

NADZOR RADIOAKTIVNOSTI V OKOLICI NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

Poročilo za leto 2022



Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska

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 2022, IJS-DP-14321

Izvajalci meritev	P-3 / P-80
Letno poročilo	P-4 / P-80
Uvod in upravne podlage	P-5 / P-80
Izvleček	P-9 / P-80
Summary	P-39 / P-80
Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev	P-71 / P-80

POGLAVJE

Poročilo

Povzetek

Izvleček in angleški prevod izvlečka

Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev

AVTORJI

mag. Denis Glavič - Cindro
doc. dr. Benjamin Zorko

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

doc. dr. Benjamin Zorko

mag. Denis Glavič – Cindro

Ocena izpostavljenosti prebivalstva in biote zaradi nadzorovanih tekočih in atmosferskih izpustov v okolje iz Nuklearne elektrarne Krško

ISBN 978-961-264-267-9

Odgovorni za izdajo: doc. dr. Benjamin Zorko

Urednika: doc. dr. Benjamin Zorko in mag. Denis Glavič - Cindro

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

Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi

Radioaktivnost v usedih

Zrak

Zunanje sevanje

Radionuklidi v hrani

AVTORJI

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

dr. Jasmina Kožar Logar, IJS

dr. Toni Petrovič, IJS

dr. Marko Giacomelli, ZVD

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

prof. dr. Katarina Vogel Mikuš, BF

Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320

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

Tabele interkomparacijskih rezultatov

Mednarodne primerjalne meritve izvajalcev

M-103 / M-128

Poročilo Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320 je na priloženi zgoščenki.

Vzdrževanje pripravljenosti izrednega monitoringa radioaktivnosti

Redna letna obhoda okolice NEK v letu 2022 sta bila izvedena 6. 6.–9. 6. 2022 in 12. 9.–14. 9. 2022.

Poročilo o obhodu mobilnih enot ZVD in IJS v okolici NEK – vzdrževanje pripravljenosti za primer izrednega dogodka, LMSAR-39/2022-GO, 27. 6. 2022

ROMENЕК 2/22, Mobilni radiološki laboratorij, Poročilo o meritvah po programu vzdrževanja pripravljenosti za primer izrednega dogodka v NEK, IJS-DP-14168, oktober 2022

Obe poročili o vzdrževanju pripravljenosti za primer izrednega dogodka sta na priloženem USB ključku.

NADZOR RADIOAKTIVNOSTI V OKOLICI NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

Poročilo za leto 2022



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 2022

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 2022, IJS-DP-14320*, ki je na priloženi zgoščenki.

Urednica: mag. Denis Glavič - Cindro

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, mag. Denis Glavič - Cindro, arhiv NEK

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

Založil: Institut "Jožef Stefan"

Prva izdaja: april 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-14321

Redakcija je bila končana aprila 2023.

Vse pravice pridržane. Noben del poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14321* ter obeh prilog k poročilu: *Ocena izpostavljenosti prebivalstva in biote zaradi nadzorovanih tekočih in atmosferskih izpustov v okolje iz Nuklearne elektrarne Krško in Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320* 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-14321

april 2023

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 zunanega 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 2022 za atmosferske emisije *efektivno dozo* $9,9 \text{ E-5 mSv}$ na leto, kar velja za ograjo NEK in okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja, ter $2,3 \text{ E-5 mSv}$ na leto za tekočinske emisije. V letu 2022 so bili tako vsi sevalni učinki NEK na posameznika iz prebivalstva v okolici ocenjeni na manj kot $1,2 \text{ E-4 mSv}$ na leto, kar je 0,24 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in dalje ($0,05 \text{ mSv}$; 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 0,005 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja v okolici NEK. Ocena velja okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja.***

TITLE:

Off-site radiological monitoring of the Krško Nuclear Power Plant

IJS-DP-14321

April 2023

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 by different contamination media and exposure pathways in the form of assessed effective doses. Conservatively estimated effective dose received by adult representative person as the result of Krško NPP emissions in the year 2022 gives a value of the *effective dose* of 9.9 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 2.3 E-5 mSv per year for liquid discharges. Thus, in 2022, the radiation effects of the Krško NPP on the representative person in the immediate surroundings were estimated at less than 1.2 E-4 mSv per year, representing 0.24 % 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 0.005 % 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.***



AVTORJI IN RECENZENTI POROČILA

	Ime in priimek	Datum in podpis
Povzetek in izvleček	prof. dr. Tomaž Žagar doc. dr. Benjamin Zorko	
Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev	mag. Denis Glavič – Cindro	
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., N. Čipanovska, mag. biol. biokem. fiziol., 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)

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, mag. med. fiz., M. Škrlep, mag. prof. fiz.

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, dipl. inž., dr. Ž. Grahek, M. Ivković, mag. kem., G. Karanović, dipl. inž., T. Kardum, 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. Trputeć

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

Nosilec projekta za NE Krško: mag. Borut Breznik

Izvajalci v NEK:

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

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

Izvajalci v MEIS:

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



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 *Ocena izpostavljenosti prebivalstva in biote zaradi nadzorovanih tekočih in atmosferskih izpustov v okolje iz Nuklearne elektrarne Krško*, kjer so ocene doz in drugi parametri obravnavani podrobno. Za potrebe poročila pa v strnjeni obliki podajamo ugotovitve za leto 2022.

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. 11, poglavje 3.12, strani 43–62.

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 in vodi. 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 prejemajo ali bi lahko prejeli 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 2022;
- mesečni izračuni zračnih razredčitvenih faktorjev Agencije Republike Slovenije za okolje za okolico NEK v letu 2022;
- mesečni izračuni zračnih razredčitvenih in depozicijskih faktorjev ter koeficientov sevanja iz oblaka MEIS storitve za okolje, d. o. o., za okolico NEK v letu 2022;
- 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 ugotavljamo vnos 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 sprotnem spremljanju zunanjega sevanja (MFM-203), 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 črpaljšč. 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 pooblaščenata 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 (URSVJ) 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 pooblaščen 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 1864-5/2018-4 z dne 16. 4. 2018;
- 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.

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 se je pooblastilo razširilo 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 (URSVJ) 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 termoluminiscenčno 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.

Na Institutu Ruđer Bošković ima Laboratorij za radioekologijo 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 naštetih virov prejmejo prebivalci v okolici jedrske elektrarne Krško.

V letu 2022 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 v letu 2022 je določeno naravno ionizirajoče sevanje v okolici NEK 2,35 mSv na leto.

Prispevek vseh sevalnih učinkov NEK na prebivalce v okolici je 0,00012 mSv na leto. Ta prispevek je deset tisočkrat 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 0,24 % avtorizirane mejne letne doze. Avtorizirana letna doza za prebivalce je določena na 0,05 mSv na leto, kar je 5 % maksimalne splošno dovoljene dozne omejitve za vse prebivalce v Sloveniji.

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

Tabela A: Zbirna tabela letnih izpostavitv prebivalstva v okolici NEK za leto 2022 je povzetek podatkov, ki so obširneje predstavljeni v Tabeli E.

Vir	Prenosna pot	Letna efektivna doza (mSv)
naravno sevanje	– sevanje gama in neposredno kozmično sevanje	0,74
	– zaužitje naravnih radionuklidov (K, U, Th)	0,27
	– vdihavanje naravnih radionuklidov in potomcev	1,34
	Skupaj naravno sevanje v okolici NEK	2,35
NEK	– sevanje gama in neposredno sevanje iz objektov NEK	0,000000
	– kumulativni prispevek atmosferskih izpustov	0,000099
	– kumulativni prispevek tekočinskih izpustov	0,000023
	Skupaj učinki NEK*	0,000122
ostalo	– černobilska nesreča, vojaški jedrski poskusi, ...	0,032
	Skupaj globalno onesnaženje	0,032

* 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.



Vsi sevalni učinki NEK na prebivalstvo v okolici so zelo majhni, manj kot en procent 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 zgledno skrbijo za nadzor in omejevanje izpustov.

Pri tem je treba poudariti, da se za izračun ali oceno sevalne obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta uporablja tako imenovana referenčna oseba. Referenčna oseba za posamezno prenosno pot je teoretičen 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 konservativna zgornja ocena letne efektivne doze.

Tako lahko sklenemo, da NEK proizvaja čisto, učinkovito in nizkoogljično energijo, ki je bistvena za zadovoljevanje prihodnjih energetskih 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 njegova uporaba v medicini. K ostalim antropogenim virom, ki smo jim izpostavljeni vsi prebivalci na svetu, štejata še učinka preostale črnobilske kontaminacije in kontaminacije okolja zaradi atmosferskih jedrskih poskusov, ki običajno predstavljata manj kot procent naravnega ozadja. Izpostavitve prebivalstva ionizirajočemu sevanju zaradi medicinskih diagnostičnih 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 [5], [11]. 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 pooblaščen izvajalci nadzora*.

Za računanje učinkovite doze zaradi učinkov tekočinskih izpustov iz NEK je bil pri obdelavi meritev iz leta 2022 vpeljan nov model, ki temelji na teoretični napovedi mešanja in redčenja z uporabo tridimenzionalnega hidrodinamičnega transportnega modela PCFLOW3D ([29], [30], [31], [36]). V okviru projektne naloge je bila izdelana tudi spletna platforma DOSENEK [32], po kateri se vnaša merske in druge podatke in se na podlagi računskih postopkov izračuna učinkovita doza za tri različne starostne skupine v pretočni akumulaciji HE Brežice. Pod jezom HE Brežice se učinkovita doza za referenčno osebo oceni iz rezultatov analiz okoljskih vzorcev.

To poročilo podaja rezultate nadzora radioaktivnosti, ki so ga NEK kot zavezanec in pooblaščen izvajalec nadzora radioaktivnosti opravili v letu 2022. Sumarni rezultati meritev radioaktivnosti umetnih in naravnih radionuklidov v različnih nadzorovanih medijih in ekspozicijskih prenosnih poteh so podani z ocenami učinkovite doze, ki so predstavljene v poglavju "*OCENA UČINKOV*" (tabela E). Ocena doz sledi metodologiji ICRP in IAEA [37], [38], [39]. V letu 2022 so bili vsi sevalni učinki NEK na prebivalstvo¹ v okolici ocenjeni na manj kot $1,2 \text{ E-4 mSv na leto}$, kar je 0,24 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in navzven. Za atmosferske emisije je bila ocenjena učinkovita doza $1,0 \text{ E-4 mSv na leto}$, kar velja za ograjo NEK in okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja. Za tekočinske emisije za referenčno osebo je bila ocenjena učinkovita doza $2,3 \text{ E-5 mSv na leto}$. K sevalnim učinkom največ prispeva zaužitje C-14 v hrani, in sicer $8,0 \text{ E-5 mSv na leto}$.

Ugotovimo lahko, da so sevalni učinki NEK v primerjavi s tistimi iz globalnega onesnaženja za več redov velikosti nižji. Še več, ocenjena vrednost sevalnih učinkov (letne učinkovite doze) NEK na referenčno osebo ob ograji NEK in okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja je približno 0,005 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja. Izvleček povzema monografijo *Ocena izpostavljenosti prebivalstva in biote zaradi nadzorovanih tekočih in atmosferskih izpustov v okolje iz Nuklearne elektrarne Krško*, ki je samostojna priloga poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2022*, interna oznaka 9/2023, Ljubljana, april 2023.

¹ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejema ali bi lahko prejeli najvišje doze.



ZNAČILNOSTI VZORČENJA IN MERITEV VZORCEV IZ OKOLJA

Vzorčenje in meritve so v letu 2022 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. Zaradi gradnje HE Brežice je bil 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 jezo 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 jezo HE Brežice, v Brežicah, Jesenicah na Dolenjskem in Podsusedu pri Zagrebu (HR, okrog 30 km nizvodno od NEK) za kratkožive radionuklide;
- 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 jezo NEK, Pesje, na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice, nad jezo 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

- 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);
- vzorčenje joda $I-131$ se opravlja s posebnimi črpalkami in filtri na istih lokacijah, kjer poteka vzorčenje aerosolov (razen v Dobovi);
- vzorčenje za specifično meritev $Sr-90/Sr-89$ je v Stari vasi;
- meritve emisij se opravijo na glavnem ventilacijskem izpustu NEK, pri čemer se odvijajo vzorci za meritev joda, tritija ($H-3$), ogljika ($C-14$), aerosolov ter opravljajo meritve žlahtnih plinov;
- zbiranje vzorcev zračnega ogljika $C-14$ v CO_2 je neprekinjeno potekalo na dveh mestih na ograji NEK, ki je v izključitvenem območju, v letu 2022 je bilo skupno zbranih štirinajst vzorcev. Kontrolne meritve so potekale v Zagrebu, R Hrvatska.

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 CO_2 poteka z uporabo tekočinskoscintilacijskega števca po pretvorbi CO_2 v benzen.

5) Zunanja izpostavljenost sevanju

Zunanje sevanje

- doza zunanjega sevanja (sevanje gama in ionizirajoča komponenta kozmičnega sevanja) 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;
- doza zunanjega sevanja se meri s sedmimi TL-dozimetri na zahodni ograji NEK v bližini skladišča za suho skladiščenje – predobratovalni monitoring;
- vzporedno potekajo meritve s TL-dozimetri na 50 lokacijah po državi [17], [18];
- v sklopu mreže zgodnjega obveščanja je v okolici NEK postavljenih 14 merilnikov sevanja MFM, ki delujejo neprekinjeno; poleg teh je v mrežo zgodnjega obveščanja v Sloveniji vključenih še dodatnih 53 merilnikov.

Za merjenje okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ IJS uporablja dozimetre tipa TLD-IJS-05 (iz $CaF_2:Mn$). Meritve $H^*(10)$ na 10 lokacijah na Hrvaškem so opravljene s termoluminiscenčnimi ($LiF:Mg,Cu,P$, MCP-N, $CaF_2:Mn$), OSL $Al_2O_3:C$ in radiofotoluminiscenčnimi (RPL) dozimetri. Podatke iz merilnikov mreže zgodnjega obveščanja zbira in posreduje URSJV.

Zemlja

- vzorci 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.



6) Hrana

- a) Odzemna mesta vzorcev hrane v letu 2022, 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), Spodnji Stari Grad (meso, jajca), Žadovinec (zelenjava), Trnje (zelenjava), Leskovec (meso, sadje), Dolenje Skopice (mleko, zelenjava), Dolenja vas (zelenjava), Gornji Lenart (jajca), Libna (meso). V letu 2022 je bilo v okolici NEK vzorčenih 30 vrst živil, skupno 75 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 2022 dvakrat (julij in september) na 15 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 2022, IJS-DP-14320*, 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 [57]. 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 koren timeričnega povprečja. Definicije teh izrazov so v delovnem poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320*. Tako definirane cenilke so združljive s frekventističnim pristopom [59], le da se namesto aposteriorne negotovosti tam uporablja izraz raztresenost povprečja.

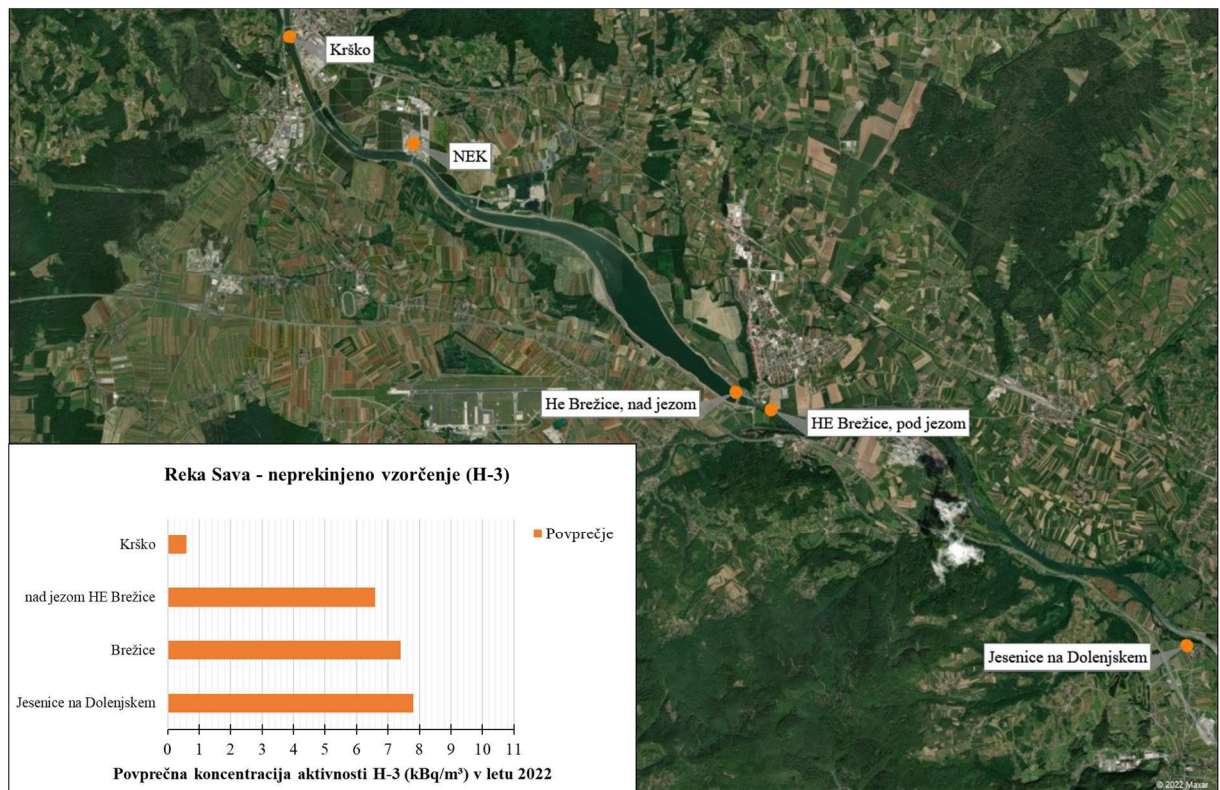
Kadar se poroča meja detekcije (največkrat pri Pb-210, H-3, Sr-90, itd.), se na podlagi priporočila Evropske komisije (*European Commission recommendation on standardized information on radioactive airborne and liquid discharges into the environment from nuclear power reactors and reprocessing plants in normal operation*, Euratom Off. J. Eur. Union. 2004; str. L2:32; odstavek 6 in 7 [60]) 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)

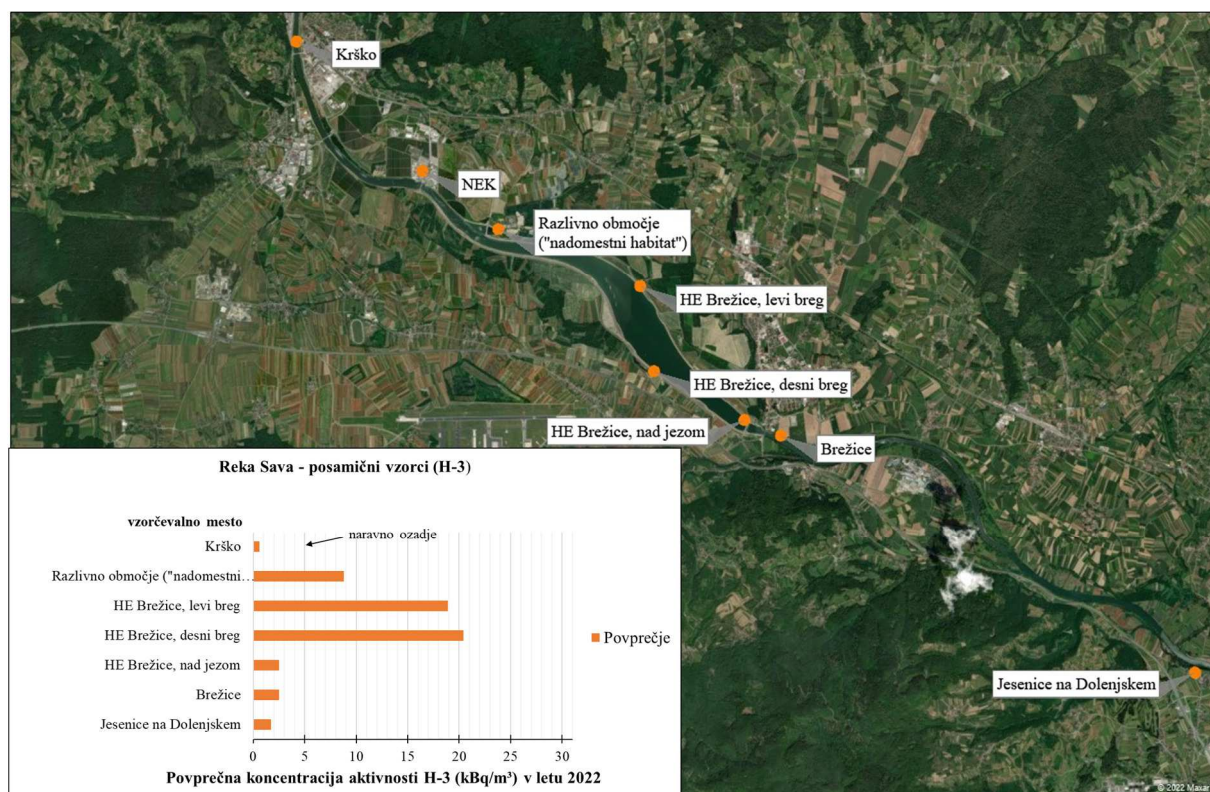
Tritij ($H-3$) je naraven kozmogen radionuklid. Ker nastaja v zgornjih plasteh atmosfere, je prisoten v deževnici in vodotokih. Naravna koncentracija aktivnosti tritija v deževnici je od $0,3 \text{ kBq/m}^3$ do $1,2 \text{ kBq/m}^3$. Ozadje tritija v reki Savi nad Krškim je $0,6 \text{ kBq/m}^3$. Tritij 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 2022 je prikazan na sliki I1. Večmesečno povprečje koncentracij aktivnosti $H-3$ (od julija 2017) v Brežicah je $2,2 \text{ kBq/m}^3$, na vzorčevalni postaji nad jezo HE Brežice pa $2,6 \text{ kBq/m}^3$. Zaradi pritokov Krke in Sotle, se Sava dodatno razredči, zato je večmesečno povprečje v Jesenicah na Dolenjskem $1,9 \text{ kBq/m}^3$.



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 2022.

