasle osebe (O) zaradi K-40, Pb-210, Ra-226, Ra-228, U-238 in Th-228 (μSv) v različnih skupinah živil, vzorčenih v okolici NEK in drugod po Sloveniji v letu 2023



Efektivna doza zaradi vsebnosti U-238 v hrani je bila za referenčno odraslo osebo v letu 2023 v okolici NEK 2,9 μSv , drugod po Sloveniji pa 0,1 μSv , za malčke 14 μSv in 0,7 μSv , za mladostnike pa 3,9 μSv in 0,1 μSv . K tej dozi je največ prispevalo prehranjevanje z žiti in sadjem (slika 6.10). Efektivna doza zaradi vsebnosti Ra-226 v hrani je bila za referenčno odraslo osebo v okolici NEK 1,3 μSv , drugod po Sloveniji 0,7 μSv , za malčke 115 μSv in 73 μSv , za mladostnike pa 32 μSv in 19 μSv . Zaradi vsebnosti Ra-228 je bila v okolici NEK 12 μSv in drugod po Sloveniji 7,5 μSv , za malčke 270 μSv in 185 μSv , za mladostnike pa 62 μSv in 39 μSv . K letni dozi, prejeti zaradi Ra-226 in Ra-228, je največ prispevalo prehranjevanje z sadjem in žiti (slika 6.10). Ra-226 in Ra-228 sta bila skoraj v vseh hranilih v okolici NEK nad mejo kvantifikacije, kar je v skladu z radiološkimi nadzornimi meritvami NEK v preteklih letih in primerljivo z vsebnostmi Ra-226 in Ra-228 v hrani drugod po Sloveniji. Efektivna doza zaradi vsebnosti Th-228 v hrani v okolici NEK je bila za referenčno odraslo osebo 2,3 μSv , drugod po Sloveniji pa 1,5 μSv , za malčke 58 μSv (okolica NEK) in 39 μSv (drugod po Sloveniji), za mladostnike pa 6,3 μSv (okolica NEK) in 4,1 μSv (drugod po Sloveniji), vendar je prispevek Th-228 k skupni efektivni dozi zaradi kratkega razpolovnega časa in izjemno nizkih vsebnosti z biološkega vidika zanemarljiv. K letni dozi, prejeti zaradi Th-228, je največ prispevalo prehranjevanje z žiti (slika 6.10).

C-14

V izpustih NEK sta tudi C-14 in tritij, ki se v ekosistemih sicer pojavljata kot naravna radionuklida. Nastajata namreč v zgornjih plasteh atmosfere v jedrskih reakcijah zaradi kozmičnega sevanja. C-14 se v rastline vgrajuje v procesu fotosinteze, v živalski in človeški organizem pa prehaja z uživanjem predvsem rastlinske hrane. V letih od 2006 do 2023 so potekale meritve C-14 tako v izpustih kot bioloških vzorcih, zbranih v okolici NEK, analize so bile opravljene na IRB v Zagrebu. Vzorčenje koruze, pšenice, hrušk in jabolk je bilo opravljeno v juliju in septembru. Efektivna doza zaradi prisotnosti C-14 v hrani je bila ob ograji NEK ocenjena na $(14,7 \pm 0,5) \mu\text{Sv}$, v okolici NEK (na razdalji do 1 km od osi reaktorja) $(14,6 \pm 0,6) \mu\text{Sv}$. Ocenjena efektivna doza za okolico NEK je $(14,6 \pm 0,6) \mu\text{Sv}$, kjer upoštevamo, da prebivalci uživajo hrano iz neposredne bližine NEK (blizu roba izključitvenega območja) dva meseca v letu, drugih 10 mesecev pa hrano od drugod (Dobova). Na kontrolni točki v Dobovi, kjer učinka NEK ni, pa je ocenjena efektivna doza $(14,5 \pm 0,8) \mu\text{Sv}$, kar je primerljivo v okviru relativne merske negotovosti (5,5 %) in naravne variabilnosti. Ocenjena doza $(14,6 \mu\text{Sv})$ je prispevek naravnega C-14 in C-14 zaradi jedrskih poskusov v preteklosti, v razmerju 40 % proti 60 % [89]. Ocenjena letna efektivna doza zaradi C-14 iz NEK je $(0,02 \pm 0,06) \mu\text{Sv}$.