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 jezo 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 2022. Opazimo, da so koncentracije aktivnosti $H-3$ v reki Savi, vzorčene na levi in desni strani najširšega dela akumulacije, v okviru merskih negotovosti med seboj primerljive. 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 zaježitvi nad jezo HE Brežice [27]. 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 2022 je bil vzorčen radioaktiven ogljik ($C-14$) v izpustih iz odpadnih merilnih rezervoarjev NEK. Prispevek $C-14$ smo ocenili iz meritev v četrtnetnih vzorcih WMT, ki jih je opravil IRB. Četrtnetne aktivnosti $C-14$ so bile od $0,017 \text{ GBq}$ v prvem četrtnetju do $0,065 \text{ GBq}$ v drugem četrtnetju. Četrtnetni vzorci so sestavljeni iz posamičnih izpustov. Skupno letno izpuščeno aktivnost $C-14$ $0,14 \text{ GBq}$ smo izračunali kot vsoto četrtnetnih vrednosti. Izpusti so za velikostni red nižji, kot je dolgoletno povprečje ($1,5 \text{ GBq}$) od leta 2013.



Slika I2: Pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v letu 2022 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 0,6 kBq/m³.

C-14 je bil merjen tudi v savski vodi in v ribah [21]. Na lokacijah na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice so bili odvzeti sestavljeni četrletni vzorci. Povprečje izmerjenih koncentracij aktivnosti na levem bregu v pretočni akumulaciji je bilo 10 Bq/m³, na desnem pa 11 Bq/m³. Od povprečja se odmikajo izmerjene vrednosti v tretjem četrletju. Izmerjena koncentracija aktivnosti C-14 v Savi na levem bregu je bila 11 Bq/m³, na desnem pa 16 Bq/m³, kar lahko kaže na učinek delovanja NEK. Povprečne koncentracije aktivnosti so sicer nižje od trenutnih atmosferskih aktivnosti (trenutna splošna atmosferska aktivnost C-14 brez učinkov NEK je 226 Bq na kilogram ogljika). V primerjavi s prejšnjimi leti so specifične aktivnosti C-14 v ribah v letu 2022 v okviru negotovosti meritev enake in so prav tako nižje kot trenutna atmosferska aktivnost C-14.

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 I-131 v tem letu ni bil zaznan, zato njegovo prisotnost v reki Savi pripisujemo izpustom iz bolnišnic (Ljubljana, Celje).

V letu 2022 je koncentracija aktivnosti I-131 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 7,2 Bq/m³. Najvišje povprečje v Posavju je bilo v letu 2022 na referenčnem mestu Krško, in sicer 4,1 Bq/m³.

Če primerjamo rezultate meritev z ločenim nadzorom v življenjskem okolju v RS [18], so bile povprečne koncentracije v reki Savi od Krškega do Jesenic na Dolenjskem nižje, kot jih izmerimo v Savi v Ljubljani (11–17 Bq/m³). V Savinji so bile koncentracije aktivnosti I-131 do 2 Bq/m³, v Muri in Dravi pa I-131 ni bil detektiran.

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 1,5 MBq, kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo z izpusti v preteklih letih (2012-2021) in nižje kot dolgoletno povprečje 15 MBq od leta 2000. Vsebnost Cs-137 v reki Savi pripisujemo globalni kontaminaciji, saj je izračunani prirastek koncentracije aktivnosti Cs-137 v Brežicah, ob upoštevanju letnih tekočinskih izpustov in povprečnega pretoka Save ter privzetku razredčitvenega razmerja na levem bregu v Brežicah, enak $4,5 \text{ E-4 Bq/m}^3$. Tega prispevka ni mogoče ločiti od nehomogeno porazdeljene globalne kontaminacije.

Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti v filtrirani vodi reke Save je bilo na referenčnem mestu v Krškem $0,28 \text{ Bq/m}^3$, v Jesenicah na Dolenjskem pa $0,07 \text{ Bq/m}^3$. V Brežicah in nad jezom HE Brežice Cs-137 v savski vodi ni bil zaznan v nobenem vzorcu. Večina posamičnih izmerjenih koncentracij aktivnosti filtrirane savske vode je bila pod mejo detekcije aktivnosti. Na levem bregu največje razširitve pretočne akumulacije je bilo povprečje v nefiltrirani vodi $0,59 \text{ Bq/m}^3$, na desnem bregu pa $0,57 \text{ Bq/m}^3$. V nefiltrirani vodi v Jesenicah na Dolenjskem je bilo povprečje vsebnosti Cs-137 $0,35 \text{ Bq/m}^3$.

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 2022 je bila od $0,05 \text{ Bq/m}^3$ v Krki in do $0,8 \text{ Bq/m}^3$ v Muri. V Krki, Soči, Savi pri Ljubljani in Kolpi Cs-137 v letu 2022 ni bil detektiran, ali pa je bil vsaj en rezultat meritve pod mejo kvantifikacije (velika merska negotovost) [18].

Radioaktivni stroncij (Sr-90) je redno izmerjen v tekočinskih izpustih NEK. V letu 2022 je bila skupna izpuščena aktivnost v reko Savo $0,06 \text{ MBq}$, kar je podobno kot v letu 2021 ter nižje kot v letih pred tem. 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 v Brežicah, ob upoštevanju letnih tekočinskih izpustov in povprečnega pretoka Save ter privzetku razredčitvenega razmerja na levem bregu v Brežicah, enak 2 E-5 Bq/m^3 . Tega prispevka ni mogoče ločiti od nehomogeno porazdeljene globalne kontaminacije.

Večina stroncija je raztopljena v vodi. Koncentracija aktivnosti Sr-90 v filtrskem ostanku je bila v vseh vzorcih pod mejo detekcije. Na splošno so koncentracije stroncija v filtrirani rečni vodi od 2 do 3-krat višje kot za cezij. Izjeme so rezultati meritev v rečni vodi v Jesenicah na Dolenjskem, kjer je kvocient obojih tudi do 23. Povprečna koncentracija aktivnosti Sr-90 v filtrirani vodi na referenčnem mestu Krško je bila $1,1 \text{ Bq/m}^3$, nad jezom HE Brežice $1,0 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah $1,1 \text{ Bq/m}^3$ in v Jesenicah na Dolenjskem $1,7 \text{ Bq/m}^3$. Najvišja posamična koncentracija aktivnosti je bila $2,3 \text{ Bq/m}^3$ v Jesenicah na Dolenjskem. 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 četrtletna povprečja od $0,8 \text{ Bq/m}^3$ do $1,1 \text{ Bq/m}^3$. Najvišja posamična izmerjena vrednost je bila na levem in desnem bregu pretočne akumulacije $2,1 \text{ Bq/m}^3$.

Povprečne koncentracije aktivnosti stroncija v drugih rekah po Sloveniji se ne razlikujejo od rezultatov meritev, izmerjenih v Savi v okolici NEK. Povprečna letna koncentracija aktivnosti Sr-90 v reki Muri v letu 2022 je bila $1,7 \text{ Bq/m}^3$, v reki Dravi $1,0 \text{ Bq/m}^3$ in v Savi v Lazah pri Ljubljani $2,1 \text{ Bq/m}^3$ [18]. Enake koncentracije stroncija v vseh slovenskih rekah potrjujejo domnevo, da so izmerjene koncentracije stroncija predvsem posledica globalne kontaminacije in niso posledica izpustov NEK.

Na sliki I3 prikazujemo povprečne specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v obrežnih sedimentih vzvodno in nizvodno od jezov NEK. Vsebnosti obeh radionuklidov v sedimentih pripisujemo globalni kontaminaciji, saj tekočinski izpusti iz NEK prispevajo specifični aktivnosti 9 E-4 Bq/kg za Cs-137 in 3 E-5 Bq/kg za Sr-90 v talnih sedimentih v Brežicah. Prispevka sta zanemarljiva v primerjavi s povprečnima specifičnima aktivnostima $6,0 \text{ Bq/kg}$ za Cs-137 in $0,2 \text{ Bq/kg}$ za Sr-90 v letu 2022 na istem mestu (meritev ZVD).

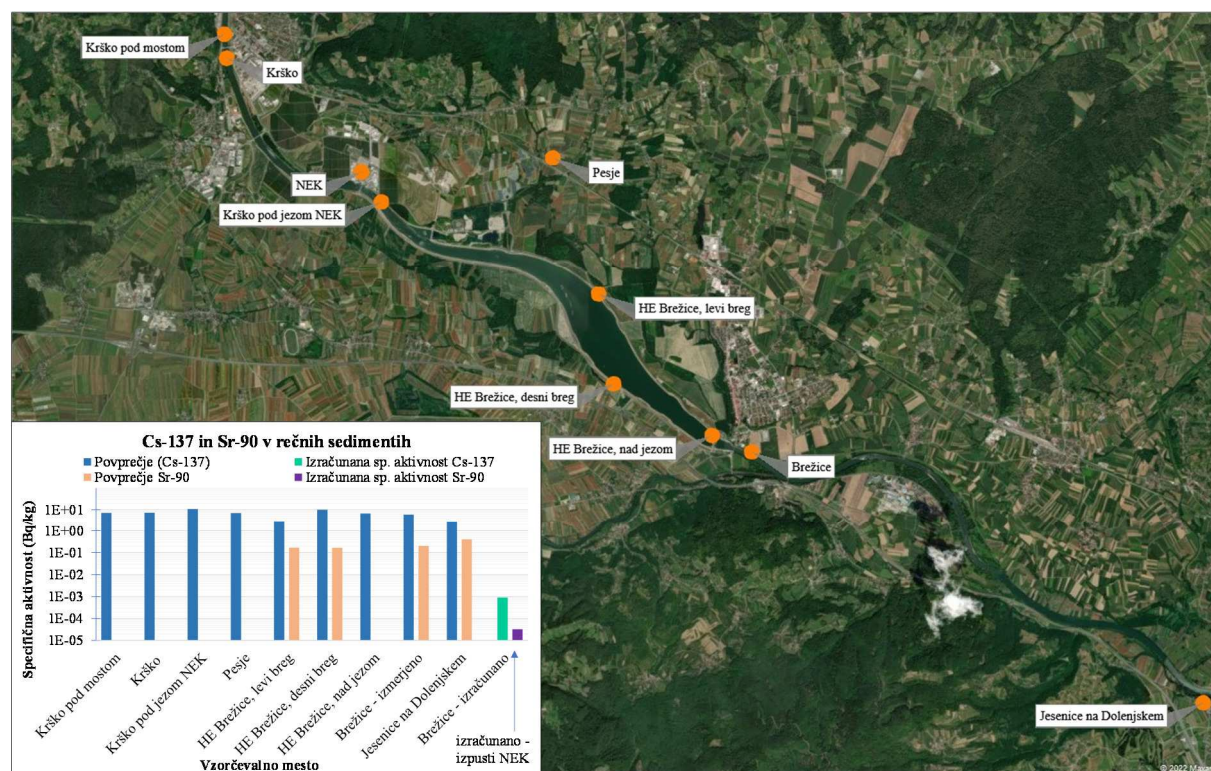
Na sliki I4 prikazujemo povprečne specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v ribah vzvodno in nizvodno od jezov NEK. Aktivnosti pripisujemo globalni kontaminaciji, saj sta prispevka radionuklidov zaradi tekočinskih izpustov iz NEK od štiri do pet velikostnih redov nižja od izmerjenih vrednosti.

Drugi fisijski in aktivacijski produkti (Co-58, Co-60, Mn-54, Ag-110m, Sb-125) se v sledeh redno pojavljajo v tekočinskih izpustih NEK. Skupna aktivnost teh radionuklidov v letu 2022 je bila vsaj šest 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.

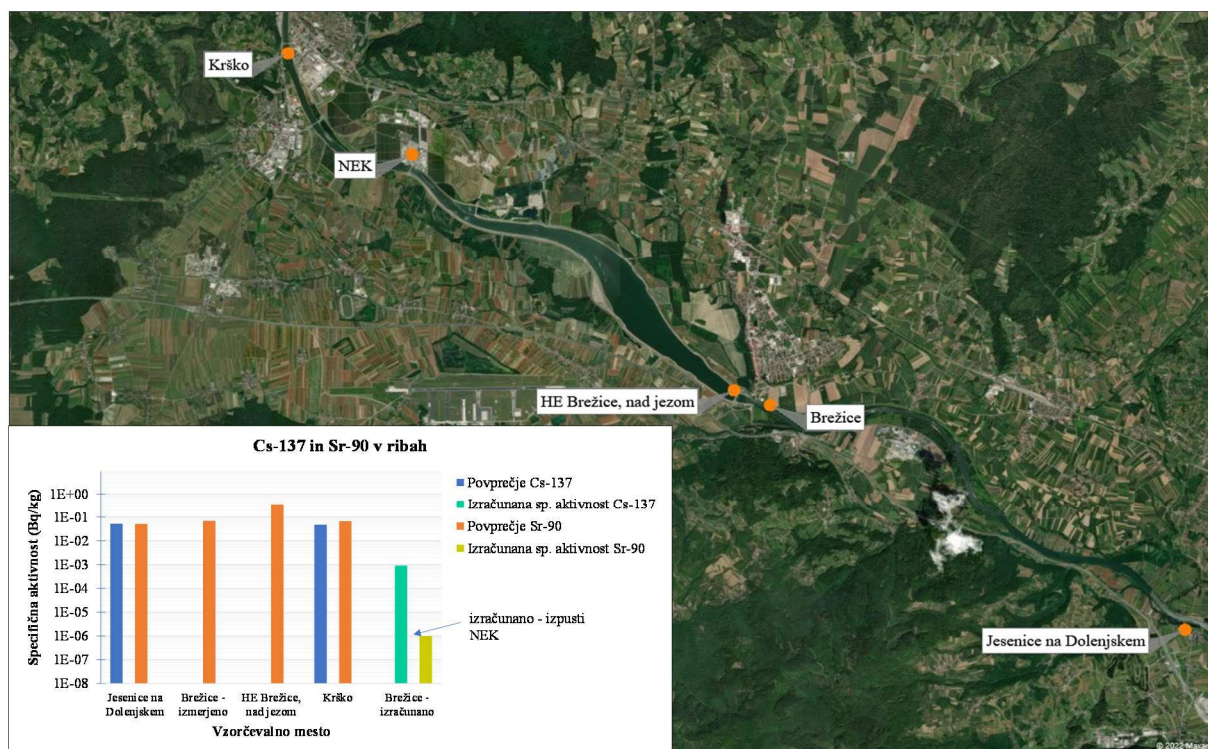
Naravni radionuklidi uranove (U-238, Ra-226 in Pb-210) in torijeve (Ra-228 in Th-228) razpadne vrste so bili redno zaznani v vseh vzorcih vode. V savski vodi so bile na vseh odvzemnih mestih koncentracije aktivnosti U-238 do 8,7 Bq/m³, Ra-226 do 11 Bq/m³, Pb-210 do 41 Bq/m³, Ra-228 do 5,7 Bq/m³, Th-228 do 8,2 Bq/m³ in Be-7 do 300 Bq/m³. Koncentracije aktivnosti naravnih radionuklidov v vodi so tako podobne izmerjenim v rekah po Sloveniji.

V sedimentih so bile na vseh odvzemnih mestih specifične aktivnosti U-238 do 46 Bq/kg (pod jezo NEK), Ra-226 do 55 Bq/kg (pod jezo NEK), Pb-210 do 110 Bq/kg (Krško), Ra-228 do 53 Bq/kg (pod jezo NEK) in Th-228 do 33 Bq/kg (Krško). Povprečne specifične aktivnosti K-40 so bile od 330 Bq/kg (Brežice) do 640 Bq/kg (pod jezo NEK). V sedimentu je bil občasno zaznan Be-7 z razponom od 0 Bq/kg do 140 Bq/kg na vseh lokacijah.

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



Slika I3: Specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v sedimentih v letu 2022. 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 2022. Skala je logaritemska.

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

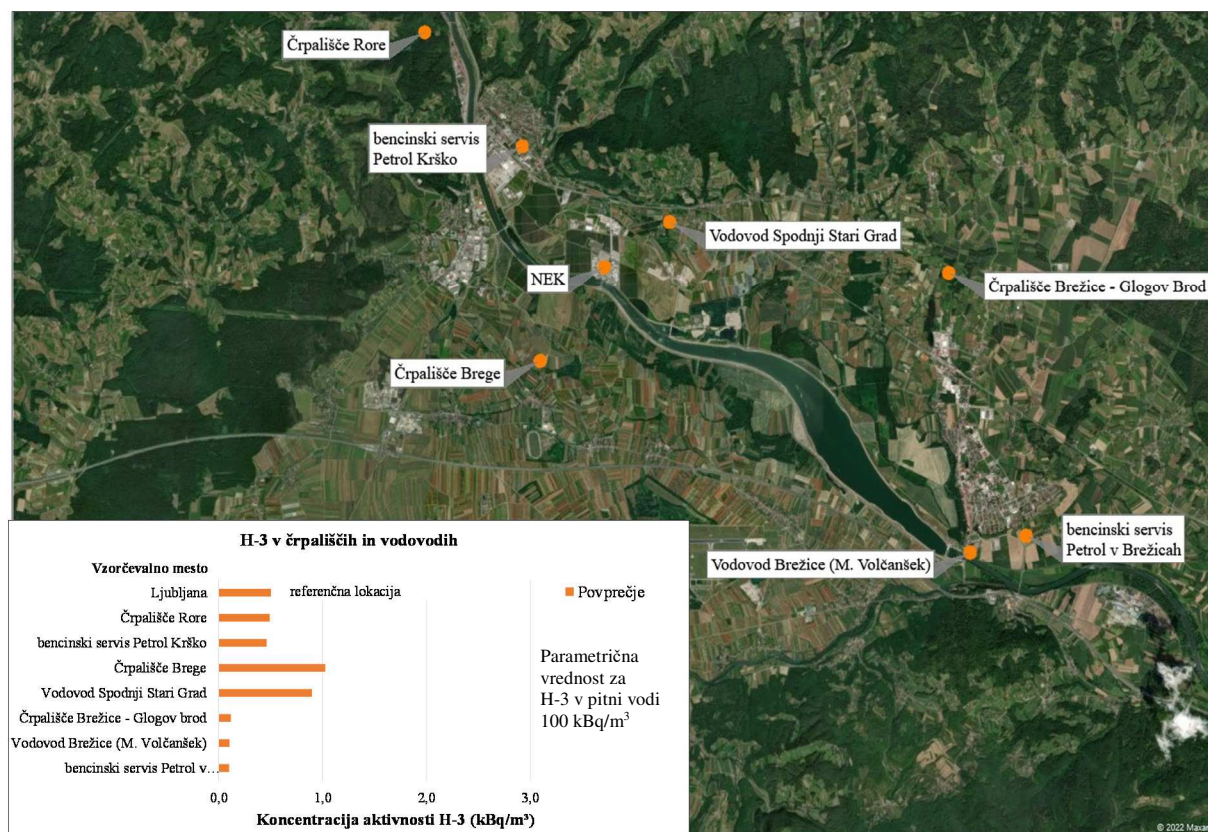
Koncentracija aktivnosti tritija v pitni vodi v okolici NEK je istega velikostnega reda kot drugod po Sloveniji. Vsebnosti tritija na Bregah so najvišje v Sloveniji in so nedvomno posledica učinka NEK, vendar tudi najvišje vrednosti še vedno dosegajo manj kot 2 % parametrične vrednosti² direktive Evropske komisije za pitne vode. Poleg rednih mesečnih odvzemov vode na črpaljščih in vodovodih v občinah Krško in Brežice je bila tudi v letu 2022 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 [19].

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.

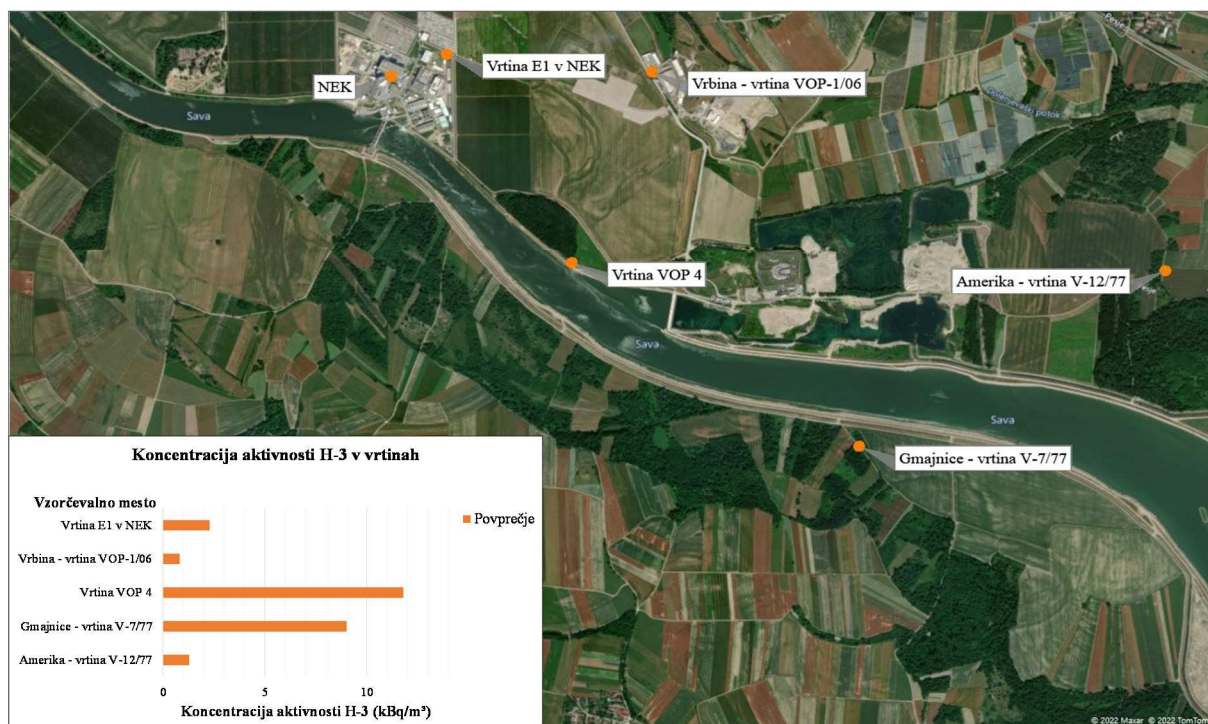
Radionuklida Cs-137 in Sr-90 sta nehomogeno razširjena na naših tleh. V majhnih količinah se pojavljata tudi v izpustih NEK, vendar je njun učinek na podtalnico zanemarljiv in neločljiv od globalne kontaminacije.

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, kjer se vzorčujejo neprekinjeno ali četrtletno. Za primerjavo prikazujemo tudi koncentracijo aktivnosti na referenčni lokaciji (Ljubljana).



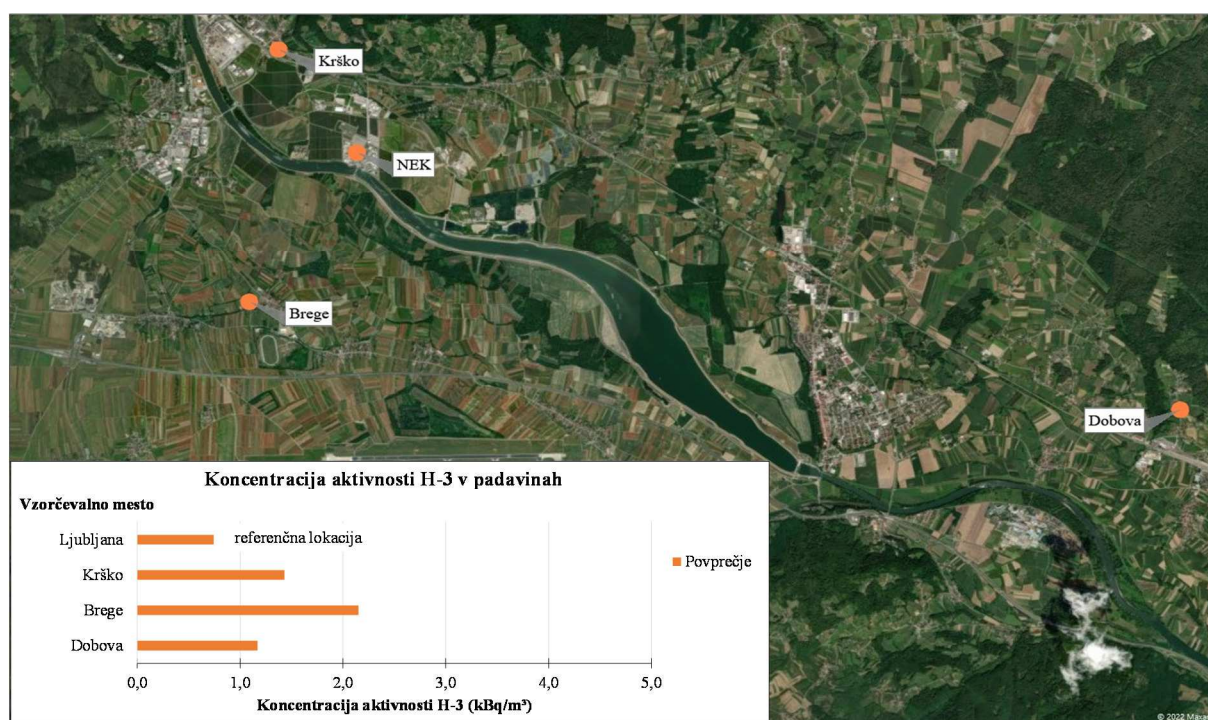
Slika I6: Pregled povprečnih mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v vodi iz vrtin v okolici NEK. Voda iz vrtin se ne uporablja niti kot pitna voda niti kot tehnološka voda, ampak le za sledenje izpustov iz NEK.

Koncentracije aktivnosti naravnega radionuklida K-40 so bile izmerjene na vseh vzorčevalnih mestih. Na Bregah je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti 51 Bq/m^3 , v vodovodu Spodnji Stari Grad 45 Bq/m^3 , kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo z letom 2021 in nižje kot v letih 2019 in 2020. Na drugih črpališčih in vodovodih pa je bila povprečna koncentracija aktivnosti K-40 23 Bq/m^3 , kar je v okviru statističnega razsutja podatkov enako kot v letih 2019, 2020 in 2021. Domnevamo, da se na krško-brežiškem polju spreminja režim gnojenja kmetijskih površin nad območji vodonosnikov [47] in 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 $3,0 \text{ Bq/m}^3$. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-226 se giblje od $0,5 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Brežice) do $3,2 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Rore). Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Pb-210 je bilo od $1,3 \text{ Bq/m}^3$ v vodi iz vodovoda Brežice, do $8,1 \text{ Bq/m}^3$ v vodi iz črpališča Brežice. V Ljubljani je bila koncentracija aktivnosti Pb-210 $0,5 \text{ Bq/m}^3$. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-228 v črpališču Brežice je bilo $0,2 \text{ Bq/m}^3$, črpališču Rore $0,5 \text{ Bq/m}^3$, v vodovodu Spodnji Stari Grad pa $0,6 \text{ Bq/m}^3$ in na Bregah $1,0 \text{ Bq/m}^3$. Povprečja mesečnih koncentracij Th-228 se gibljejo med $0,3 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Brežice) in $0,7 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Brege). 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 črpališču Brežice, najvišje povprečje pa je bilo v vodovodu Spodnji Stari Grad in sicer $3,7 \text{ Bq/m}^3$.

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

V letu 2022 je bila letna količina padavin v Ljubljani 1 264 mm, v Krškem 1 038 mm, na Bregah 910 mm in v Dobovi 888 mm. Letna količina padavin v okolici NEK je bila v letu 2022 25 % nižja kot v Ljubljani. Količine padavin po lokacijah so v okvirih razsutja podatkov primerljive z zadnjimi leti. Razsutje letne količine padavin je $\pm 125 \text{ mm}$ v Ljubljani, v okolici NEK pa 66 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 2022

Koncentracija aktivnosti tritija v padavinah močno variira in le koncentracije aktivnosti nad 2 kBq/m^3 bi lahko pripisali izpustom iz NEK [53]. V letu 2022 je bila koncentracija aktivnosti tritija v padavinah desetkrat višja od 2 kBq/m^3 , in sicer osemkrat na Bregah, marca tudi v Krškem in v Dobovi v avgustu. 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 vseh vzorčevalnih mestih v okolici NEK.

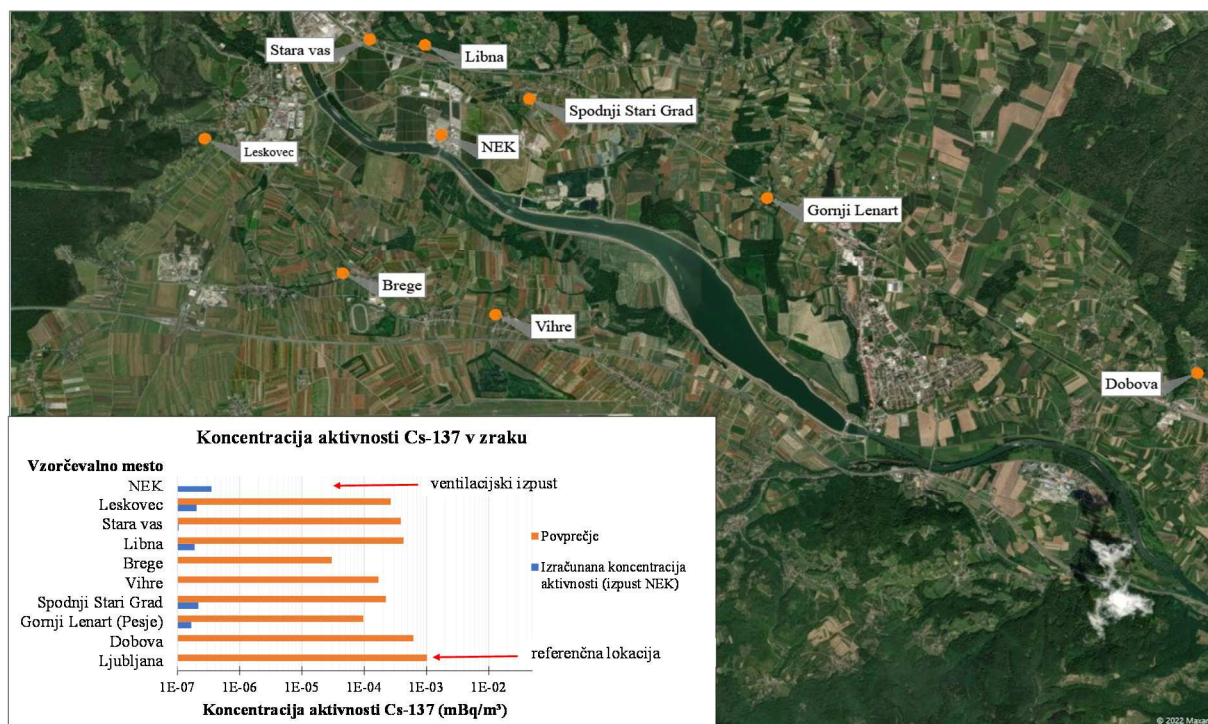
Najvišji mesečni padavinski used H-3 je bil izmerjen na Bregah $0,4 \text{ kBq/m}^2$ v mesecu novembru. Vrednosti in časovni poteki usedov za Ljubljano, Dobovo, Krško in Brege so v okviru razsutja vrednosti primerljivi, vrhovi se skladajo z meseci, ko je bilo padavin več.

Najvišje izmerjene vrednosti padavinskega useda za Cs-137 so bile v Ljubljani $0,06 \text{ Bq/m}^2$ avgusta, na Bregah $0,07 \text{ Bq/m}^2$ maja, v Krškem $0,01 \text{ Bq/m}^2$ junija in v Dobovi $0,01 \text{ Bq/m}^2$ maja, v vseh primerih pri majhni oziroma manjši količini padavin. V takšnih primerih povišanje pripisujemo resuspenziji delcev s tal, 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.

Tako kot v preteklem letu tudi v letu 2022 radioaktivnega stroncija (Sr-90) nismo posebej obravnavali, saj so bile vse izmerjene vrednosti Sr-90 pod mejo detekcije.

4) Zrak (Izvilleček poglavja Zrak)

V zračnih izpustih iz NEK je največ tritija H-3 (5 TBq) in C-14 (0,09 TBq). Količino izpusta merimo na izviru. Njuno prisotnost v okolju ocenjujemo z uporabo modela razširjanja snovi po zraku na podlagi meritev na izviru.



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



Med obratovanjem so bili v izpuhu NEK v letu 2022 zaznani izpusti I-131, Co-58, Co-60, Se-75, Nb-95, Ag-110m, 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 2022 so dvakrat 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 2022 je bila $2,0 \text{ E-4 mBq/m}^3$. Radionuklid Sr-89 v letu 2022 v zračnih izpustih NEK ni bil zaznan.

Radionuklid I-131 v letu 2022 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.

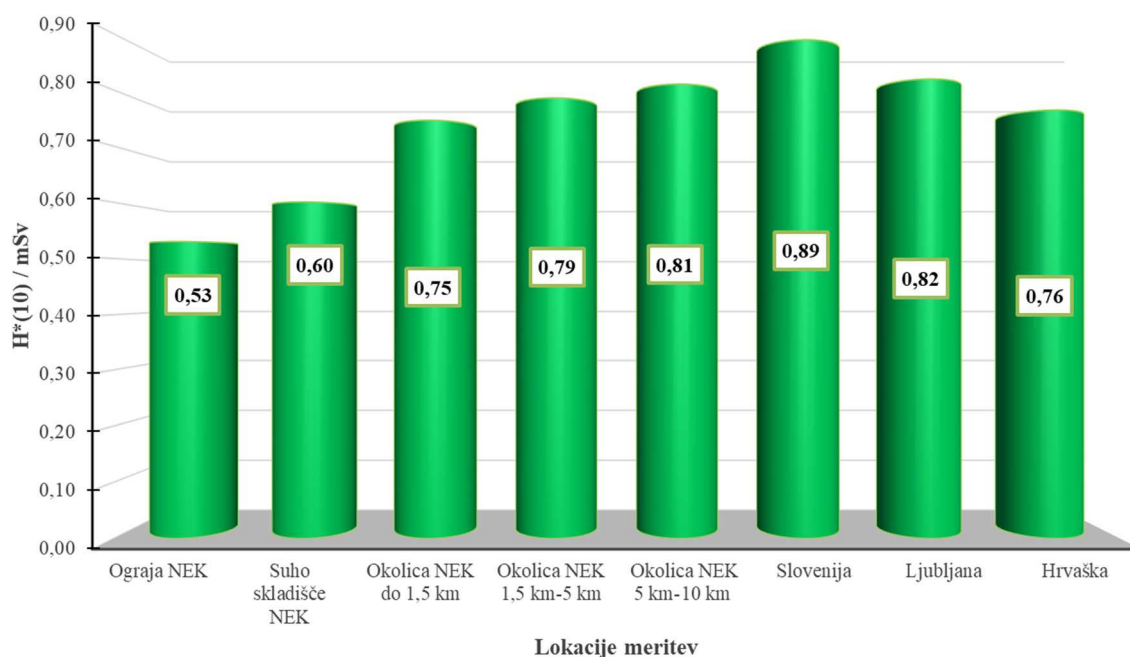
Meritve naravnih radionuklidov v aerosolih v vzorcih iz okolice NEK kažejo prisotnost radionuklidov, ki jih merimo v okviru nadzornih meritev tudi na drugih mestih v Sloveniji. Pri tem velja, da se povprečni koncentraciji aktivnosti Be-7 in Pb-210 v letu 2022 v okviru negotovosti povprečja dobro ujemata na vseh merilnih mestih v okolici NEK in Ljubljani. Povprečna koncentracija aktivnosti Be-7 v letu 2022 v okolici NEK je bila $3,1 \text{ mBq/m}^3$, Pb-210 pa $0,5 \text{ mBq/m}^3$. V Ljubljani sta bili povprečni koncentraciji $4,2 \text{ mBq/m}^3$ in $0,8 \text{ mBq/m}^3$. 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.

5) Zunanja izpostavljenost sevanju (*Izvilleček 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, 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 ([73], [74], [75]). Program omogoča izračun doze, ki je posledica posameznih komponent kozmičnega sevanja, vključno z nevtronsko komponento za poljubno geografsko dolžino in širino.

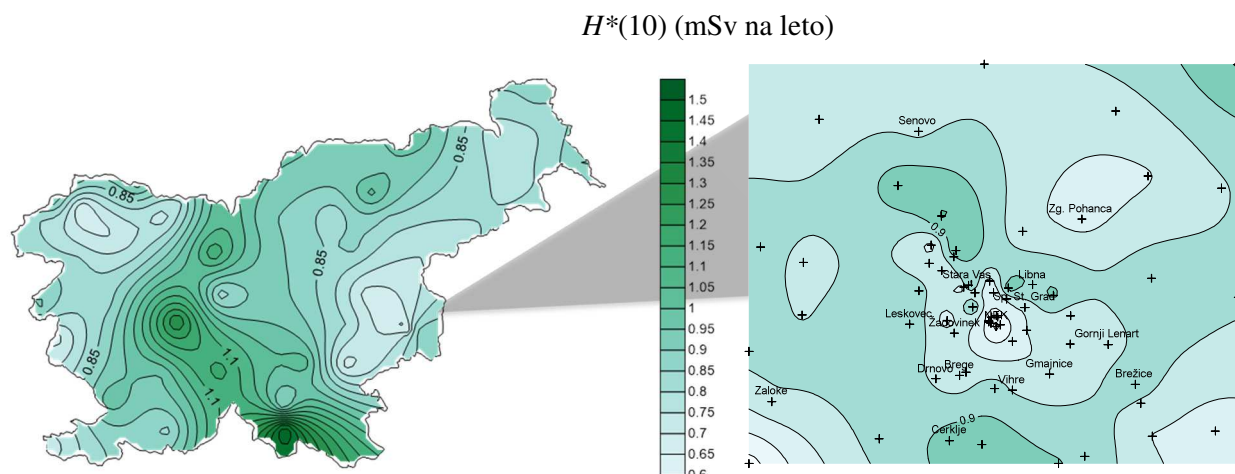


Slika I9: Primerjava med povprečnimi letnimi okoljskimi doznimi ekvivalenti $H^*(10)$, izmerjenimi v okolici NEK, na referenčni lokaciji v Ljubljani in povprečnimi ekvivalenti, izmerjenimi na Hrvaškem v okviru programa nadzora radioaktivnosti v okolici NEK, ter povprečnimi ekvivalenti, izmerjenimi v okviru meritev radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji za leto 2022.

Na sliki I9 prikazujemo primerjavo med povprečnimi letnimi okoljskimi doznimi ekvivalenti $H^*(10)$, izmerjenimi v okolici NEK, na referenčni lokaciji v Ljubljani in 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. 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. V okviru predobratovalnega monitoringa za suho skladišče smo v juniju 2020 postavili 7 dozimetров ob zahodni ograji NEK. Povprečen letni dozni ekvivalent v letu 2022 je bil $(0,60 \pm 0,02)$ mSv, kar je v okviru negotovosti meritev primerljivo z letnim doznim ekvivalentom, ki smo ga izmerili s TLD na ograji NEK. 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 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..., kar vpliva na dozo zunanjega sevanja. Tudi v krajih v okolici NEK so določene raznolikosti pokrajine, dodatno pa k nihanju efektivnih doz izmerjenih s TLD na bližnjih lokacijah prispevajo še lokalne posebnosti pri postavitvi dozimetров 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.

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



Slika I10: Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ po Sloveniji in v okolici NEK v letu 2022

Neprekinjene meritve $H^*(10)$ s 14 merilniki MFM v okolici NEK so v letu 2022 dale povprečno vrednost ($0,83 \pm 0,12$) mSv na leto (v razponu od 0,57 mSv do 1,04 mSv), kar je v okviru razsutja merskih vrednosti enako kot letni dozni ekvivalent, dobljen s TL-dozimetri.

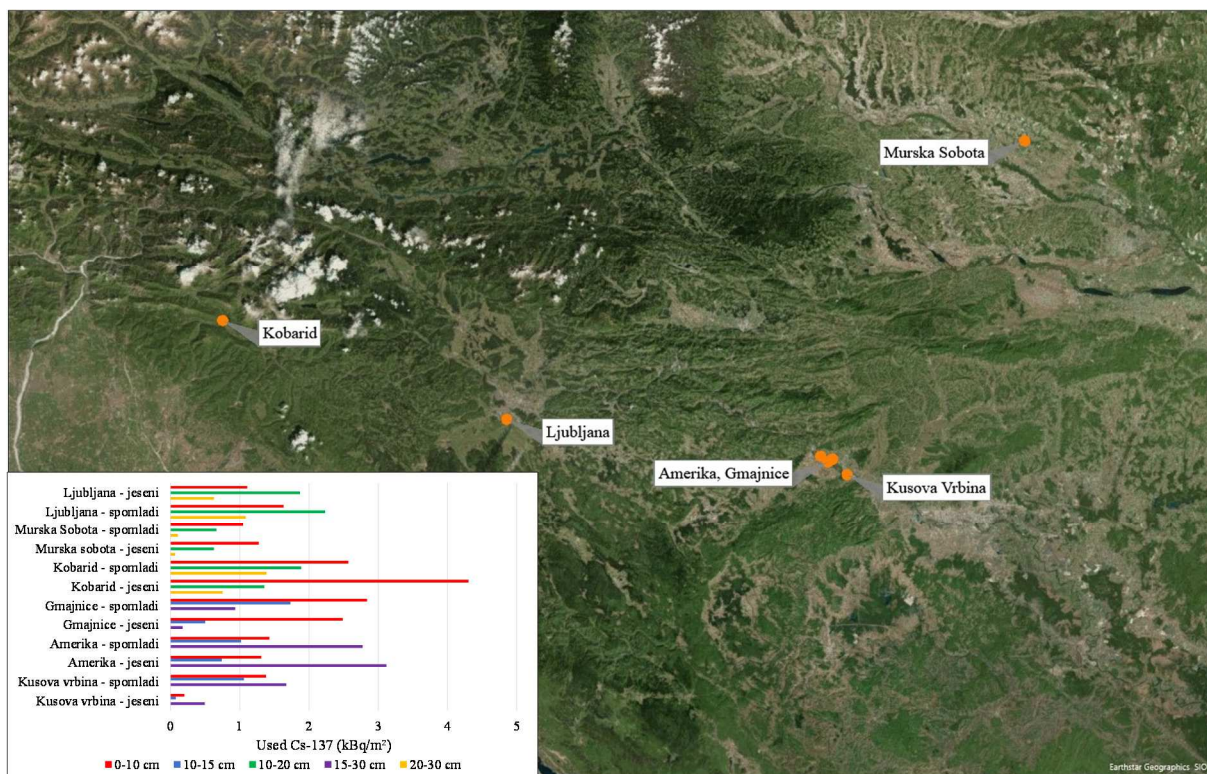
Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent pri 52 merilnikih, ki so pod nadzorom URSJV, je bil v letu 2022 ($0,88 \pm 0,15$) mSv v razponu od 0,60 mSv do 1,29 mSv. V okviru razsutja merskih vrednosti je enak, kot ga kažejo meritve s TLD na območju Slovenije. V primerjavi s prejšnjimi leti ne opazimo statistično značilnih odmkov.

Za meritve zunanega sevanja v Sloveniji je v vseh primerih značilno izrazito zmanjševanje letnega okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ s časom. Zmanjševanje je bilo hitro predvsem v prvih letih po črnobilski nesreči, to je po letu 1986. Tak potek se nadaljuje tudi v letu 2022. 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 0,008 mSv in 0,025 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 0,022 mSv do 0,064 mSv.

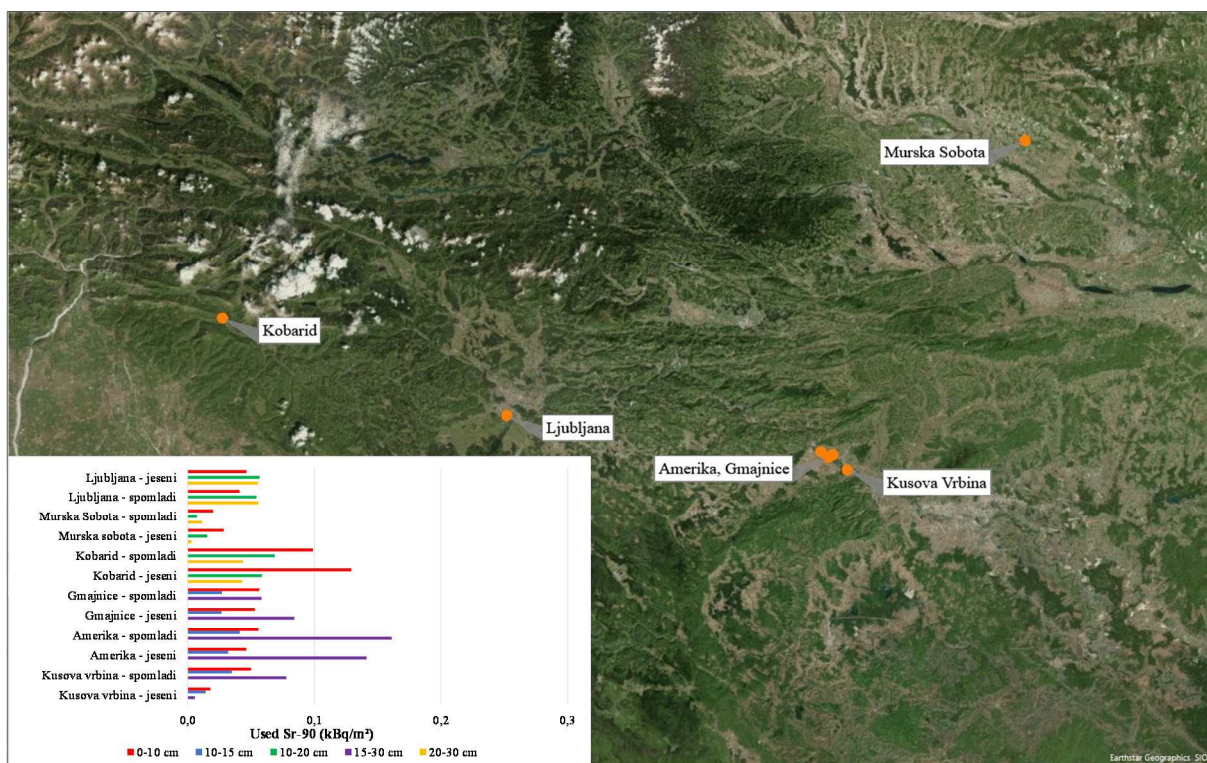
Zemlja

Vzorčenje zemlje poteka na poplavnih področjih, kjer sta usedanje iz zraka in poplavljanje prenosni poti, po katerih lahko izpusti NEK dosežejo mesto vzorčenja.