Efektivni dozi v okolici NEK in v Dobovi sta izračunani glede na podatek, da povprečen prebivalec (referenčna oseba) v Sloveniji porabi 330 kg hrane na leto, kar je več, kot predvideva 29. člen *Uredbe o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih (UV2)* [10], kjer je privzeto 250 kg, če masa in sestava zaužite hrane za referenčno osebo ni znana. Ocena deleža ogljika v hrani je 30 %, kar pri porabi 330 kg pomeni, da se v organizem s hrano vnese 100 kg ogljika letno. V omenjenem modelu tudi predpostavimo, da prebivalci uživajo hrano iz neposredne okolice NEK dva meseca v letu, drugih 10 mesecev pa hrano od drugod (Dobova). Iz tega izhaja, da tudi v primeru računanja efektivne doze zaradi C-14 privzamemo, da prebivalci uživajo hrano, pridelano na krško-brežiškem področju (od ograje NEK in navzven do Dobove). Razlika med računanjem doze zaradi C-14 in doze zaradi vnosa drugih radionuklidov v hrano je v tem, da se za C-14 upošteva uteženo povprečje specifične aktivnosti C-14 glede na lokacijo vzorčenja, za druge radionuklide pa zaradi različnega načina vzorčenja to ni mogoče. Efektivna doza pri C-14 se nanaša na hrano in ne na posamezno vrsto hrane, saj se specifične aktivnosti C-14 (v Bq na kilogram ogljika) v raznih vrstah živil ne razlikujejo. Razmerje med izotopoma C-14 in C-12 je namreč v vseh organizmih konstantno in sledi razmerju med izotopoma v atmosferi.



SKLEPI

V letu 2023 je bilo opravljenih 30 meritev različnih vrst hrane iz okolice NEK. Zelenjavo, žita in sadje smo vzorčili od junija do oktobra, od vzem mesa in jajc je bil v januarju, februarju in marcu, mleko pa je bilo vzorčeno mesečno. Nadzor vsebnosti v hrani drugod po Sloveniji so izvedli na ZVD v okviru programa nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v letu 2023, kjer je bilo opravljenih 19 meritev različnih vrst hrane [15].

Ocenili smo, da je bila letna efektivna doza za odraslo referenčno osebo v okolici NEK zaradi vsebnosti umetnih in naravnih radionuklidov v hrani, pridelani na krško-brežiškem polju v letu 2023, brez upoštevanja K-40 $76 \mu\text{Sv}$, z upoštevanjem K-40 pa $259 \mu\text{Sv}$. Največji delež k skupni efektivni dozi zaradi zaužitja hrane, brez upoštevanja K-40, prispevajo naravni radionuklidi (99,5 %): Pb-210 (75,5%), Ra-228 (15,6 %), U-238 (3,77%), Ra-226 (1,7%) in Th-228 (3,0 %). Največji delež k celotni dozi $76 \mu\text{Sv}$ je prispevalo prehranjevanje z žiti, sadjem in mesom. Glavni vir vnosa Cs-137 in Sr-90 je bilo v letu 2023 meso.

Deleža letnih efektivnih doz glede na celotno prejeta efektivno dozo pri uživanju hrane zaradi radionuklidov sta bila za umetna radionuklida Cs-137 in Sr-90 0,2 % in 0,3 % (0,5 % skupne doze), kar je z biološkega vidika zanemarljivo [92]. Iz grafov, predstavljenih v tem poglavju, lahko ugotovimo, da se vsebnosti obeh radionuklidov v vseh hranilih, ki se vzorčujejo na krško-brežiškem polju, še naprej zmanjšujeta. Zmanjševanje vsebnosti Cs-137 je, glede na rezultate meritev specifične aktivnosti v hrani po Sloveniji v prejšnjih letih in glede na podatke iz diplomskega dela [83], manj izrazito v gozdnih ekosistemih.