Specifične aktivnosti Cs-137 v zemlji so bile v letu 2022 od 1,2 Bq/kg v globinah 15–30 cm do 41 Bq/kg v globini 5–10 cm v Gmajnicah. 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 črnobilski 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.



Slika I11: Usedi Cs-137 v okolici NEK (Gmajnice, Amerika, Kusova Vrbina) in po Sloveniji (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) v letu 2022



Slika I12: Usedi Sr-90 po Sloveniji (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) in v okolici NEK (Gmajnice, Amerika, Kusova Vrbina) v letu 2022



V izpuhu NEK so se poleg kratkoživih radionuklidov v letu 2022 pojavili tudi Co-58, Co-60, Se-75, Ag-110m, 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, Nb-95, Ag-110m, Sb-125 in Cs-137), ni bil izmerjen v vzorcih zemlje. Izjema je Cs-137, pri katerem pa izmerjene specifične aktivnosti na lokacijah okrog NEK v primerjavi z vrednostmi na referenčni lokaciji v Ljubljani in drugod po Sloveniji kažejo, da ni posledica 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 323 Bq/kg, v Gmajnicah 362 Bq/kg, v Ameriki pa 417 Bq/kg. Povprečja U-238 za vzorčevalne lokacije so od 28 Bq/kg do 31 Bq/kg, za Ra-226 od 39 Bq/kg do 43 Bq/kg, Ra-228 in Th-228 pa od 26 Bq/kg v Kusovi Vrbini do 34 Bq/kg v Ameriki. Pri tem predpostavimo, da sta Ra-228 in Th-232 v sevalnem ravnovesju. Rezultati meritev specifičnih aktivnosti naravnih radionuklidov v zemlji (K-40, U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228) se ujemajo 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 [40].

6) Hrana (*Izvilleček 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 2022 opravljena študija [23].

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 2022 je bila specifična aktivnost K-40 v hrani, pridelani na krško-brežiškem polju, od 34 Bq/kg (jagode) do 232 Bq/kg (fižol), v hrani, vzorčeni drugod po Sloveniji, pa od 30 Bq/kg (borovnice) do 141 Bq/kg (fižol). 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.

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 2022 izmerjena v ajdi, koruzi, pšenici, jabolkih, travi, slami in hruškah in sicer v juliju in septembru. 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, (307 ± 1) Bq na kilogram ogljika je bila izmerjena v jabolkih (lokacija J, ob zahodni ograji NEK) v juliju [20]. Izmerjena specifična aktivnost C-14 v hrani v neposredni bližini NEK je pričakovano rahlo nad povprečjem, ki izhaja predvsem iz kozmogenega C-14. Sicer so aktivnosti C-14 v hrani, ki je pridelana ob ograji NEK približno za desetino višje kot drugod.

Izračunane specifične aktivnosti radionuklidov, ki so v okolje prišli po zračnih izpustih iz NEK, so vsaj pet redov 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.



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 oseba⁴ je teoretičen 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 [25], revidirana pa v letu 2009 (*Izpostavitve referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo – Nova referenčna lokacija* [26]). 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 2022, 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 jezga 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 jezga NEK 0,045 % od predpisane omejitve, prispevek v Brežicah pa le 0,021 %.

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-60	2,7E-6
notranja obsevanost	zaužitje ribe	H-3, C-14	2,0E-5

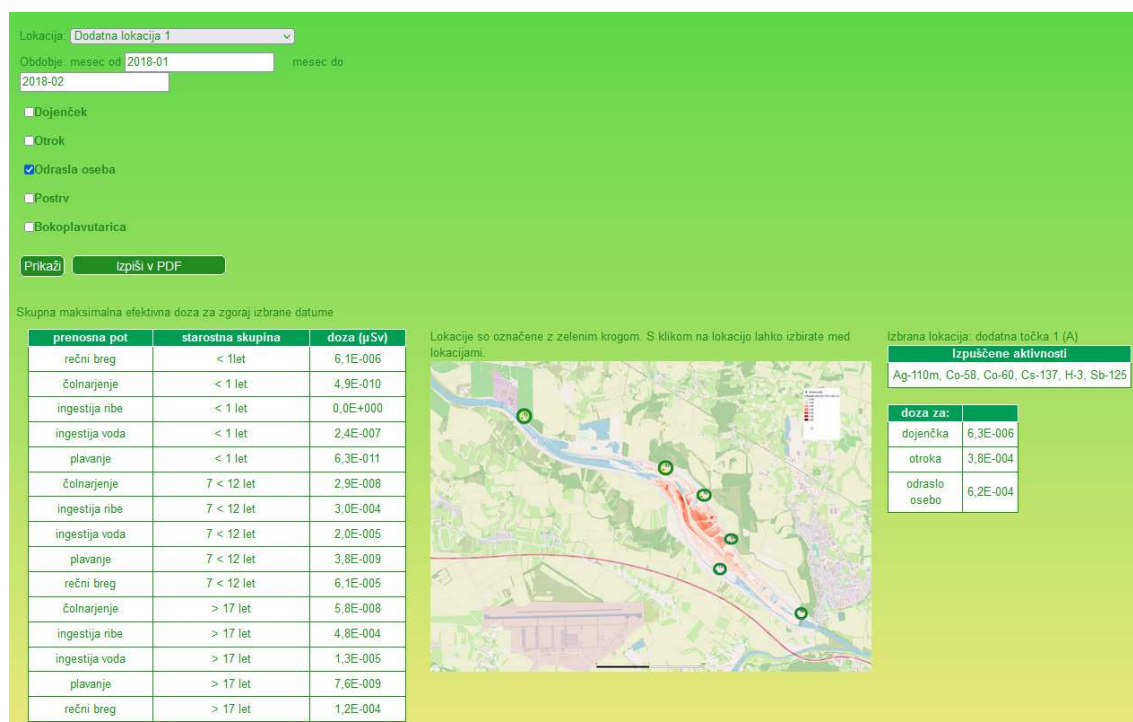
Tabela B2: Ocenjena efektivna letna doza posameznika iz prebivalstva v Brežicah

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	sevanje iz useda (obrežni sediment)	Co-60	1,3E-6
notranja obsevanost	zaužitje ribe	H-3, C-14	9,4E-6

⁴ Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejemajo ali bi lahko prejeli najvišje doze.

Zaradi gradnje HE Brežice in nastanka akumulacijskega jezera je prišlo do sprememb pri načinih in poteh izpostavitve prebivalstva. Za primerjavo z veljavnim modelom je bila narejena tudi ocena učinkov po novi metodologiji, ki je bila razdelana v okviru projektne naloge *Vpliv HE Brežice na NEK in Poročilo o vplivih na okolje za podaljšanje obratovalne dobe NEK* [32]. 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. Pri tem so bili upoštevani vsi zakonodajni akti ter mednarodne smernice in priporočila.

Za teoretično napoved mešanja in redčenja je bil uporabljen tridimenzionalni hidrodinamični transportni model PCFLOW3D ([29], [30], [31], [36]), 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 jezua NEK do jezua HE Brežice. V okviru projektne naloge je bil izdelan Program za računanje učinkovitih 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 Microsoft SQL bazo, izračun učinkovitih doz glede na vnesene vhodne podatke in prikaz različnih izračunanih doz glede na izbrana obdobja.



Slika I13: Prikaz primera izračunanih učinkovitih doz v programu DOSENEK [32].

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 pretoka 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 za 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;
- vpliv 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 te 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.

Prispevek 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)

Tabela B3: Povprečne letne koncentracije radionuklidov (Bq/m^3) in letne prejete doze (μSv) za odraslo osebo po vseh petih prenosnih poteh na točki T3 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)						
Ag-110m	2,0E-03	1,9E-05	8,6E-08	1,1E-09	2,6E-08	2,0E-07	1,9E-05
C-14	5,4E-02	2,8E-08	4,5E-04	6,0E-09	1,0E-12	0,0E+00	4,5E-04
Co-58	5,4E-03	8,9E-04	3,9E-06	7,5E-10	2,4E-08	1,9E-07	8,9E-04
Co-60	6,3E-03	2,6E-03	2,1E-05	4,0E-09	7,4E-08	5,5E-07	2,6E-03
Cs-137	1,5E-03	2,7E-05	2,3E-04	3,7E-09	4,0E-09	3,1E-08	2,6E-04
Fe-55	3,3E-03	0,0E+00	9,6E-07	2,1E-10	0,0E+00	0,0E+00	9,6E-07
H-3	2,5E+04	0,0E+00	2,9E-03	8,4E-05	0,0E+00	0,0E+00	3,0E-03
Mn-54	9,7E-06	2,0E-06	5,2E-09	1,3E-12	3,7E-11	2,9E-10	2,0E-06
Sb-125	1,0E-03	3,9E-06	7,4E-07	2,2E-10	1,9E-09	1,7E-08	4,7E-06
Sr-90	6,1E-05	2,1E-07	6,2E-07	3,3E-10	3,8E-14	0,0E+00	8,3E-07
Skupna doza (prenosna pot)		3,5E-03	3,6E-03	8,4E-05	1,3E-07	9,8E-07	7,3E-03



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 pitje vode. 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. Lastnosti referenčnih oseb za posamezne točke T1–T7 so predstavljene v tabeli 1.8 v poglavju *Radioaktivnost v reki Savi*. Pri točkah T1 (350 m od NEK) in T2 ni zadrževanja na rečnem bregu, zaužitja vode in plavanja, torej imamo samo dve prenosni poti. Pri T7 imamo samo eno prenosno pot, saj tu tudi čolnarjenja ni. Pri točki T3 je zajetih vseh pet prenosnih poti, zato predlagamo, da se ocena učinkov delovanja NEK na prebivalstvo računa za to lokacijo. Za odraslo osebo so v tabeli B3 navedene prejete doze po posameznih prenosnih poteh za radionuklide, ki so bili zaznani v tekočinskih izpustih na lokaciji T3 v pretočni akumulaciji HE Brežice.

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 2022 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 učinkovita 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 učinkoviti dozi za odraslega posameznika iz prebivalstva ob ograji NEK ter okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja, 0,2 % od predpisane omejitve, prispevek v Spodnjem Starem Gradu pa le 0,02 %.

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 2022 je v okviru razsutja podatkov primerljiva z ocenami za prejšnja leta.

Meritve C-14 so bile v letu 2022 izvedene na vzorcih ajde, koruze, pšenice, jabolk, trave, slame in hrušk na Institutu Ruđer Bošković iz Zagreba v juliju in septembru. Rezultati meritev kažejo pričakovano rahlo povišanje 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 učinkovita doza zaradi zaužitja C-14 je tako v okolici NEK (do 1 km) za 8 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 učinkovite doze zaradi C-14 in učinkovite 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 2022 je bil v rastlinju analiziran tudi organsko vezan tritij (OBT). Meritve so opravili na IRB [23]. Koncentracije aktivnosti v vseh merjenih vzorcih rastlinja (koruza in jabolka) so od $(0,8 \pm 0,6)$ Bq/L na kontrolni lokaciji v Dobovi do $(28,5 \pm 0,6)$ 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 $2,5 \text{ E-}2 \mu\text{Sv}$).

Ugotavljamo, da so bili vsi načini izpostavitve prebivalstva (različne referenčne osebe) zanemarljivi v primerjavi z naravnim sevanjem, doznimi omejitvami in avtoriziranimi mejami.

Tabela C1: Izpostavitve sevanju referenčne osebe odraslega posameznika iz prebivalstva v naselju Spodnji Stari Grad zaradi atmosferskih izpustov iz NEK v letu 2022

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	– imerzija (oblak)	– žlahtni plini (Ar-41, izotopi Xe)	1,7 E-7
	– sevanje iz useda	– aerosoli (Co-60, Cs-137)	1,1 E-12
notranja obsevanost	inhalacija (oblak)	H-3, C-14	8,7 E-6
	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 2022. 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)	4,1 E-7
	– sevanje iz useda	– aerosoli (Co-60, Cs-137)	1,6 E-11
notranja obsevanost	inhalacija (oblak)	H-3, C-14	1,9 E-5
	zaužitje rastlinske hrane	C-14	8 E-5

Naravno sevanje (Tabela D) – okolica NEK

Meritve zunanjega sevanja v okolici NEK so tudi v letu 2022 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 0,79 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 0,09 mSv na leto. Tako je bila skupna doza naravnega zunanjega sevanja $H^*(10)$ v letu 2022 v okolici NEK 0,88 mSv na leto. Ustrezna letna efektivna doza (ob upoštevanju pretvorbenih faktorjev iz publikacije Radiation Protection 106 [85]) je 0,74 mSv na leto, kar je nižje od podatka za svetovno povprečje (0,87 mSv na leto). V okviru nadzora



radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji za leto 2022 [18], 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 0,89 mSv.

Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v hrani v okolici NEK so primerljive s povprečnimi vrednostmi v Sloveniji in svetu. Efektivna doza za referenčno osebo v okolici NEK je bila ocenjena na 0,27 mSv. Ta vrednost je enaka efektivni dozi zaradi vnosa hrane iz (UNSCEAR [40]). V okviru nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji za leto 2022 [18] je bila ocenjena efektivna doza Pb-210 za zaužitje 0,040 mSv. Če upoštevamo, da Pb-210 prispeva k celotni efektivni dozi 25 % (glej poglavje *Radionuklidi v hrani*), lahko grobo ocenimo efektivno dozo zaradi vnosa hrane na 0,16 mSv. Ta vrednost je nižja kot je ocena efektivne doze zaradi zaužitja na področju NEK. Pri tem je treba upoštevati, da se v okolici NEK in po Sloveniji vzorčijo različne vrste živil. Upoštevati je treba še različni metodologiji vrednotenja porabe živil po različnih starostnih skupinah. Metodologija, ki je bila uporabljena v tem poročilu ([83], [84]), temelji na realni oceni porabe po starostnih skupinah na podlagi potrošnikove košarice. Podatke o porabi živil po starostnih skupinah je za IJS pripravil Nacionalni inštitut za javno zdravje (NIJZ). Zbiranje podatkov na terenu je potekalo v letih 2017 in 2018. Ta pristop je boljši od pristopa, ki ga uporablja Statistični urad RS (SURS), ki temelji na nakupu živil na člana gospodinjstva (primernejše za vrednotenje ekonomskih kazalnikov). Ker je delež neporabljene hrane nezanemarljiv, menimo, da je pristop NIJZ ustrežnejši in realnejši. Variabilnost Pb-210 in drugih naravnih radionuklidov v hrani in različna pristopa pri oceni porabe živil lahko prispevata k različnim ocenam efektivne doze zaradi zaužitja v okolici NEK in Sloveniji.

Značilni prispevek kratkoživih radonovih potomcev k efektivni dozi 1,3 mSv je bil ocenjen v poročilu za leto 2000 (IJS-DP-8340, #3 na strani 7. Ocena velja za okolico NEK in Slovenijo.

Posamezni prispevki k dozi naravnega sevanja so zbrani v tabeli D. Skupna letna efektivna doza je ocenjena na 2,35 mSv, kar je enako kot povprečje zadnjih 10 let (2,35 mSv) in svetovnega povprečja, ki je 2,4 mSv na leto [40].

Tabela D: Efektivne doze E zaradi naravnih virov sevanja v okolici NEK v letu 2022

Vir		Letna efektivna doza E (mSv)
– sevanje gama in neposredno ionizirajoče kozmično sevanje [#]		0,66
– kozmični nevtroni [40]		0,08
zaužitje (naravni radionuklidi) ([40], efektivna doza) ^{##}		0,27
vdihtavanje	kratkoživi potomci Rn-222, efektivna doza) ^{###}	1,3
	naravni radionuklidi (Pb-210) ^{####}	0,04
Skupaj		2,35

Opomba: [#] Ocena efektivne doze zunanjega sevanja iz okoljskega doznega ekvivalenta doze $H^*(10)$ z upoštevanjem pretvorbenega faktorja $E/H^*(10) = 0,84$ za fotone 600 keV [85]. Pretvorbeni faktorji v območju od 100 keV do 6 MeV so v območju med 0,84 in 0,89.

^{##} Vzeto iz poglavja *Radionuklidi v hrani*

^{###} Značilni prispevek kratkoživih radonovih potomcev k efektivni dozi je bil ocenjen v poročilu za leto 2000 (IJS-DP-8340, #3 na strani 7).

^{####} Vzeto iz poglavja *Zrak*

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.



Černobilska kontaminacija, poskusne vojaške jedrske eksplozije, cunami v Fukušimi

V letu 2022 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. V letu 2022 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: Povzetek letnih izpostavitv prebivalstva v okolici NEK za leto 2022

Vir	Prenosna pot	Letna efektivna doza (mSv)
naravno sevanje	– sevanje gama in neposredno ionizirajoče kozmično sevanje	** 0,66
	– kozmični nevtroni	0,08
	– zaužitje (K, U, Th)	0,27
	– vdihavanje (kratkoživi potomci Rn-222)	1,30
	– vdihavanje (naravni radionuklidi (Pb-210))	0,04
	Skupaj naravno sevanje v okolici NEK[#]	2,35
NEK – neposredno sevanje ob ograji NEK	– neposredno sevanje iz objektov NEK	nedoločljivo
NEK atmosferski izpusti (na ograji NEK ^{***})	– zunanje sevanje iz oblaka	4,1 E-7
	– zunanje sevanje iz useda (Co-60, Cs-137)	1,6 E-11
	– vdihavanje iz oblaka (H-3, C-14)	1,9 E-5
	– zaužitje (C-14)	8,0 E-5
NEK tekočinski izpusti (Sava)	Odrasla referenčna oseba – pretočna akumulacija HE Brežice (350 m nizvodno od jezua NEK)	2,3 E-5
	Skupaj učinki NEK[*]	1,2 E-4
černobilska kontaminacija, jedrske poskusi	– zunanje sevanje ^{**}	*** 1,6 E-2
	– zaužitje rastlinske in živalske hrane (brez C-14) ^{****}	3,5 E-4
	– zaužitje rastlinske hrane (C-14)	1,4 E-2
	– zaužitje rib (Sr-90)	8,7 E-5
	Skupaj globalno onesnaženje	3,2 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 pretvorbenega faktorja $E/H^*(10) = 0,84$ za fotone 600 keV [85].

*** V tej oceni ni upoštevano, da se referenčna oseba zadržuje 20 % časa na prostem in da je faktor ščitenja pri zadrževanju v hiši 0,1. Predpostavlja se, da se referenčna oseba zadržuje ves čas na prostem. Gre za konzervativno oceno.

**** 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.

Povzeto po tabeli D.



Predvidena efektivna doza zaradi inhalacije radionuklidov, ki so posledica splošne kontaminacije (Cs-137 in Sr-90), je za odraslega posameznika iz prebivalstva ocenjena na 1 E-7 mSv na leto.

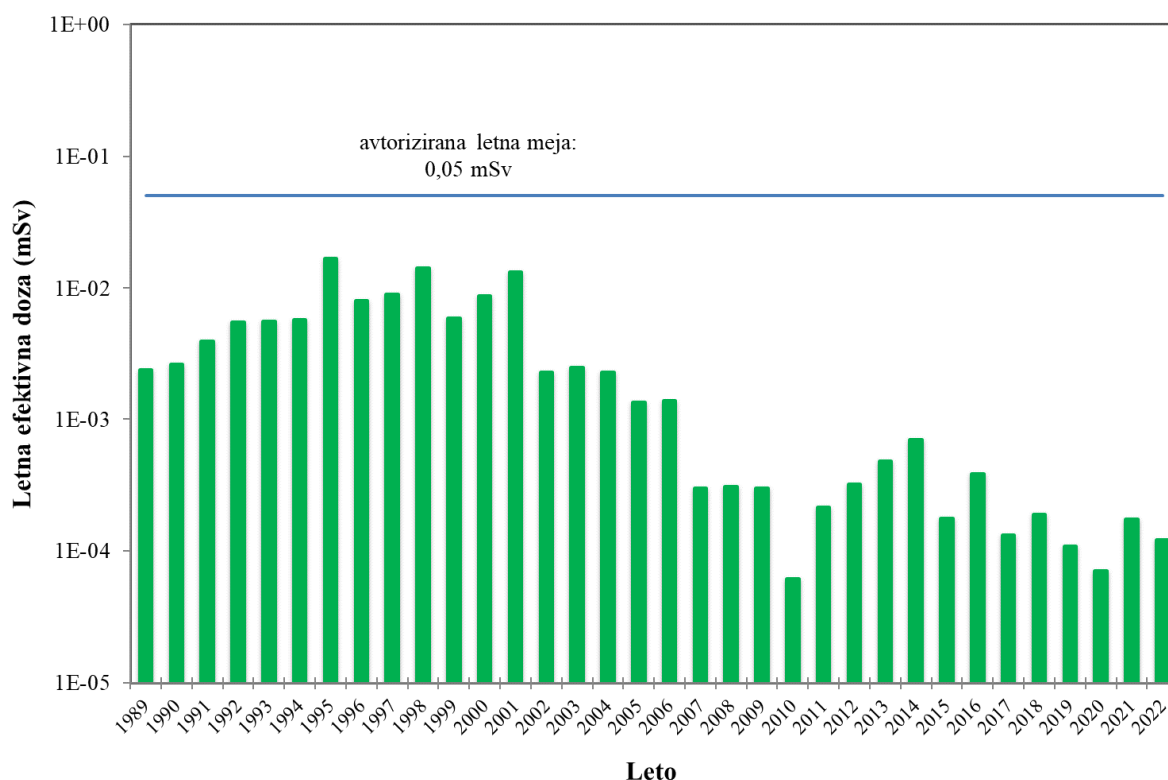
Cs-137 in Sr-90 iz jedrskih poskusov in černobilske nesreče sta bila izmerjena v sledih v posameznih vrstah hrane. Efektivna doza zaradi zaužitja te hrane je bila za leto 2022 ocenjena na $1,4 \text{ E-4 mSv}$ na leto za Cs-137 in $2,1 \text{ E-4 mSv}$ na leto za Sr-90, kar je skupaj 0,3 % letne efektivne 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 2022 (Tabela E)

V tabeli E so predstavljeni posamezni prispevki k letni efektivni dozi zaradi emisij NEK v letu 2022 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 groba ocena letne efektivne doze.