Med detektiranimi radionuklidi v zračnih izpustih NEK so tudi drugi umetni radionuklidi, ki pa jih v hrani v letu 2023 nismo detektirali, zato učinek zračnih izpustov NEK v hrani ni neposredno določljiv. Izračuni letnih efektivnih doz zaradi zaužitja hrane, ki vsebuje umetne in naravne radionuklide, so pokazali, da je delež efektivne doze v letu 2023 v okolici NEK zaradi umetnih radionuklidov glede na celotno efektivno dozo zaradi vseh radionuklidov v hrani 0,5-odstoten, po Sloveniji pa 1,5-odstoten, kar je z biološkega vidika zanemarljivo. Od tod izhaja, da je prejeta efektivna doza zaradi zaužitja hrane v glavnem posledica vnosa naravnih radionuklidov.

Izračunane efektivne doze v letu 2023 veljajo pri pogoju, da referenčna oseba uživa samo hrano, pridelano na krško-brežiškem polju. Ocena velja tako za umetne in naravne radionuklide, kot tudi za C-14, ki pa se zaradi narave mehanizma zamenjave atomov C-12 z atomi C-14 v organskih molekulah organizmov obravnava ločeno. Zaradi tega pri obravnavi podatkov o vsebnosti C-14 (v Bq na kilogram ogljika) v hrani ni treba razlikovati med posameznimi vrstami hrane, saj je razmerje med C-14 in C-12 konstantno pri vseh organizmih in sledi razmerju v atmosferi. Pri oceni letne efektivne doze bi bilo treba upoštevati delež samooskrbe prebivalcev, saj je iz podatkov o samooskrbi prebivalstva v Sloveniji razvidno, da prebivalci večji del hrane kupijo, hrana pa prihaja bodisi z drugih področij Slovenije ali iz uvoza. Republiški program nadzora radionuklidov v hrani predvideva vzorčenje hrane, pridelane v Sloveniji, medtem ko hrana, ki prihaja iz uvoza, ni analizirana na vsebnost radionuklidov. Tako podatki o vsebnosti radionuklidov v hrani iz uvoza niso znani in je težko oceniti dejanske doze, ki jih prebivalci dobijo zaradi zaužitja hrane. Kot kažejo rezultati primerjave vsebnosti radionuklidov v hrani s krško-brežiškega območja s tistimi drugod po Sloveniji, učinka delovanja NEK na vsebnost radionuklidov v hrani ni zaznati, oziroma je zanemarljivo majhen.

Edini radionuklid, ki ga sistematično merimo v okolju in je zagotovo vsaj delno posledica plinastih in tekočinskih izpustov NEK, je tritij (H-3), vendar njegove prisotnosti v hrani v okviru merilnega nadzora nismo ugotavljali. Študija raziskovalcev IJS iz leta 2017 je pokazala, da se v rastlinju (jabolkah) v neposredni bližini NEK (rob izključitvenega območja in navzven) detektirajo vsaj 6-krat povečane koncentracije aktivnosti tritija glede na kontrolno mesto vzorčenja. Študija raziskovalcev IRB v letu 2023 je pokazala, da so koncentracije aktivnosti organsko vezanega tritija v rastlinju (koruza, jabolka) od $(2,6 \pm 1,0)$ do $(9,6 \pm 0,9)$ Bq/L ob zahodni ograji NEK (lokacija J). Dozna obremenitev prebivalstva zaradi vsebnosti OBT v hrani je z biološkega stališča zanemarljiva.



7 REFERENCE

- [1] Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2022, interna oznaka 9/2023, Ljubljana, april 2023
- [2] Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2014, interna oznaka 5/2015, Ljubljana, marec 2015
- [3] Meritve radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2007, Ljubljana, interna oznaka 25/2007, ISSN 1318-2161, marec 2008
- [4] Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2010, interna oznaka 12/2011, Ljubljana, marec 2011
- [5] Mesečna poročila o radioaktivnih emisijah in dozi, NEK, NEK-RETS, Rev. 10 in Rev. 11, Table 5.9.1, 2016–2023
- [6] Poročilo o meritvah plinastih efluentov v letu 2023, št. poročila 7/2024, IJS, februar 2023
- [7] Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-1), Uradni list RS, št. 76/17, 26/19, 172/21 in 18/23
- [8] Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti (JV10), Uradni list RS, št. 27/18
- [9] Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti v pitni vodi, Uradni list RS, št. 74/15, 76/17 in 104/20
- [10] Uredba o mejnih dozah, referenčnih ravneh in radioaktivni kontaminaciji (UV2), Uradni list RS, št. 18/18
- [11] Uredba o območjih omejene rabe prostora zaradi jedrskega objekta in o pogojih gradnje objektov na teh območjih (UV3), Uradni list RS, št. 78/19
- [12] Pravilnik o posebnih zahtevah varstva pred sevanji in načinu ocene doz (SV5), Uradni list RS, št. 47/18 in 30/21
- [13] Projektna naloga Neodvisni nadzor obratovalnega monitoringa NE Krško za leto 2023, URSJV, št. 430-22/2022/2 z dne 26. 1. 2023
- [14] Letna doza v Sloveniji zaradi sevanja naravnega ozadja, ZVD, Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20230024-AŽ, 2023
- [15] Poročilo o izpostavljenosti prebivalcev Slovenije umetni radioaktivnosti v letu 2023, ZVD, Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20240004-MG, marec 2024
- [16] Poročilo o izvajanju monitoringa radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v obdobju januar–december 2023, ZVD Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20230003-D-MG, januar 2024
- [17] Poročilo o izvajanju monitoringa radioaktivnosti živil v Republiki Sloveniji v obdobju januar–december 2023 – 3. faza (sklop 1), ZVD Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20230013-3-MP, januar 2024
- [18] Letno poročilo o opravljenih meritvah aktivnosti sevalcev gama in beta, Monitoring radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji za leto 2023, IJS, 2/2024, januar 2024
- [19] Ovrednotenje merskih podatkov o radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v letu 2023, IJS-DP-14610, januar 2024
- [20] Poročilo o meritvah radioaktivnosti pitne vode v letu 2023, št. poročila 59/2023, IJS, oktober 2023
- [21] I. Krajcar Bronić, Izvješće o mjerjenjima aktivnosti ^{14}C u okolišu Nuklearne elektrane Krško tijekom 2022. godine, LNA-8/2023, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 8. 2. 2023