Slika I14: Seštevek ocenjenih letnih efektivnih doz posameznih referenčnih skupin zaradi emisij NEK od leta 2004 do leta 2022. Označena je tudi avtorizirana letna meja (0,05 mSv). Skala je logaritemska.



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 medijih za vse umetne radionuklide, ki jo prejme prebivalstvo (odrasli) iz najbližjih naselij, oziroma referenčnih lokacij, so zbrani v tabeli F, dodana je primerjava s prejšnjimi leti. V letu 2022 je bil največji prispevek od zunanjega sevanja – posledica prisotnosti Cs-137 v zemlji (globalno onesnaženje). Drugi največji prispevek je od C-14 v hrani. Ugotovimo lahko še, da je vsota prispevkov v okviru razsutja podatkov v zadnjih petih letih enaka.

Tabela F: Pregled ocenjenih letnih efektivnih doz za vse umetne radionuklide po nadzorovanih medijih izpostavitve za odraslo referenčno osebo v okolici NEK od leta 2018 do leta 2022 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 0,24 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in navzven.

Nadzorovani medij	Letna efektivna doza umetnih radionuklidov E (mSv)					Lokacija	Opombe
	2018	2019	2020	2021	2022		
Reka Sava	9,1 E-5 1,5 E-6 7,3 E-4	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	Brežice Brežice Brežice	pitje (H-3) kopanje (Cs-137) zaužitje rib (Sr-90)
Črpališča in vodovodi	3,5 E-5	2,8 E-5	3,2 E-5	3,1 E-5	1,4 E-5	Brege	pitje vode (H-3)
Padavine in suhi used	2,3 E-5	1,9 E-5	1,8 E-5	1,9 E-5	1,2 E-5	Brege	Zaužitje rastlinja (H-3)
Zrak	4,6 E-7	4,5 E-7	2,7 E-7	2,1 E-7	9,7 E-8	Povprečje po lokacijah	inhalacija in imerzija (Cs-137)
Zunanje sevanje**	0,023	0,015	0,017	0,014	0,014	Vse lokacije	(Cs-137)
Hrana	0,0151	0,0152	0,01485	0,0145	0,0159	Na ograji NEK***	zaužitje C-14*
	0,0015	0,0010	0,0016	5,0 E-4	3,5 E-4	vse lokacije in na ograji NEK***	Sr-90, Cs-137
Skupaj	0,0405	0,0315	0,0338	0,0293	0,032		

* 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 I14 je predstavljen seštevek ocenjenih letnih efektivnih doz posameznih referenčnih oseb zaradi emisij NEK od leta 1989 do leta 2022. 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 na 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 2022 daje seštevek primerljivo vrednost s prejšnjimi leti. Pri tem je potrebno upoštevati, da so bili učinki zaradi tekočinskih izpustov iz NEK ocenjeni z novim modelom [32]. Pri primerjanju prispevkov v posameznih letih je treba upoštevati, da se pri izračunu zunanega sevanja iz oblaka in inhalacije iz oblaka od leta 2007 uporablja Lagrangeev model, ki daje nižje 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 v primerjavi z globalnim onesnaženjem in učinki uporabe radionuklidov v medicini za več redov velikosti nižji. Še več, ocenjena vrednost sevalnih učinkov (letne efektivne doze) NEK na prebivalstvo ob ograji NEK (in okvirno 500 m od osi reaktorja) je približno 0,005 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja.

SKLEPI

Povzetek izpostavitve prebivalstva v okolici NEK za leto 2022 je v tabeli E, kjer so navedeni prispevki naravnega sevanja, učinki NEK na ograji NEK, ki je v izključitvenem območju, in preostali učinki črnbilске kontaminacije in poskusnih vojaških jedrskih eksplozij:

- v letu 2022 so bili vsi sevalni učinki NEK na 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 $1,2 \text{ E-4 mSv}$ na leto;
- ocenjena vrednost sevalnih učinkov NEK na ograji NEK je približno 0,005 % 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 (efektivna 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 (82 %), od tega z vnosom C-14 66 %;
- efektivna doza zaradi izpustov iz NEK zaradi vdihavanja prispeva k celotni efektivni dozi 16 %; med radionuklidi največ prispeva H-3;
- efektivna doza zaradi izpustov iz NEK zunanega sevanja k celotni efektivni dozi prispeva 3 %; med radionuklidi največ prispeva Co-60;
- 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;
- Za računanje efektivne doze zaradi učinkov tekočinskih izpustov iz NEK je bil izdelan nov model, ki temelji na teoretični napovedi mešanja in redčenja z uporabo tridimenzionalnega hidrodinamičnega transportnega modela PCFLOW3D. V okviru projektne naloge je bila izdelana tudi spletna platforma DOSENEK. 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.





SUMMARY

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 2022, 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 was in all cases less than one per cent of the authorised limit, which means that the Krško NPP facility does not contribute to the annual effective dose limit to the population in its vicinity.

Like all residents, residents in the vicinity of the Krško NPP receive a typical dose of natural ionising radiation. The natural ionising radiation dose in the vicinity of the Krško NPP can be determined precisely based on measurements carried out by authorised organisations in the framework of the operational environmental radioactivity monitoring of the Krško NPP, since sensitive devices detect all radionuclides, including natural radionuclides in the environment. Based on measurements in 2022, the natural ionising radiation dose in the vicinity of the Krško NPP is estimated to be 2.35 mSv per year.

Table A: Summary table of annual exposures of the population in the vicinity of the NPP for 2022 is a summary of the data presented in more detail in Table E.

Origin	Exposure pathway	Annual effective dose (mSv)
Natural background	– Gamma-ray and direct cosmic radiation	0.74
	– Ingestion of natural radioactivity (K, U, Th)	0.27
	– Inhalation of natural radioactivity and progeny	1.34
	Total natural background radiation (Krško NPP area)	2.35
Krško NPP	– Gama-ray and direction radiation from the buildings at the Krško NPP yard	0.000000
	– Cumulative contribution of atmospheric discharges	0.000099
	– Cumulative contribution Liquid discharges	0.000023
	Total radiation effects of the Krško NPP*	0.000122
Global contamination	– Accident in Chornobyl NPP, nuclear weapon detonations...	0,033
	Skupaj globalno onesnaženje	0,033

* The total sum of contributions from Krško NPP discharges is informative and conservatively estimated upwards, as we add all the different contributions for different representative persons, which in the actual case do not add up in total.



The contribution of the total radiation effects of the Krško NPP on the population in the vicinity is 0.00012 mSv per year. This contribution is ten 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 no more exposed to ionising radiation than the population elsewhere in Slovenia. The contribution of the radiation effects of the Krško NPP on the population is 0.24 % 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 maximum allowable dose limit for the total population, or less than 0.005 % of the natural background in Slovenia.

The doses received by the population in the vicinity of the Krško NPP are summarised in Table A. Table A contains a conservatively rounded and simplified presentation of the measurement and calculation data, which are presented in full in Table E 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 therefore less than 1.2×10^{-4} mSv per year, which is less than one per cent (0.24%) 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 effects also goes to the NPP staff, who have been exemplary in their monitoring and limitation of discharges.

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 (theoretical) representative of the population receiving or likely to receive the highest effective dose from a particular exposure pathway.

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 in the same place (close to the edge of the exclusion zone), and for the other ten months consumes food from elsewhere in Posavje (Dobovo). However, the reference person calculating the contribution of liquid discharges to the Sava River is a fisherman along the Sava River, who stays 350 m downstream of the NPP dam and consumes fish caught there. These different reference persons are added together in the overall impact assessment. However, as these are contributions from different representative persons, the sum of the effects of atmospheric and liquid discharges from the Krško NPP is only a conservative upper estimate of the annual effective dose.

Thus, the Krško NPP produces clean, efficient and low-carbon energy, which is essential for meeting the 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* ([5], [11]) and other dose limits related to releases, as well as other radiation impacts 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 2022 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 doses, which are presented in Chapter "DOSE ESTIMATE" (Table E). The dose assessment is based on the methodology of ICRP and IAEA [37] [38] [39].

Thus, in 2022, the radiation effects of the Krško NPP on the representative person⁵ in the immediate surroundings were estimated at less than $1.2 \text{ E-4 mSv mSv per year}$, amounting to 0.24 % of the authorized dose limit at the Krško NPP exclusion area. The estimated effective dose at the Krško NPP fence (approximately valid also at 500 m distance from the axis of the reactor) received by representative person as the result of Krško NPP atmospheric discharges is estimated to $1.0 \text{ E-4 mSv per year}$, and to $2.3 \text{ E-5 mSv per year}$ due to the Krško NPP liquid discharges. The major contribution of $8.0 \text{ E-5 mSv per year}$ to the total effective dose comes from food ingestion due to the C-14 fallout (discharge).

The estimated sum of all radiation contributions (annual effective doses) at the Krško NPP fence is 0.005 % of the characteristic unavoidable natural background radiation. The estimate can approximately be applied also at the distance of 500 m from the axis of the reactor. The Summary lists the most important facts from the Monography *Ocena izpostavljenosti prebivalstva in biote zaradi nadzorovanih tekočih in atmosferskih izpustov v okolje iz Nuklearne elektrarne Krško*, which is a separate supplement to the report *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2022*, internal code 9/2023, Ljubljana, April 2023.

⁵ 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' [38].



The Report does not deal with the exposure of the population to the ionizing radiation caused by diagnostic medical examinations, which represents the second strongest source of exposure after natural radiation in the developed world as well as in Slovenia.

CHARACTERISTICS OF SAMPLING AND MEASUREMENTS

In 2022, the scope and methods of sampling and measurements remained the same as in previous years, enabling 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, before Brežice HPP dam, Brežice, Jesenice na Dolenjskem and Podsused near Zagreb (Croatia, around 30 km downstream from the Krško NPP) for short-lived radionuclides;
- 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 location 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 in 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 2022, 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 (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 on 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 future dry fuel storage facility - pre-operational monitoring;
- 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 [17], [18];
- d) 14 continuous radiation detectors MFM-203 are in operation in the vicinity of Krško NPP as part of the Early Warning Network. In addition to these, further 53 continuous radiation detectors 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 determination 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), Spodnji Stari Grad (meat, eggs), Žadovinec (vegetables), Trnje (vegetables), Leskovec (meat, fruit), Dolenje Skopice (milk, vegetables), Dolenja vas (vegetables), Gornji Lenart (eggs), Libna (meat). In 2022, 30 types of food were sampled in the vicinity of the NPP, for a total of 75 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 2022 (July and September) at fifteen 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 the 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 2022, IJS-DP-14320*) 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 [58]. 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 in 7 [60]). 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 [59], 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 2022, IJS DP 14320*.

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-Chornobyl period. This is also confirmed by periodic monthly reports on atmospheric discharges from the Krško NPP, where the radionuclide Sr-89 was 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 0.6 to 1.2 kBq/m³. The natural background tritium concentration in the Sava River at Krško is of 0.6 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 2022 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 2.2 kBq/m³, and in front of the Brežice HPP dam 2.6 kBq/m³. Tritium activity concentrations in the Sava at Jesenice na Dolenjskem sampling station are lower due to additional dilution of the Sava with Krka and Sotla rivers. The long-term average is 1.9 kBq/m³.

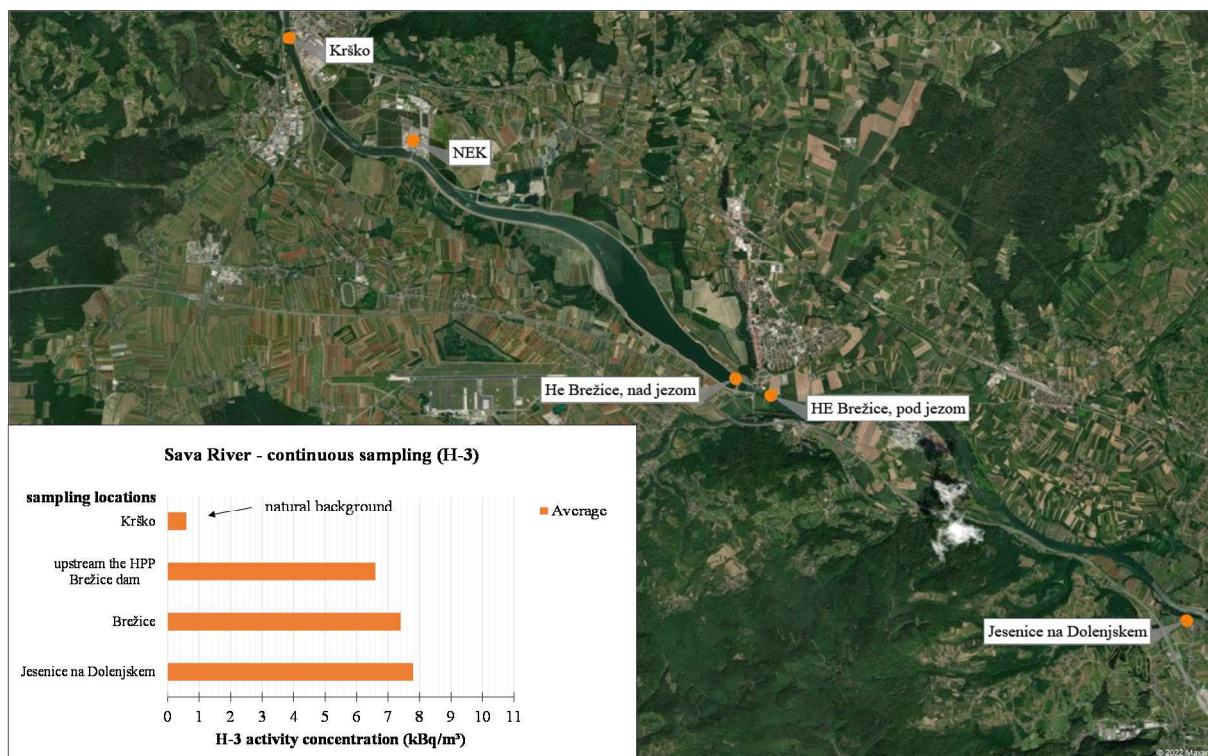


Figure I1: Overview of monthly averages of activity concentrations of H-3 in Sava river at stations with continuous sampling mode upstream and downstream of the Krško NPP dam in 2022.

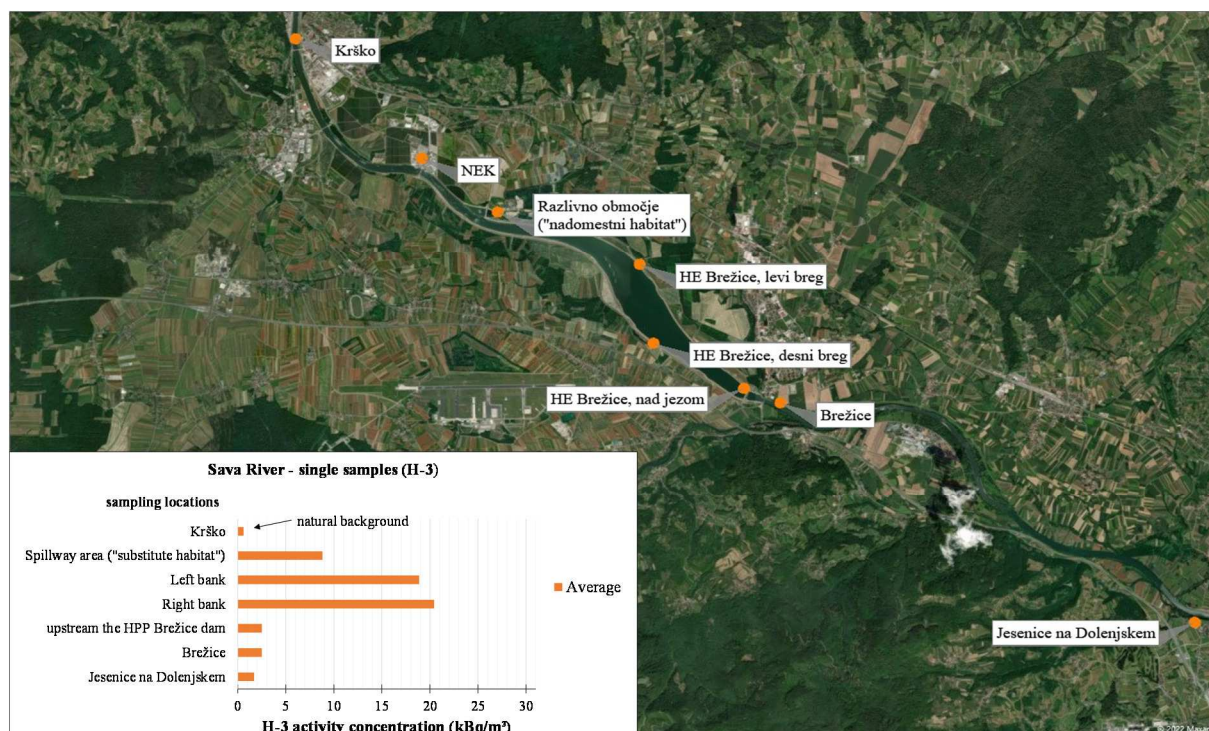


Figure I2: Review of monthly averages of activity concentrations of H-3 in the Sava river at locations upstream and downstream of the Krško NPP dam, where single (monthly or quarterly) samples are collected, in 2022.

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 was true in 2022. 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 terms of 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 [27]. 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 2022, 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 IRB. Quarterly samples are made up of individual discharges. Quarterly C-14 activities ranged from 0.017 GBq in the first quarter to 0.065 GBq in the second quarter. The total annual C-14 release of 0.14 GBq was calculated as the sum of the quarterly values. The discharges are almost an order of magnitude lower than the long-term average (1.5 GBq) since 2013.

C-14 was also measured in Sava river water and fish [20]. 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 10 Bq/m³ and on the right bank 11 Bq/m³, respectively. The measured values in the third quarter deviated from the average. The measured concentration of C-14 activity in the Sava River on the left bank was 11 Bq/m³ and on the right bank 16 Bq/m³, which could possibly indicate the impact of the NPP. All measured specific activities are lower than the current atmospheric activities (103 pMC or 226 Bq/kg C).



The specific activities of C-14 in the Sava River and fish samples in 2022 are, in terms of measurement uncertainty, the same and are also lower than the current atmospheric activity of C-14.

I-131 is regularly present at all sampling locations of the Sava River, both upstream from the power plant and downstream in Brežice and Jesenice na Dolenjskem. The presence of I-131 in the Sava river is attributed to discharges of liquid sewage from hospitals into rivers that flow into the Sava upstream of the Krško NPP dam (Ljubljana, Savinja). I-131 was not detected in liquid discharges from Krško NPP this year.

In 2022, the activity concentration of I-131 fluctuates widely and is sometimes below the detection limit. In individual samples at different sampling sites of the Sava River in Posavje, it ranged from 0 Bq/m³ to 7.2 Bq/m³. The highest average in 2022 in Posavje was at the reference site Krško, 4.1 Bq/m³.

From the programme of the environmental radioactivity monitoring in the living environment in the Republic of Slovenia in 2022 [18], we understand that the average concentrations in the Sava River in Brežice were lower than those measured in the Sava river in Ljubljana (11–17 Bq/m³). In the Savinja River, activity concentrations of I-131 were up to 2 Bq/m³, while I-131 was not detected in the Mura and Drava.

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 activity of liquid discharges of Cs-137 from the NPP into the Sava river was 1.5 MBq, which is comparable to previous years (2012–2021) in terms of data scattering and lower than the long-term average of 15 MBq since 2000.

The Cs-137 content in the Sava river is attributed to global contamination, as the calculated increment of the Cs-137 activity concentration in Brežice, taking into account the annual liquid discharges, the average flow rate of the Sava river, and dilution ratio of 1.3 on the left bank in Brežice, is equal to 4.5 E-4 Bq/m³. The calculated increment is three orders of magnitude lower than the measured values, making it indistinguishable from global contamination.

The average monthly activity concentration in filtered water of the Sava river was 0.28 Bq/m³ at the reference site in Krško and 0.07 Bq/m³ in Jesenice na Dolenjskem. In Brežice and before the HPP Brežice dam, Cs-137 was not detected in any samples of Sava water. Most of the measured activity concentrations in singly sampled Sava water samples were below the minimum activity detection limit. On the left bank of the largest spread of the flow accumulation reservoir, the average was 0.59 Bq/m³ and on the right bank 0.57 Bq/m³, and at Jesenice na Dolenjskem 0.35 Bq/m³.

The measured Cs-137 activity concentrations 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. The average Cs-137 activity concentration in 2022 ranged from 0.05 Bq/m³ in Krka River to 0.8 Bq/m³ in the Mura River [18].

Radioactive strontium (Sr-90) is regularly measured in the Krško NPP liquid effluents. In 2022, the activity released into the Sava river was 0.06 MBq, the same as in 2021 and lower than in previous years. Monthly samples are made up of individual discharges. The Sr-90 content in Sava river is also attributed to global contamination, as the calculated increment of the Sr-90 activity concentration in Brežice, taking into account the annual liquid discharges and the average flow rate of the river, and assuming a dilution ratio of 1.4 on the left bank in Brežice, is equal to 2 E-5 Bq/m³. This contribution cannot be separated from the inhomogeneously distributed global contamination.

Most strontium is dissolved in water. The activity concentration of Sr-90 in the filter residue was below the detection limit in all samples. In general, strontium concentrations in filtered river water are 2 to 3 times higher than caesium. Exceptions are the results of measurements in river water in Jesenice na Dolenjskem where the quotient is up to 23. The average Sr-90 activity concentration in the filtered water at the reference sampling location Krško was 1.1 Bq/m³, upstream of the dam of the HPP Brežice 1.0 Bq/m³, in Brežice 1.1 Bq/m³ and in Jesenice na Dolenjskem 1.7 Bq/m³. Within data scattering, the



values are comparable. The activity concentrations of Sr-90 in one-time samples of unfiltered water are, within the frame of the total uncertainty, the same as in continuously sampled filtered water. At all sites, the quarterly averages ranged from 0.8 Bq/m³ to 1.1 Bq/m³. The highest value in one-time samples was 2.1 Bq/m³ in accumulation lake.

The average activity concentrations of strontium in other rivers in Slovenia do not differ from the results measured in the Sava river in the vicinity of Krško NPP's. The average concentration measured in the Sava at Laze near Ljubljana was 2.1 Bq/m³, in the Drava 1.0 Bq/m³ and in the Mura 1.7 Bq/m³ [18].