- [22] I. Krajcar Bronić, Izvješće o mjerenjima aktivnosti ^{14}C u Savi i ribi tijekom 2023. godine, LNA-2/2024, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 16. 1. 2024
- [23] I. Krajcar Bronić, Ispitni izvještaj o relativnoj aktivnosti ^{14}C /starosti – WMT2 kvartalni uzorci 2023, Izveštaj broj 017-1028/1/2024, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 19. 2. 2024
- [24] I. Krajcar Bronić, Izvještaj o koncentraciji aktivnosti tricija ^3H (OBT) u biljnom materialu – 2023, LNA-4/2024, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 28. 1. 2024
- [25] Radiation Protection No 152, EU Scientific Seminar 2007, "Emerging Issues on Tritium and Low Energy Beta Emitters", Proceedings of a scientific seminar held in Luxembourg on 13 November 2007
- [26] Cinelli, G., De Cort, M. & Tollefsen, T. (Eds.), European Atlas of Natural Radiation, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019
- [27] Izpostavitve prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NE Krško v reko Savo, IJS-DP-8801 (2003)
- [28] Izpostavitve referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo – Nova referenčna lokacija, IJS-DP-10114 (2009)
- [29] Samo Škrlec, Hidroelektrarne na Spodnji Savi, d.o.o., sporočilo po elektronski pošti, 9. 4. 2020
- [30] Dose calculation and dilution modelling of run-of-river Brežice hydro plant accumulation št. TO.RZ-5/2020
- [31] M. Četina, Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer, Ljubljana, 1992
- [32] M. Četina, R. Rajar, A. Širca, D. Tagar, PCFLOW3D, User's Manual, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin, Ljubljana, 1999
- [33] J. Kovšca, 2007, Dopolnitve modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov., diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer, Ljubljana, 2007
- [34] B. Zorko, R. Rajar, G. Omahen, A. Širca, M. Četina, V. Hatič, Program za računanje efektivnih doz zaradi tekočinskih izpustov iz NEK št. 164/2022
- [35] M. Mihalina, Vpliv tekočinskih izpustov NE Krško na najbolj izpostavljeno skupino, Poročilo številka NEK ESD-TR-05/08, Rev. 0, maj 2008
- [36] HE Brežice / Sanacija vplivov na NEK - Verifikacija in morebitne analize povratnih tokov v profilu NEK po vzpostavitvi zaježitve HE Brežice, IBE in FGG, april 2019
- [37] PARTNER, d.o.o., Poročilo o izvedenih batimetričnih meritvah pretočne akumulacije HE Brežice, april 2021
- [38] R. Rajar, Verifikacija numeričnega modela PCFLOW3D, julij 2021
- [39] ICRP Publication 124, Protection of the Environment under Different Exposure Situations, Ann. ICRP 43(1), 2014
- [40] ICRP Publication 101a, Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process, Ann. ICRP 36 (3), 2006
- [41] IAEA Safety Guide 427, Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities, Draft safety guide DS427, 2016
- [42] UNITED NATIONS, Sources and effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, (UNSCEAR), YN, New York, 2000



- [43] COUNCIL DIRECTIVE 2013/51/EURATOM of 22 October 2013 laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption, L 296/12, Official Journal of the European Union
- [44] ISO/IEC Guide 98-3 2008 - Uncertainty of measurement -- Part 3, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM, 1995)
- [45] ISO 4037-3:2019 - Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence
- [46] C. Kunz, Carbon-14 discharges at three light-water reactors, *Health Physics*, 49 (1985), 25–35
- [47] Delavnica z naslovom C-14 u okolišu (C-14 v okolju), organizirana na IJS dne 9. 12. 2015, predavateljci: I. Krajcar Bronić in J. Barešić
- [48] T. Petrovič, Določitev referenčnih aktivnosti radionuklida K-40 v različnih vzorcih, magistrsko delo, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana, avgust 2010
- [49] A. Kovačič et al., Strokovne podlage za razglasitev ogroženosti podzemne vode v Republiki Sloveniji, 2002
- [50] <https://www.kostak.si/images/1-2022/voda2021.pdf>
- [51] <https://www.komunala-brezice.si/datoteke/navigacija/zu7qah12-porocilo-o-kakovosti-2021.pdf>
- [52] https://www.vokasnaga.si/sites/www.jhl.si/files/dokumenti/voka_snaga_letno_porocilo_2021_s_po dpisi_010422.pdf
- [53] R. Jamnik, *Matematična statistika*, Državna založba Slovenije, 1980
- [54] M. Yoshimori, Production and behavior of beryllium 7 radionuclide in the upper atmosphere, *Advances in Space Research*, 36 (2005), 922–926
- [55] P. Vreča, I. Krajcar Bronić, A. Leis, M. Demšar, Isotopic composition of precipitation at the station Ljubljana (Reaktor), Slovenia – period 2007–2010, *GEOLOGIJA* 57/2, 217–230, Ljubljana 2014, doi:10.5474/geologija.2014.019
- [56] B. Breznik, M. Božnar, P. Mlakar, G. Tinarelli, Dose projection using dispersion models, 8th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 14–17 October 2002, Sofia, Bulgaria, *Int. J. Environ. Pollut.*, 20 (2004), 278–285
- [57] P. Mlakar, M. Božnar, B. Breznik, A. Kovač, Modelling of air pollutant releases from the Krško Nuclear Power Plant, 4th Regional Meeting Nuclear Energy in Central Europe, Bled, Slovenia, 7–10 September 1997. Proceedings. Ljubljana: Nuclear Society of Slovenia, 1997, 137–144
- [58] M. Božnar, P. Mlakar, B. Breznik, Advanced modeling of potential air pollution dispersion around Krško NPP using 3D wind field reconstruction and Lagrangean particle model, International Conference Nuclear Energy for New Europe 2003, 8–11 September 2003, Portorož, Slovenija. Proceedings. Ljubljana: Nuclear Society of Slovenia, 2003, str. 602
- [59] M. Božnar, P. Mlakar, B. Breznik, G. Tinarelli, Use of Lagrangean particle model for air pollution dispersion for radioactive risk assessment in complex terrain, Sixth Annual Meeting of the European Meteorological Society (EMS) and Sixth European Conference on Applied Climatology (ECAC) : Ljubljana, Slovenia, 4–8 September 2006, (EMS annual meeting abstracts, Volume 3). Ljubljana: European Meteorological Society, Agencija RS za okolje, 2006
- [60] B. Zorko, M. Korun, J. C. M. Canadas, V. Nicoulaud Gouin, P. Chyly, A. M. Blixt Buhr, C. Lager, K. Aquilonius and P. Krajewski, Systematic influences of gamma-ray spectrometry data near the decision treshold for radioactivity measurements in the environment, *Journal of Environmental Radioactivity*, 158–159 (2016), 119–128
- [61] S. Širca, *Verjetnost v fiziki*, DMFA – založništvo, Ljubljana 2016