Figure I3 shows the average specific activities of Cs-137 and Sr-90 in river sediments upstream and downstream of the the Krško NPP dam. The contents of both radionuclides in the sediments are attributed to global contamination, as liquid discharges from the Krško NPP contribute specific activities of 9 E-4 Bq/kg for Cs-137 and 3 E-5 Bq/kg for Sr-90 in the river sediments in Brežice. These contributions are negligible compared to the average specific activities of 6.0 Bq/kg for Cs-137 and 0.2 Bq/kg for Sr-90 in the sediments in 2022 at Brežice sampling site.

Figure I4 shows the average specific activities of Cs-137 and Sr-90 in fish upstream and downstream of the the Krško NPP dam. The measured specific activities of radionuclides in fish are attributed to global contamination as well, as the contributions (calculated estimates) of radionuclides due to liquid discharges from the Krško NPP are four to five orders of magnitude lower than the measured specific activities of the two radionuclides in fish.

Other fission and activation products (Co-58, Co-60, Mn-54, Ag 110m, Sb-125) occur regularly in NPP liquid effluents. The total activity of these radionuclides in 2022 was at least six orders of magnitude lower than tritium. Cs-134 was last measured in liquid effluents in 2016. None of these radionuclides have been detected in the environment in the last decade or more. Co-60 was last detected in water and sediment in 2003 and 2006, and Cs-134 in sediment 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 the Sava water, activity concentrations of U-238 up to 6.1 Bq/m³, Ra-226 up to 4.4 Bq/m³, Pb-210 up to 34 Bq/m³, Ra-228 up to 3.9 Bq/m³, Th-228 up to 2.8 Bq/m³ and Be-7 up to 360 Bq/m³ were measured at all sampling sites. The activity concentrations of natural radionuclides in the water were thus similar to those measured in rivers in Slovenia.

The average activity concentrations of K-40 ranged from 26 Bq/m³ to 71 Bq/m³ at all locations starting from the reference sampling location in Krško to Jesenice na Dolenjskem. K-40 is characterised by pronounced fluctuations, mainly related to the contamination of rivers and in small extent to the geological composition of the bedrock. The activity concentration of K-40 in rivers in Slovenia varies, in accord with the geological diversity of the Slovenian territory. The average concentration of K-40 in rivers in 2022 ranged from 8.4 Bq/m³ in the Soča river to 217 Bq/m³ in the Savinja river. The highest activity concentration was in Savinja (270 ± 10) Bq/m³. The elevated potassium content can be explained by increased river sedimentation (mixing of water and sediment) at the off-site wastewater treatment plant in Laško [18]

In sediments at all sampling sites, specific activities of U-238 up to 46 Bq/kg (pod jezom NEK), Ra 226 up to 55 Bq/kg (pod jezom NEK), Pb-210 up to 110 Bq/kg (Krško), Ra-228 up to 53 Bq/kg (pod jezom NEK) and Th-228 up to 33 Bq/kg (Krško) were observed. The average specific activities of K-40 ranged from 330 Bq/kg (Brežice) to 640 Bq/kg (pod jezom NEK). Be-7 was occasionally detected in sediment with a range from 0 Bq/kg to 140 Bq/kg at all locations.

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

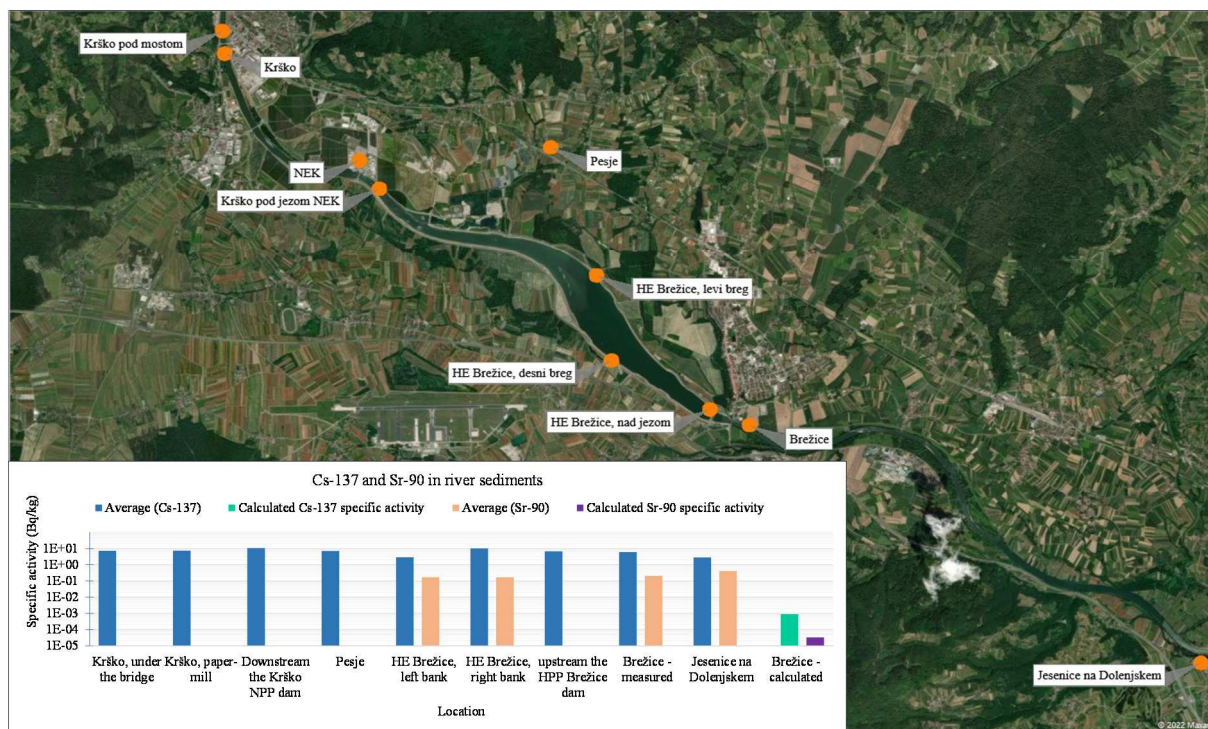


Figure I3: Specific activities of Cs-137 and Sr-90 in river sediments in 2022. The average of Sr-90 in Krško was below the detection limit. The scale is logarithmic.

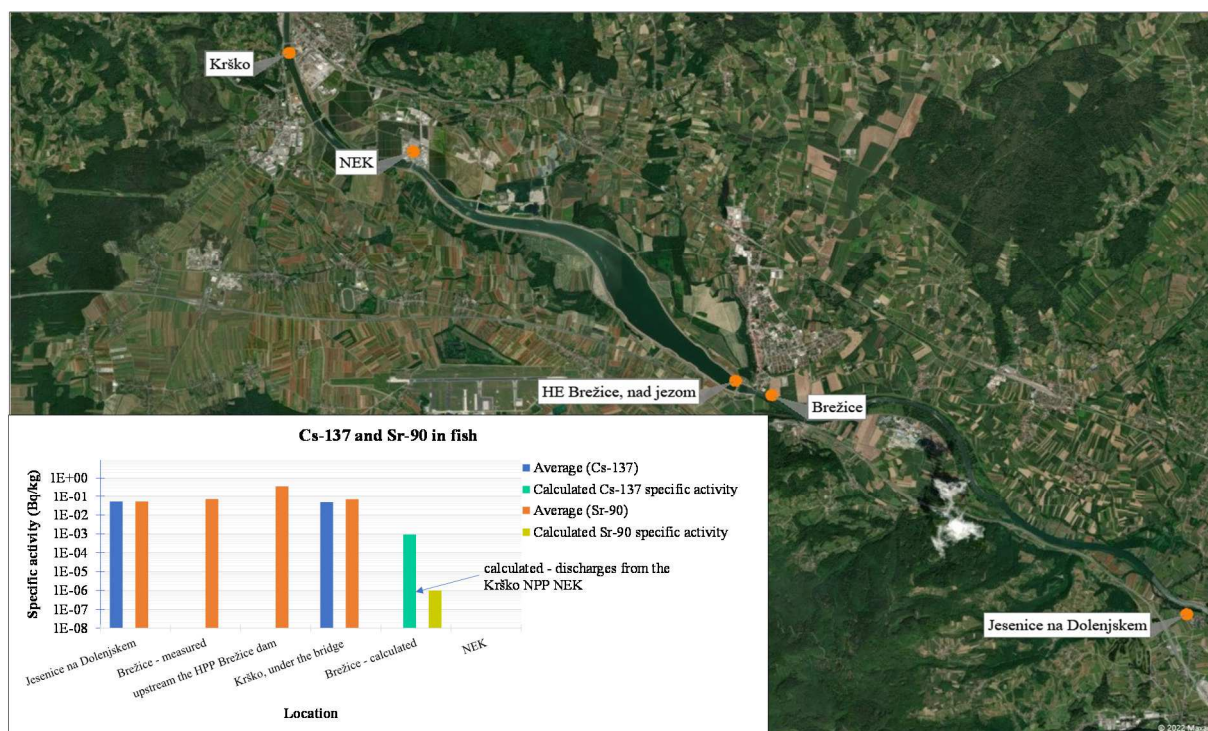


Figure I4: Specific activities of Cs-137 and Sr-90 in fish samples in 2022. The scale is logarithmic.

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

The concentration of tritium in drinking water in the vicinity of Krško NPP is in the same order of magnitude as elsewhere in Slovenia. The values in Brege and Spodnji Stari Grad 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 values⁶. 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 [19].

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.

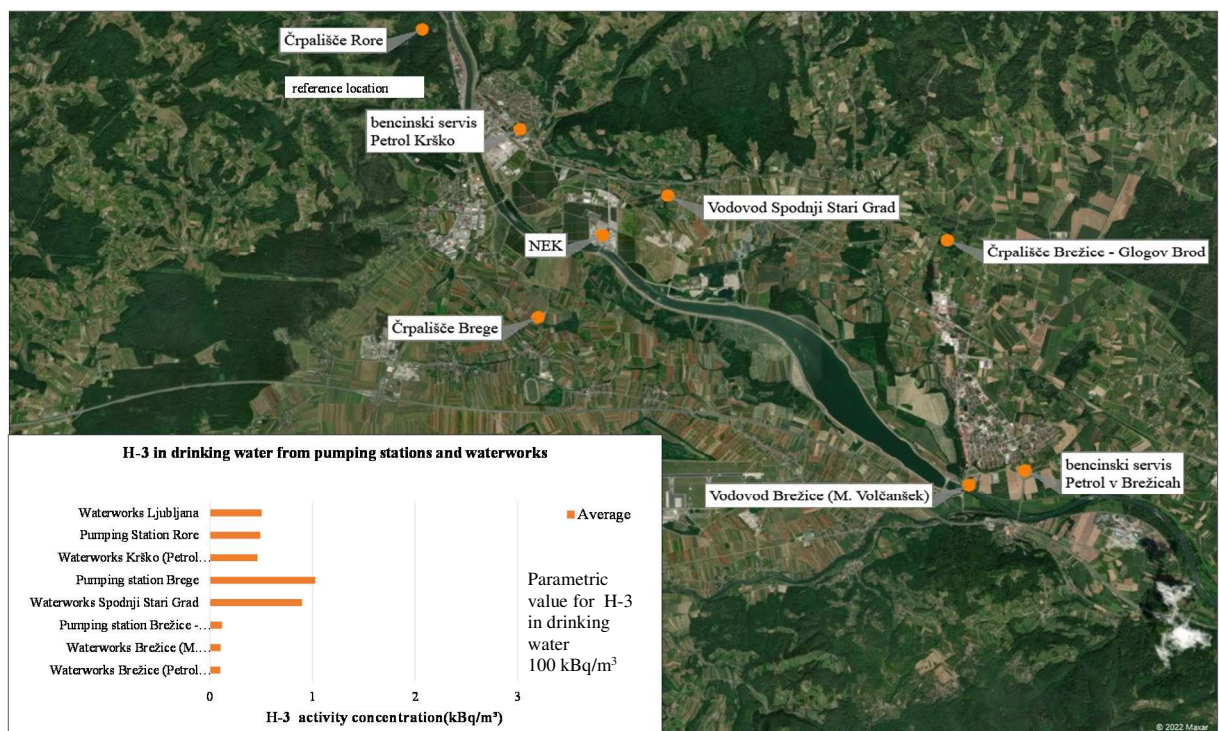


Figure I5: Review of average activity concentrations of H-3 in drinking water from pumping stations and waterworks in the municipalities of Krško and Brežice at locations where they are sampled continuously or quarterly. The activity concentration of H-3 measured at the reference location (Ljubljana)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

⁶ 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.

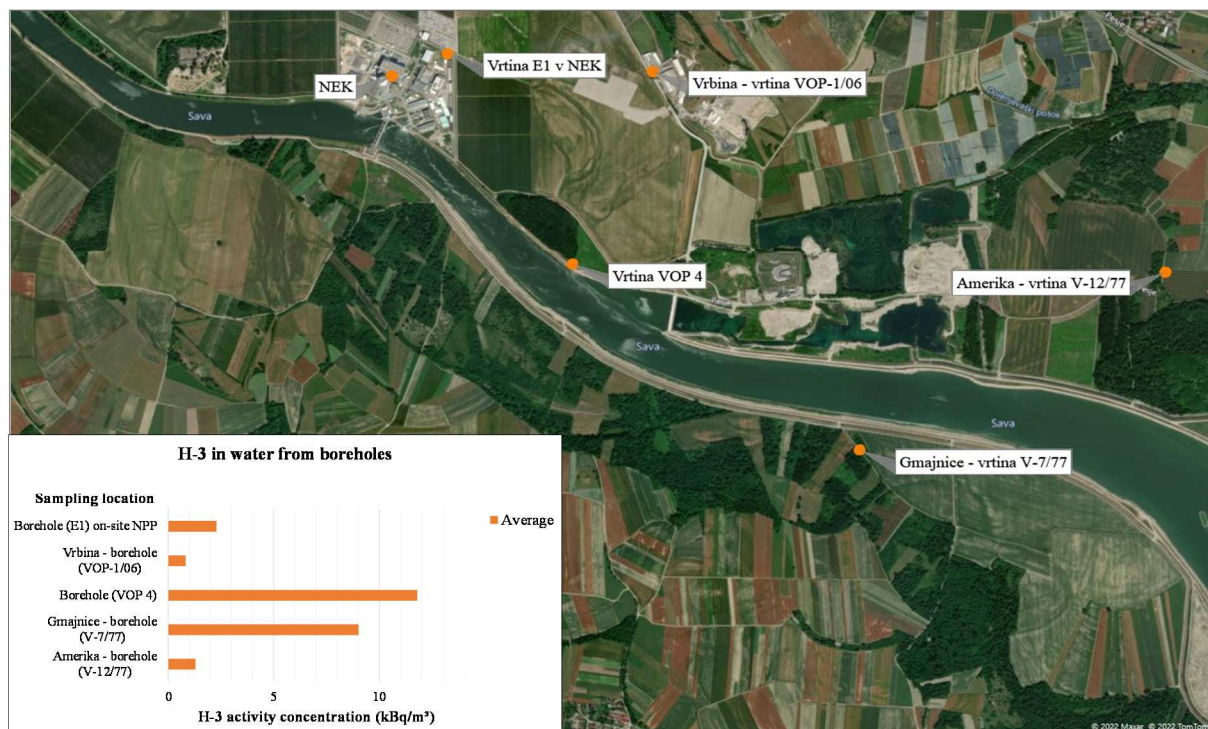


Figure I6: Review of monthly averages of activity concentrations of H-3 in water from the boreholes. The water from the boreholes is not used as drinking water or process water, but only for tracking liquid discharges from the Krško NPP.

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 51 Bq/m³, in the Spodnji Stari Grad water supply 45 Bq/m³, both comparable to 2021, and lower than in 2019 and 2020. In the other pumping stations and water supplies, the average activity concentration of K-40 was 23 Bq/m³, which is, within statistical data scattering, the same as in 2019, 2020, and 2021. We assume that in the Krško-Brežice field, the use of fertilisers in agricultural areas above the aquifer zones is changing [47] and with that also the direct influence of precipitation and higher water levels of the Sava river.

For all sampling points of the Krško and Brežice water supply, the average monthly activity concentrations of natural U-238 are low, with the highest monthly average measured at the Brežice pumping station, 3.0 Bq/m³. The average monthly activity concentrations of Ra-226 ranged from 0.5 Bq/m³ (Brežice pumping station) to 3.2 Bq/m³ (Rore pumping station). The average monthly activity concentrations of Pb-210 ranged from 1.3 Bq/m³ in water from Brežice water supply to 8.1 Bq/m³ in water from the Brežice pumping station. In Ljubljana, the activity concentration of Pb-210 was 7.4 Bq/m³. The average monthly activity concentration of Ra-228 in the Brežice pumping station was 0.2 Bq/m³ and in Brege pumping station 1.0 Bq/m³. The average monthly activity concentrations of Th-232 ranged from 0.3 Bq/m³ (Brežice pumping station) to 0.7 Bq/m³ (Brege pumping station). Be-7 was occasionally detected in all pumping stations and water supply systems in Krško and Brežice. The average monthly concentration of Be-7 was 0.7 Bq/m³ in the Brežice pumping station, while the highest average was 3.7 Bq/m³ in the Spodnji Stari Grad water supply.

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

In 2022, the annual precipitation in Ljubljana was 1 264 mm, in Krško 1 038 mm, in Brege 910 mm and in Dobova 888 mm. The annual precipitation in the vicinity of the Krško NPP in 2022 was 25 % lower than in Ljubljana. The rainfall amounts by location are comparable to recent years within the range of the data scatter. The annual precipitation spread is ± 125 mm in Ljubljana and 66 mm in the vicinity of the Krško NPP. The variation in precipitation by month is even more pronounced. Dry months occur practically every year, but not always at the same time of year.

The activity concentration of tritium in precipitation fluctuates considerably and only activity concentrations above 2 kBq/m^3 could be attributed to the Krško NPP atmospheric discharges [53]. In 2022, tritium activity concentration in precipitation was higher than 2 kBq/m^3 ten times, eight times at Brege and once in Krško, in March, and in Dobova in August. The average monthly activity concentrations of H-3 in precipitation are shown in Figure I7.

The effect of the NPP on tritium activity concentrations in precipitation in the immediate vicinity of the plant can be seen by comparing the annual averages, which are higher each year at Brege and Krško (Stara Vas) than in Dobova and Ljubljana. Tritium activity concentrations at Brege were higher than average in spring and autumn, consistent with air emissions being the highest of the year. The correlation between air emissions and measured H-3 activity concentrations was detected at all sampling sites in the vicinity of NEK this year.

The highest monthly fallout of H-3 0.4 kBq/m^2 was measured at Brege, in November. The values and time courses of fallout for Ljubljana, Dobovo and Krško are comparable within the scattering of the data, the peaks occurring in months with more precipitation. The time course for Brege is different from the others and shows the effect of the power plant on fallout. The peaks follow the months with the highest rainfall in spring, whereas there is no such correlation in autumn.

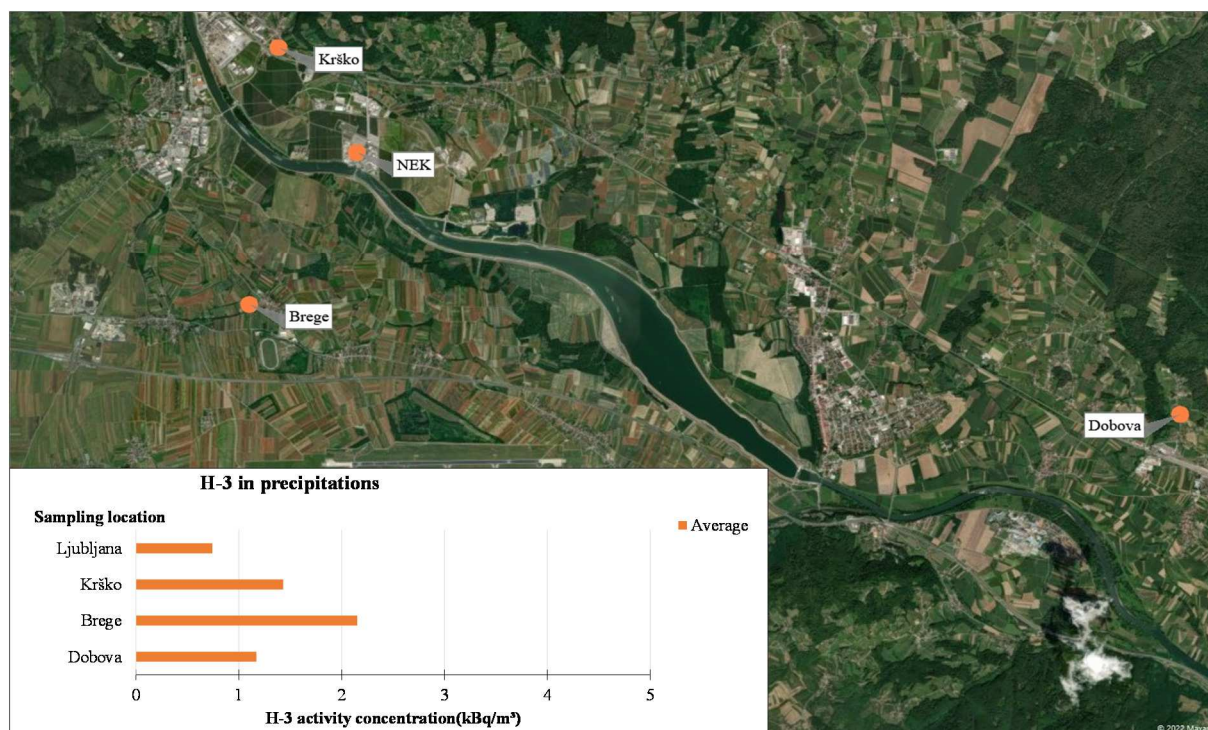


Figure I7: Review of monthly averages of activity concentrations of H-3 in precipitation at sampling locations in the vicinity of the Krško NPP. The activity concentration of H-3 obtained at the reference location (Ljubljana) is compared with values in the vicinity of the Krško NPP.



The highest measured precipitation Cs-137 levels were 0.06 Bq/m² in Ljubljana in August, 0.07 Bq/m² in Brega in May, 0.01 Bq/m² in Krško in June and 0.01 Bq/m² in Dobova in May, in all cases with low or low precipitation. In these cases, the increase is attributed to the resuspension of particles from the soil and, in winter months, to the burning of solid fuels. The fallout at all sampling locations is comparable to the pre-Chornobyl values between 1982 and 1985.

Also in 2022, Sr-90 was not considered separately as all measured values were below the detection limit and thus the impact of the Krško NPP on the environment due to Sr-90 atmospheric discharges cannot be assessed.

4) Air (*abstract from the chapter Zrak*)

Although tritium H-3 (5 TBq) and C-14 (0.09 TBq) are the most abundant radioisotopes in air emissions from Krško NPP, they are not measured in the environment or are not part of the measurement programme (aerosol samples). Their presence in the environment is assessed using an air dispersion model based on measurements of their activities at the source.

During operation, I-131, Co-58, Co-60, Se-75, Nb-95, Ag-110m, Te-127m, Cs-137 and Sr-90 were detected in the Krško NPP atmospheric effluents in 2022, but with the exception of the last two, those radionuclides were not detected at any of the seven sampling points in the vicinity of the Krško NPP and in Ljubljana. Cs-137 and Sr-90 in the environment are mainly due to global contamination, since their calculated activity concentrations are at least three orders of magnitude lower than the measured values at the sampling sites.

The average monthly activity concentrations of Cs-137 at sampling points in the vicinity of Krško NPP in 2022 were lower than the long-term averages at the same sampling points and half of the average elsewhere in Slovenia. The presence of Cs-137 in the air is assumed to result from the use of solid fuels (wood, briquettes, pellets) and, to a lesser extent, from the resuspension of dust particles from the ground. Figure I8 provides an overview of Cs-137 activity concentrations at sampling locations in the vicinity of the Krško NPP. For comparison, in the legend of the Figure I8, the value for Ljubljana sampling location is added. The scale is logarithmic.

Measurements of strontium Sr-90 in the environment are carried out in three-monthly composite samples. The average activity concentration at Stara vas was 2.0 E-4 mBq/m³. All measurement results were below the detection limit. The radionuclide Sr-89 was not detected in Krško NPP atmospheric discharges in 2022.

Radionuclide I-131 was not detected in 2022 at any of the seven sampling sites in the vicinity of Krško NPP where combined pumps (aerosol filters, charcoal filters) are installed. The more powerful aerosol pumps at Dobova (monitoring of ambient radioactivity around Krško NPP) and Ljubljana (monitoring of radioactivity in living environment in the RS) also did not detect the presence of I-131 in the air.

Measurements of natural radionuclides in aerosol samples from the vicinity of the Krško NPP indicate the presence of radionuclides that are also measured in monitoring measurements at other sites in Slovenia. In this respect, the average activity concentrations of Be-7 and Pb-210 in 2022 are considered to be in good agreement within the uncertainty of the mean at all measurement sites in the vicinity of the Krško NPP and Ljubljana. The average activity concentration of Be-7 in 2022 in the vicinity of the Krško NPP was 3.1 mBq/m³ and of Pb-210 was 0.5 mBq/m³. In Ljubljana the average concentrations were 4.2 mBq/m³ and 0.8 mBq/m³. For cosmogenic Be-7, we note that within the uncertainty of the averages, comparable values were measured at all sampling sites in the vicinity of the Krško NPP, Murska Sobota and Ljubljana, with the exception of Predmeja, where the values are an order of magnitude higher, which is most likely a feature of the well-ventilated site and the consequent higher air concentrations. This finding is expected especially for sites with similar rainfall regimes and correspondingly similar aerosol scavenging from the atmosphere and transport of air masses from the upper to the lower layers of the atmosphere.

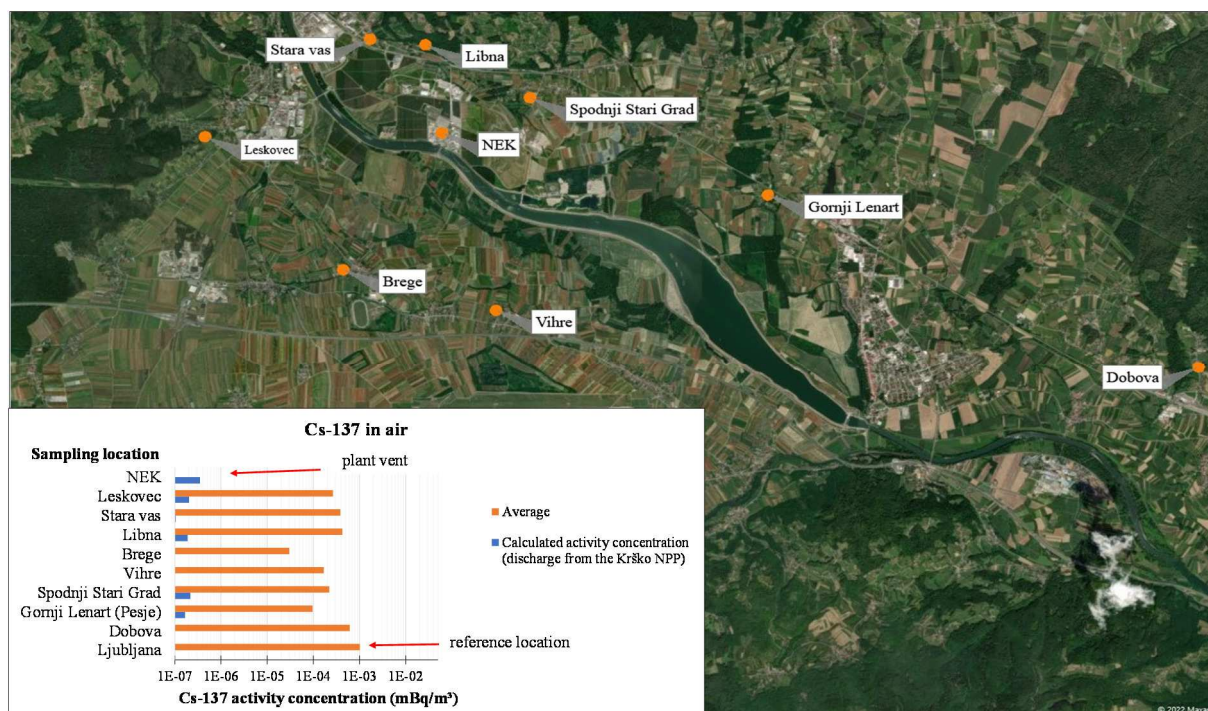


Figure I8: Review of monthly averages and calculated (estimated) activity concentrations of Cs-137 in air in the vicinity of the Krško NPP. The scale is logarithmic. The activity concentration of Cs-137 obtained at the reference location (Ljubljana) is compared with values in the vicinity of the Krško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

For other natural radionuclides (uranium and thorium decay chain isotopes, K-40), the differences between sampling locations in the vicinity of the NPP were larger. They can be attributed to the different soil composition, the proximity of the cultivated fields, neglecting radon exhalation in the Ra-226 measurements for the samples from Predmeja and Murska Sobota and the use of aerosol pumps with different flow-rates. The measurements of radionuclide activity concentrations in aerosols in Ljubljana serve as a reference in the comparisons due to the most powerful pump used.

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

External radiation

External radiation to which the representative person in the vicinity of the Krško NPP is exposed includes cosmic radiation, radiation of natural radionuclides (mainly radon daughter products) in the atmosphere, radiation from a radioactive cloud upon release of radioactive effluents from the Krško NPP stack into the environment and external radiation due to fallout following cloud passage as well as to natural and artificial radionuclides in the soil. Since environmental TLDs do not measure the dose of the neutron component of cosmic radiation, we calculated it using the EXPACS program ([73], [74], [75]). The program allows the calculation of the ambient dose equivalent resulting from individual cosmic radiation components including the neutron component for any longitude and latitude. The TL dosimeters from the network thus measure the total external radiation dose of gamma emitters of natural radionuclides, ionizing cosmic radiation components and the contribution of global Cs-137 contamination.

Figure I9 shows the average annual ambient dose equivalent $H^*(10)$ in 2022 in the vicinity of the Krško NPP, at the Krško NPP fence perimeter, in environment in Republic of Slovenia and in Republic of Croatia. The measured annual ambient dose equivalents do not deviate from the long-term average at individual sites within the spillover. The lowest annual $H^*(10)$ is at the NPP fence, as this is gravel soil with the topsoil removed. The asphalted surfaces and buildings within the the Krško NPP fence further



attenuate the external radiation from the land. As part of the pre-development monitoring for the dry storage facility, seven dosimeters were installed along the western NEK fence in June 2020. The average annual ambient dose equivalent in 2022 was (0.60 ± 0.02) mSv, which, within the uncertainty of the measurements, is comparable to the annual dose equivalent measured by the TLD on the the Krško NPP fence. This indicates that the contribution of the Krško NPP to the ambient dose rate due to radiation from the Krško NPP facilities is negligible and unmeasurable.

Measurements show that the average annual ambient dose equivalent in the vicinity of the Krško NPP is systematically slightly lower than in the environment in Slovenia. We attribute this to the diversity of the Slovenian landscape, orography, soil composition and texture, snow cover thickness, uneven Cs-137 fallout after the accident at the Chornobyl nuclear reactor, and other effects which may affect the external radiation dose. In addition, local peculiarities regarding the type of the ground where dosimeters are posted (meadow, agriculture area, forest, asphalted surfaces, proximity of buildings, soil temperature, etc.) contribute to the fluctuations of effective doses measured by TLD at nearby locations. Figure I10 shows the isodoses⁷ of $H^*(10)$ on the map of Slovenia. The area in the vicinity of the Krško NPP is enlarged.

Continuous measurements of $H^*(10)$ with 14 MFM meters in the vicinity of Krško NPP in 2022 gave an average value of (0.83 ± 0.15) mSv per year (ranging from 0.57 mSv to 1.04 mSv), which is the same as the annual dose equivalent obtained with the TL dosimeters within the range of the scatter of the measurement values.

The average annual ambient dose equivalent from the 60 dose meters under the supervision of the SNSA in 2022 was (0.88 ± 0.15) mSv, ranging from 0.60 mSv to 1.29 mSv. The average annual ambient dose equivalent measured by the 60 MFMs is the same as the TLD measurements in the Slovenian area in terms of benchmark fluctuation. No statistical deviations are observed when compared to previous years.

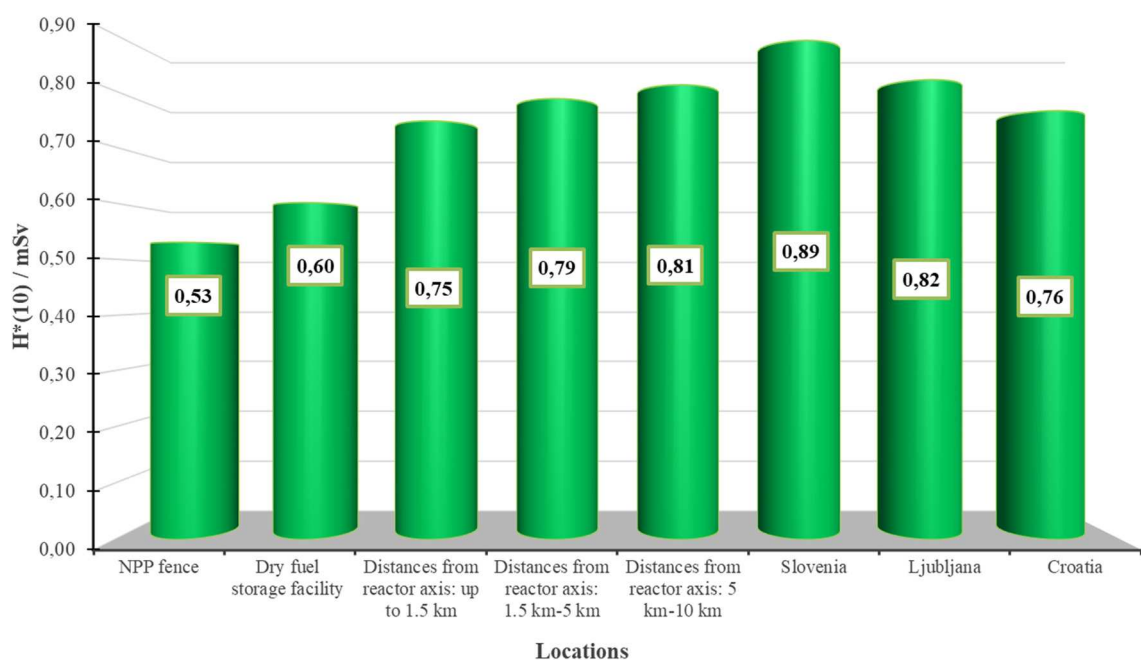


Figure I9: Comparison between average ambient dose equivalents, $H^*(10)$ measured in the environment in the vicinity of the Krško NPP, fence perimeter, at the reference location in Ljubljana, the average ambient dose equivalents measured in environments in Croatia and Slovenia.

⁷ Isodoses are curves connecting points with the same annual ambient dose equivalents, $H^*(10)$

External radiation measurements in Slovenia are in all cases characterised by a marked decrease in the annual ambient dose equivalent, especially in the first years after the Chernobyl accident (1986). This trend continues in 2022. 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 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 0.008 mSv and 0.025 mSv. This is comparable to the values at sites where soil is sampled in the framework of radioactivity monitoring in the Republic of Slovenia. There, the estimated annual $H^*(10)$ doses are in the range 0.022 mSv to 0.064 mSv.

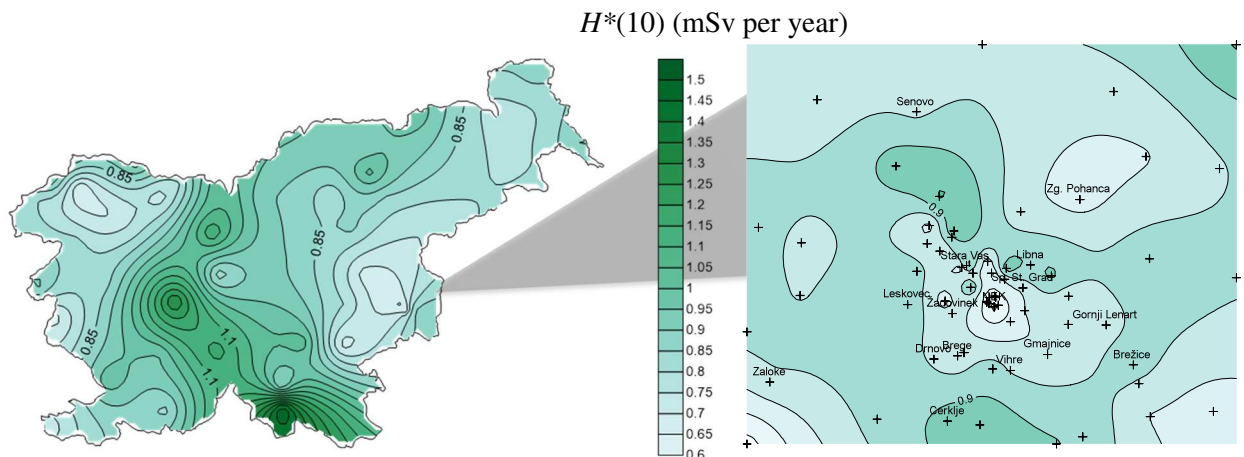


Figure I10: Average annual ambient dose equivalent $H^*(10)$ in Slovenia and in the vicinity of the Krško NPP in 2022

Soil

Soil sampling is carried out in flood-prone areas, where aerial deposition and flooding are the exposure pathways through which Krško NPP discharges can reach the sampling points.

The specific activities of Cs-137 in soil in 2022 ranged from 1.2 Bq/kg at depths of 15–30 cm to 41 Bq/kg at a depth of 5–10 cm at Gmajnice. From the measurement results, it is clear that there is considerable scatter of the specific Cs-137 activities at the microlocation from one year to the next. The fluctuations in the values can be attributed to the inhomogeneity of the fresh deposition after the Chernobyl accident and redistribution of the fallout at the microlocation. The redistribution is due to hydrogeological processes influencing the migration of Cs-137 downward into the soil. This conclusion can be supported by the observed shift in the centre of gravity of the deposition at the Kusova Vrbina site. The two distinct peaks in the depth of the centre of gravity are clearly the result of flooding, which caused additional deposition of fresh sand. This is also the reason why the migration of Cs-137 into the soil is apparently 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 in the vicinity of the Krško NPP: for comparison, fallouts at three sites in Slovenia are added. We can observe that the fallouts in the vicinity of the Krško NPP are lower than over Slovenia.

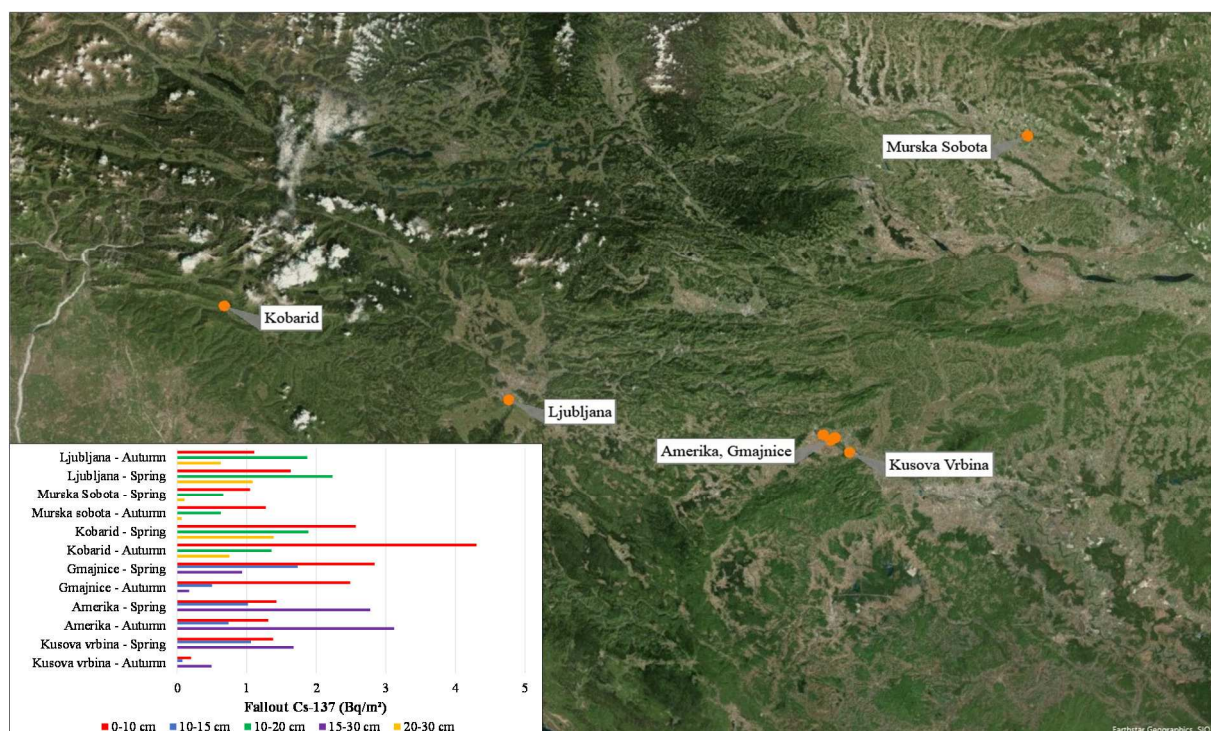


Figure I11: Fallout of Cs-137 in Slovenia (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) and in the vicinity of the Krško NPP (Gmajnice, Amerika, Kusova Vrbina) in 2022

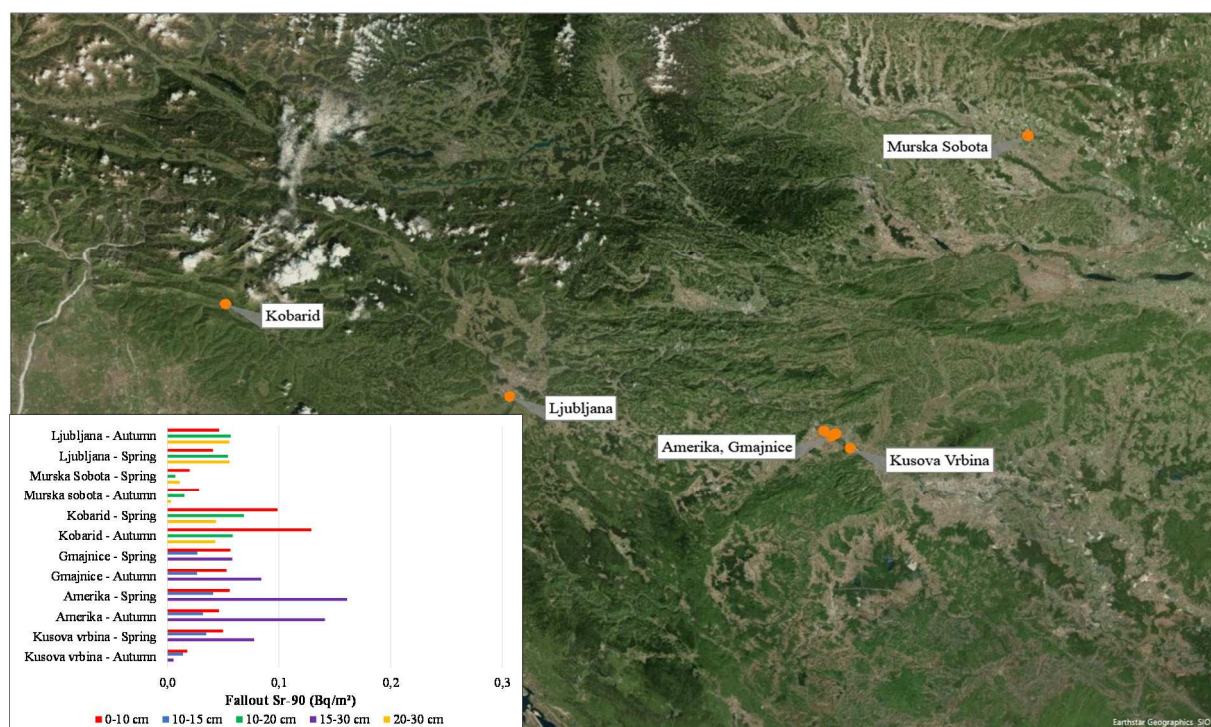


Figure I12: Fallout of Sr-90 in Slovenia (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) and in the vicinity of the Krško NPP (Gmajnice, Amerika, Kusova Vrbina) in 2022



The Co-58, Co-60, Se-75, Ag-119m, in Cs-137 that are detected in the atmospheric discharges from the Krško NPP, were not detected in the soil. Also, none of the radionuclides present in the liquid effluents were detected in soil samples. The exception is Cs-137, for which the specific activities measured at sites around Krško NPP compared to the values at the reference site in Ljubljana (and Slovenia) indicate that it is not due to Krško NPP discharges, but only due to global contamination.