- [62] European Commission recommendation on standardized information on radioactive airborne and liquid discharges into the environment from nuclear power reactors and reprocessing plants in normal operation. Euratom Off. J. Eur. Union., 2004, pp L2:32
- [63] International Atomic Energy Agency, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, IAEA Safety Reports Series No. 19, Dunaj, 2001
- [64] Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom)
- [65] S. Stoulos et al., Post-Chernobyl Cs-137 in the atmosphere of Thessaloniki: a consequence of the financial crisis in Greece, *Journal of Environmental Radioactivity*, 128 (2014), 68–74
- [66] Povprečna mesečna koncentracija delcev PM₁₀ v letu 2013, ARSO, januar 2014, http://www.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/podatki/PM10_dec013_slo.pdf
- [67] Bossew, P & Gering, F & Petermann, Eric & Hamburger, T & Katzlberger, Christian & Hernández Ceballos, Miguel Ángel & De Cort, Marc & Gorzkiewicz, Krzysztof & Kierepko, Renata & Mietelski, J. (2019). An episode of Ru-106 in air over Europe, September–October 2017 – Geographical distribution of inhalation dose over Europe. *Journal of Environmental Radioactivity*. 205-206. 79-92. 10.1016/j.jenvrad.2019.05.004.
- [68] A. Volčanšek, komunikacija po elektronski pošti dne 3. 4. 2018
- [69] Implied doses to the population of the EU arising from reported discharges from EU nuclear power stations and reprocessing sites in the years 1997 to 2004, *Radiation Protection* 153, European Commission, Bruselj, 2008
- [70] B. Zorko, M. Korun, B. Črnič, B. Vodenik, S. Gobec, Influence of solar activity on ambient dose equivalent H*(10) measured with thermoluminescent dosimeters in Slovenia, *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 72 (2021) 23–28, doi:10.2478/aiht-2021-72-3475
- [71] A. Likar, T. Vidmar, B. Pucelj, Monte Carlo Determination of Gamma-ray Dose Rate with the GEANT System, *Health Physics*, 75 (1998), 165–169
- [72] Matjaž Korun, osebno sporočilo, 2003
- [73] B. Zorko, S. Miljanić, B. Vekić, M. Štuhec, S. Gobec, M. Ranogajec - Komor, Intercomparison of dosimetry systems based on CaF₂: Mn TL-detectors, *Radiat. Protect. Dosim.*, 119 (2006), 300–305
- [74] S. Miljanić, Ž. Knežević, M. Štuhec, M. Ranogajec - Komor, K. Krpan, B. Vekić, Energy Dependence of New Thermoluminescent Detectors in Terms of Hp(10) Values, *Radiat. Protect. Dosim.*, 106 (2003), 253–256
- [75] T. Sato, Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes, *PLOS ONE*, 11(8): e0160390 (2016)
- [76] T. Sato, Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS, *PLOS ONE*, 10(12): e0144679. (2015)
- [77] Program EXPACS, <http://phits.jaea.go.jp/expacs/>
- [78] FRMAC, Assessment manual Tables, Charts, Worksheets, Glossary, references, Volume 2, SAND2003-1072P, Table 3.5
- [79] S. Ehlken, G. Kirchner, Environmental process affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *Journal of environmental radioactivity*, 58 (2002), 97–112
- [80] F. W. Whicker, Radionuclide transport processes in terrestrial ecosystems. *Radiation research*, 94 (1983), 135–150
- [81] M. S. Yim, F. Caron, Life cycle and management of carbon-14 from nuclear power generation, *Prog. Nucl. Energy*, 48 (2006), 2–36, doi: 10.1016/j.pnucene.2005.04.002
- [82] R. Krištof, S. Košenina, B. Zorko, J. Kožar Logar, Tritium in organic matter around Krško Nuclear Power Plant, *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 314 (2017), 675–679, doi: 10.1007/s10967-017-5454-0



- [83] P. Zakrajšek, Vsebnost kovin in radionuklidov v gobah na izbranih področjih v Sloveniji, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta, Biotehniška fakulteta, 2014
- [84] H. Yang, P. G. Appleby, Use of lead-210 as a novel tracer for lead (Pb) sources in plants, *Sci. Rep.*, 6 (2016) 1, 21707 doi: 10.1038/srep21707
- [85] M. Gregorič, U. Blaznik, N. Delfar, M. Zaletel, D. Lavtar, B. Koroušič Seljak, P. Golja, K. Zdešar Kotnik, I. Pravst, N. Fidler Mis, S. Kostanjevec, M. Pajnkihar, T. Poklar Vatovec, A. Hočevar Grom, Slovenian national food consumption survey in adolescents, adults and elderly, National Institute of Public Health (NIJZ), EFSA supporting publication 2019:EN-1729, 2019, doi:10.2903/sp.efsa.2019.EN-1729
- [86] U. Blaznik, M. Gregorič, N. Delfar, M. Zaletel, D. Lavtar, B. Koroušič Seljak, N. Fidler Mis, P. Golja, K. Zdešar Kotnik, I. Pravst, A. Hočevar Grom, Slovenian national food consumption survey on children (infants and toddlers), National Institute of Public Health (NIJZ), EFSA supporting publication 2019:EN-1728, 2019, doi:10.2903/sp.efsa.2019.EN-1728
- [87] European Commission, Radiation Protection 106, Technical recommendations on measurements of external environmental gamma radiation doses, A report of EURADOS Working Group 12, EURADOS report 1999
- [88] <https://www.r-project.org/>
- [89] <https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-14>
- [90] ARSO podatki, <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>, 2024
- [91] Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, Državna pregledna karta Republike Slovenije DPK250 1: 250000 – 2005
- [92] J. F. Diehl, Radioactivity in food, *Encycl. Food Sci. Nutr.*, Academic Press, 2003, 4903–4911, doi:10.1016/b0-12-227055-x/00997-4
- [93] Program za računanje efektivnih doz zaradi tekočinskih izpustov iz NEK, verzija 3.0, IJS 9/2023
- [94] ICRP Publication 108, Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants, *Ann. ICRP* 38 (4-6), 2008