The natural radionuclides, the progeny of the uranium and thorium decay chains and K-40 are evenly distributed in the soil, with the exception of Pb-210, which is deposited from the air as the progeny of Rn-222. The progeny of the thorium decay chain, Ra-228 and Th-232, are in equilibrium at all depths and at all locations. U-238 and Ra-226 are not in equilibrium because uranium is more soluble in water than radium and therefore easily leached. The results of the measurements show that the specific activities of the progeny of the uranium and radium decay species and K-40 are lower in locations subject to regular flooding. The results of the measurements of the specific activities of natural radionuclides in soil (K-40, U-238, Ra-226, Ra-228, Th-232) are in agreement with average specific activities reported by UNSCEAR for the countries of southern Europe [40].

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

In food, we did not detect any radionuclides that are present in either atmospheric or liquid discharges from the NPP. The exceptions are Cs-137 and Sr-90, which are mainly of cosmogenic or global contamination origin. Measurements of specific activities of tritium (in forms of OBT-Organically Bound Tritium or TFWT-Tissue Free Water Tritium) in food are not part of the environmental radioactivity monitoring programme in the vicinity of the Krško NPP. A study to estimate the content of organically bound tritium in vegetation was carried out in 2022 [23].

C-14 is incorporated into plants through photosynthesis, and is mainly taken up by animals and humans by ingestion of plants. In 2022, specific activities of C-14 were measured in maize and wheat in July and September. There are no statistically significant differences between the averages of C-14 in food and vegetation measured in July and September at the same locations. The highest measured specific activity of C-14, (307 ± 1) Bq per kg of carbon, was measured in maize in July (Sampling point J, Vrbina-Waste disposal) [19].

The calculated specific activities of radionuclides that entered the environment after atmospheric emissions from the Krško NPP are at least five orders of magnitude lower than the measured specific activities in food. This explains why the levels of Cs-137 and Sr-90 in food are attributed to global contamination. Specific activities of radionuclides in food in the vicinity of the Krško NPP and elsewhere in Slovenia vary greatly as a consequence of uneven global contamination, orography, soil composition and other surface characteristics of the Republic of Slovenia. Within the range of uncertainties of averages for groups of foodstuff, specific activities of Cs-137 and Sr-90 measured in the food from the vicinity of the Krško NPP and Slovenia are similar.

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 2022, specific activity of K-40 in food produced in the Krško-Brežice field ranged from 32 Bq/kg (strawberries) to 208 Bq/kg (parsley), and in food sampled elsewhere in Slovenia from 29 Bq/kg (blueberries) to 463 Bq/kg (beans). In the vicinity of the NPP, leafy vegetables and fruit vegetables belong to the group with higher specific K-40 activity, while milk and fruit belong to the group of foods with lower K-40 activity.



DOSE ESTIMATE

Activity concentrations of the radionuclides, with the exception of H-3, released with the operation of the nuclear power plant in Krško, into the environment remain well below the detection limits or inseparable from the background (C-14, Cs-137). So, their impact on humans and the environment is indirectly assessed from data on atmospheric and liquid discharges. Representative person's exposure is assessed using models describing the dispersion of radionuclides through various exposure pathways in the environment.

The concept of the representative person is used to assess the effects of ionising radiation on the population that could result from discharges from a nuclear facility. The representative person is a hypothetical (theoretical) person of the population, which, because of lifestyle and diet, receives or could receive the highest radiation effective doses from a particular radionuclide exposure pathway in the environment.

Liquid effluents (Tables B1, B2, B3)

The radiation effects on the population and environment considering the Sava exposure route is assessed by comparing the results of the emission measurements (measurements of samples from the waste measuring tanks - WMTs - and Steam Generator Blowdown - SGBDs) carried out by the Krško NPP laboratories and the results of the measurements of samples from the Sava River. A methodology and model for the estimation of the effective doses to the population was developed in 2003 [25] and revised in 2009 (Exposure of a reference population to radiation from the Krško NPP liquid discharges into the Sava River - New reference site [26]). The methodology identifies Slovenia and Croatia's main transport pathways, exposure pathways, and representative persons.

Tables B1 and B2 show the dose estimates due to the liquid effluents obtained by a model calculation. These are based on the inventory of liquid discharges, data of the annual flow-rate of the Sava river, and taking into account the characteristics of two representative groups of population (ie fishermen fishing in the lake up to 350 m downstream of the NPP dam and fishermen catching fish near the location for continuous sampling of river water in Brežice). From Tables B1 and B2 we can conclude that the annual effective doses for an adult representative person at 350 m downstream of the NPP dam, and at Brežice are 0.045%, and 0.021 % of the authorized dose limit, respectively.

Table B1: Estimated annual effective dose of an representative person at a location 350 m downstream the NPP dam in 2022

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	groundshine (river sediment)	Co-60	2.7 E-6
Internal exposure	Ingestion (fish)	C-14	2.0 E-5

Table B2: Estimated annual effective dose of an representative person at Brežice in 2022

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	groundshine (river sediment)	Co-60	1.3 E-6
Internal exposure	Ingestion (fish)	C-14	9.4 E-6

If the average habit characteristics of the representative persons were taken into account, the effective doses received by those individuals would even be several times lower than those stated above. Thus, H-3 (57 %) contributes the most to the total effective dose, with fish ingestion the predominating exposure pathway. From the measurement results of C-14 in the Sava river and fish, we find that the specific activities of C-14 in water and fish are the same as the natural background (global contamination). For a person standing a given time at the shoreline, the predominant contribution is the external radiation from Co-60 and Co-58 (97 %). In case of drinking Sava water – an unlikely exposure pathway – the contribution of H-3 (100 %) would prevail.

The construction of the Brežice hydroelectric power station and the reservoir's creation has led to changes in the exposure pathways of population exposure. For comparison with the valid model, a dose assessment of the radiation effects according to a new methodology was also carried out. The new methodology was developed in the framework of the project task *Vpliv HE Brežice na NEK in Poročilo o vplivih na okolje za podaljšanje obratovalne dobe NEK* [32]. 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 NPP on the population and the surrounding environment has been proposed. All legislative acts and international guidelines and recommendations have been taken into account.

For the theoretical prediction of mixing and dilution, the three-dimensional hydrodynamic transport model PCFLOW3D ([29], [30], [31], [36]), 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.

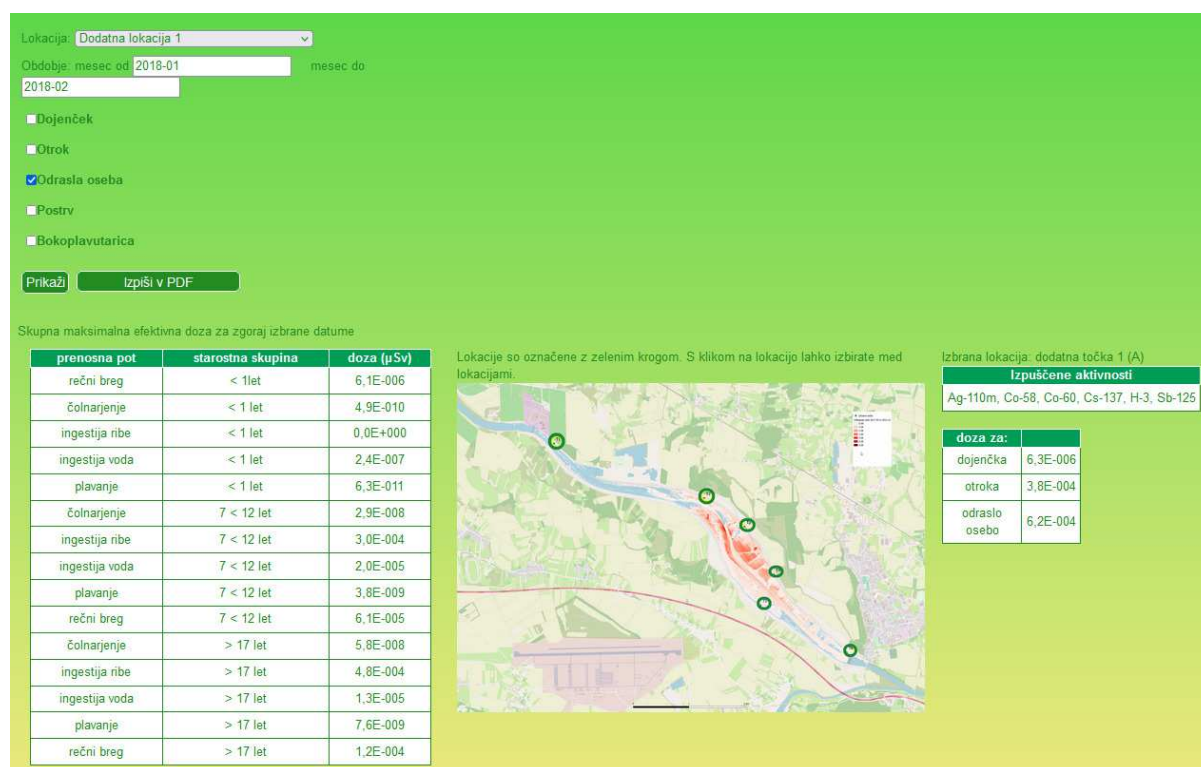


Figure I13: Example of calculated effective doses in the software - DOSENEK [32].



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 River, dilution coefficients were estimated in the surface layer (0 m to 1 m) and the layer from 1 m to 2 m and at a 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 based on 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
- T4: left bank of the Brežice HPP accumulation lake
- T5: additional site 2
- 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 *Radioaktivnost v reki Savi* chapter. For points T1 (350 m downstream from the Krško NPP) and T2, there is no staying on the river bank, no ingestion of water and no swimming, so there are only



two exposure pathways. At T7, we have only one exposure pathway, as there is no boating. At T3, all five routes of exposure are considered, so we suggest that the dose assessment of the radiation effects of Krško NPP on the population is calculated for this location. For an adult, Table B3 lists the effective doses received by individual exposure pathways for radionuclides detected in liquid discharges at site T3 in the accumulation of the Brežice HPP.

Table B3: Average annual radionuclide activity concentrations (Bq/m³) and annual doses received (μSv) for an adult for all five exposure pathways at point T3 in the accumulation lake of the Brežice HPP. The maximum effective doses for each exposure pathway are bolded.

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)
Ag-110m	2,0E-03	1,9E-05	8,6E-08	1,1E-09	2,6E-08	2,0E-07	1,9E-05
C-14	5,4E-02	2,8E-08	4,5E-04	6,0E-09	1,0E-12	0,0E+00	4,5E-04
Co-58	5,4E-03	8,9E-04	3,9E-06	7,5E-10	2,4E-08	1,9E-07	8,9E-04
Co-60	6,3E-03	2,6E-03	2,1E-05	4,0E-09	7,4E-08	5,5E-07	2,6E-03
Cs-137	1,5E-03	2,7E-05	2,3E-04	3,7E-09	4,0E-09	3,1E-08	2,6E-04
Fe-55	3,3E-03	0,0E+00	9,6E-07	2,1E-10	0,0E+00	0,0E+00	9,6E-07
H-3	2,5E+04	0,0E+00	2,9E-03	8,4E-05	0,0E+00	0,0E+00	3,0E-03
Mn-54	9,7E-06	2,0E-06	5,2E-09	1,3E-12	3,7E-11	2,9E-10	2,0E-06
Sb-125	1,0E-03	3,9E-06	7,4E-07	2,2E-10	1,9E-09	1,7E-08	4,7E-06
Sr-90	6,1E-05	2,1E-07	6,2E-07	3,3E-10	3,8E-14	0,0E+00	8,3E-07
Total effective dose (exposure pathway)		3,5E-03	3,6E-03	8,4E-05	1,3E-07	9,8E-07	7,3E-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 2022 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 demand 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 are 0.2 % of the prescribed limit of 0.050 mSv, while the contribution at Lower Stari Grad is 0.02 % of the prescribed limit.

Table C1: Exposure of an adult resident in Spodnji Stari Grad to ionizing radiation from atmospheric discharges from NPP in 2022

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)	1.7 E–7 1.1 E–12
Internal exposure	inhalation	H-3, C-14	8.7 E–6
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 2022. 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)	4.1 E–7 1.6 E–11
Internal exposure	inhalation	H-3, C-14	1.9 E–5
Internal exposure	ingestion	C-14	8 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 needs for calculations the velocity of the exhaust gases and the cross section of the stack at the outlet. After the 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 2022 atmospheric discharges is comparable, within the range of data scattering, to results of previous years.

C-14 measurements in 2022 were carried out on wheat, maize, pear and apple samples at the Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia. The results of the measurements show an expected slight increase of the specific activity of C-14 in samples within 1 km from the reactor axis compared to samples taken at the Dobova reference point. The estimated annual effective dose due to ingestion of C-14 is thus 8.0 E–5 mSv higher in the vicinity of the NPP (up to 1 km) than at the Dobova control point. In calculating the effective dose from C-14 in the vicinity of the NPP, we conservatively assumed that the representative person consumes food from the immediate vicinity of the NPP (near the edge of the exclusion zone) for two months of the year and food from elsewhere (Dobova) for the other 10 months. It follows that even in the case of dose calculations due to C-14, we take into account that the representative person consumes food produced in the Krško-Brešice 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, whereas for other radionuclides this is not possible due to different sampling methods. The C-14 dose refers to the food and not to the individual food type, as the specific activities of C-14 (in Bq per kg of carbon) do not differ between 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 releases 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 2022, organically bound tritium (OBT) was also analysed in vegetation. The measurements were carried out at the IRB [23]. The activity concentrations in all measured vegetation samples (maize and apples) ranged from (0.8 ± 0.6) Bq/L at the control site in Dobova to (28.5 ± 0.6) Bq/L at the NPP western fence (site J). The measured values are below 100 Bq/L, the European Commission recommended level for H-3 in drinking water. The effective per a representative person due to OBT in food is negligible from a biological point of view (less than $2.5 \text{ E-}2 \mu\text{Sv}$).

We conclude that all exposures to the general public (different representative persons) were negligible compared to natural radiation, dose constraints and authorised limits.

Natural background (Table D)

Measurements of ambient dose radiation in the vicinity of Krško NPP in 2022 have confirmed past findings that this is a typical natural environment found elsewhere in Slovenia and worldwide. The annual ambient dose equivalent $H^*(10)$ of gamma radiation and the directly ionising component of cosmic radiation in the vicinity of Krško NPP was 0.79 mSv on average outdoors, which is comparable to previous years within range of data scattering. To this estimate, the contribution of $H^*(10)$ for neutron cosmic radiation must be added. For the Krško NPP area it is estimated to 0.09 mSv per year. Thus, the total natural external radiation dose $H^*(10)$ in 2022 in the vicinity of Krško NPP was 0.88 mSv per year. The corresponding annual effective dose (taking into account the conversion factors from Radiation Protection 106 [85]) is 0.74 mSv per year, which is lower than the value for the world average (0.87 mSv per year). As part of the monitoring of radioactivity in the living environment of Republic of Slovenia in the 2022 [14], where the effective dose of external radiation is measured by 50 dosimeters distributed throughout Slovenia (see chapter *Zunanje sevanje*), it was estimated to 0.89 mSv.

Table D: Effective doses E due to natural radiation sources in the vicinity of Krško NPP in 2022

Source		Annual effective dose E (mSv)
– gamma radiation and the directly ionizing component of cosmic radiation [#]		0.66
– neutron component of cosmic radiation [40]		0.08
Ingestion (natural radionuclides) ([40], effective dose) ^{##}		0.27
Inhalation	1,3	1.3
	0,04	0.04
Total		2.35

Notes: [#] Estimate of the effective dose of external radiation from the ambient dose equivalent of $H^*(10)$ using the conversion factor $E/H^*(10) = 0.84$ for 600 keV photons (Radiation Protection 106 [85]).
Conversion factors in the 100 keV to 6 MeV energy range are between 0.84 and 0.89.

^{##} From Chapter in this Book *Radionuklidi v hrani*

^{###} A typical contribution of radon short-lived daughter isotopes to the effective dose was discussed in the report for 2000 (IJS-DP-8340, #3, page 7).

^{####} From Chapter in this Book *Zrak*



The specific activities of natural radionuclides in food in the vicinity of the NPP are comparable to the average values in Slovenia and worldwide. The effective dose to a reference person in the vicinity of the Krško NPP was estimated to be 0.26 mSv. This value is comparable to the effective dose 0.27 mSv due to food intake from (UNSCEAR [40]). In the framework of the monitoring of radioactivity in the living environment in Slovenia in 2022 [14], the effective dose of Pb-210 for ingestion was estimated to 0.040 mSv. Assuming that Pb-210 contributes 25 % to the total effective dose (see chapter *Radionuklidi v hrani*), a rough estimate of the effective dose due to food ingestion can be made at 0.16 mSv. This value is higher than the estimate of the effective dose due to ingestion in the Krško NPP area. It is important to note that different types of food are sampled in the vicinity of the NPP and across Slovenia. In addition, different methodologies for evaluating food consumption were taken into account. The methodology used in this report is based on a realistic estimate of consumption by age group based on a consumer's basket ([83], [84]). The data on food consumption by age group were prepared for the IJS by the National Institute of Public Health (NIJZ). Field data collection took place in 2017 and 2018. This approach is better than the one used by Statistical Office of Slovenia (SURS), which is based on the purchase of goods per household member (more suitable for evaluating economic indicators). As the proportion of unconsumed food is not negligible, we consider that the NIJZ approach is more appropriate and realistic.

The typical contribution of short-lived radon progeny to the effective dose 1.3 mSv was estimated in the 2000 report (IJS-DP-8340, #3 on page 7. The estimate is valid for the vicinity of The Krško NPP and Slovenia.

The individual contributions to the natural radiation dose are summarised in Table D. The total annual effective dose is estimated to be 2.35 mSv, which is the same as the average over the last 10 years of 2.35 mSv and the global average of 2.4 mSv per year within the range of fluctuations [40].

Natural radionuclides

The measured activities of natural radionuclides (uranium and thorium chains, K-40, Be-7) do not differ significantly from those measured in other parts of Slovenia and from those reported in the literature. This is true for the Sava river, groundwater, water supplies and sediments, as well as for air and food. It is also true that the values are comparable with those of previous years.

Global contamination

In 2022, as in previous years, Cs-137 and Sr-90, originating from the Chornobyl 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 2022.

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 $1 \text{ E-}7$ mSv per year.

Cs-137 and Sr-90 from nuclear tests and the Chornobyl accident have been measured in trace amounts in various individual foodstuffs. The annual effective dose from ingestion of these foods was estimated for 2022 at $1.4 \text{ E-}4$ mSv for Cs-137 and $2.1 \text{ E-}4$ mSv for Sr-90, totalling to 0.3 % 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 entered the food chain naturally and as a result of above-ground nuclear testing in the 1960s.

Summary of annual exposures of the representative person in the vicinity of Krško NPP for 2022 (Table E)

In Table E the contributions to the annual effective dose from Krško NPP emissions in 2022 for an adult representative person at the Krško NPP fence are listed. The estimates are also indicative for a distance of



500 m from the reactor axis. The exception is the dose from external radiation measured by TLDs. During the construction of the facility the topsoil was removed and gravel was piled along the Krško NPP fence, resulting in an average annual ambient dose equivalent in the vicinity of the Krško NPP that is 30 % higher than that at the Krško NPP fence. For this reason, the average ambient dose equivalent for the vicinity of Krško NPP is given here.

Table E: Summary of annual exposures of the representative person in the vicinity of Krško NPP for 2022

Source	Exposure pathway	Annual effective dose (mSv)
Natural radiation	– gamma radiation and the directly ionizing component of cosmic radiation	0.66 ^{**}
	– neutron component of cosmic radiation	0.08
	– ingestion (K, U, Th)	0.27
	– inhalation (Rn-222 short-lived daughters)	1.30
	– inhalation (natural radionuclides (Pb-210))	0.04
	Total natural radiation in the vicinity of the Krško NPP[#]	2.35
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)	4.1 E–7 1.6 E–11 1.9 E–5 8.0 E–5
Krško NPP Liquid effluent (Sava)	– adult representative person at 350 m downstream from the Krško NPP dam	2.3 E–5
	Total radiation effects of the Krško NPP[*]	1.2 E–4
Chornobyl 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 ^{***} 3.5 E–4 1.6 E–2 8.7 E–5
	Total global contamination	3.2 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.

** Estimate of the effective dose of external radiation from the ambient dose equivalent of $H^*(10)$ using the conversion factor $E/H^*(10) = 0.84$ for 600 keV photons (Radiation Protection 106 [85]).

*** This estimate is not based on the assumption that a representative person spends 20 % of the time in the open, and that the shielding factor in the house is 0.1. We take into account that the representative person spends all the time outside. The estimate is conservative.

**** 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.

Summarized according to the Table D.



When the values for atmospheric and liquid discharges are added together, the effect of discharges from Krško NPP on the population (representative person) is significantly below the authorised limit. It should be stressed that these are different representative persons and therefore the summed value is only a rough estimate of the annual effective dose.

Comparison with previous years (Table F)

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 F. the largest contribution in 2022 was due to external radiation - due to 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 F: 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 2022. 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 0.24 % of the authorized dose limit at the border of the Krško NPP exclusion area and beyond.

Contamination medium	Annual effective dose of artificial radionuclides E (mSv)					Location	Remarks
	2017	2018	2019	2020	2022		
River Sava	9,1 E-5 1,5 E-6 7,3 E-4	1,1 E-4 8,3 E-7 1,4 E-4	7 E-5 1,3 E-6 1,9 E-4	1,1E-4 1,1 E-6 9,2 E-5	1,4E-4 1,5 E-6 8,7 E-5	Brežice Brežice Brežice	drinking (H-3) swimming (Cs-137) fish ingestion (Sr-90)
Waterworks, pumping stations	3,5 E-5	2,8 E-5	3,2 E-5	3,1 E-5	1,4 E-5	Brege	drinking (H-3)
Precipitation and dry fallout	2,3 E-5	1,9 E-5	1,8 E-5	1,9 E-5	1,2 E-5	Brege	Ingestion of the vegetation (H-3)
Air	4,6 E-7	4,5 E-7	2,7 E-7	2,1 E-7	9,7 E-8	Location average	Inhalation and imersion (Cs-137, Ru-106 (2017))
External radiation**	0,023	0,015	0,017	0,014	0,014	All locations	(Cs-137)
Food	0,0151	0,0152	0,01485	0,0145	0,0159	At the Krško NPP fence***;	ingestion C-14*
	0,0015	0,0010	0,0016	5,0E-4	3,5E-4	All locations and at the Krško NPP fence***	Sr-90, Cs-137
Total	0,0405	0,0315	0,0338	0,0293	0,032		

* 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. Only measurements from the first half of 2022 were taken into account.



Figure I14 presents the sum of the estimated annual effective doses of the representative persons due to the Krško NPP emissions from 1989 to 2022. 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 2022, the summation gives a value comparable to 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 0.005% of the typical unavoidable natural background.

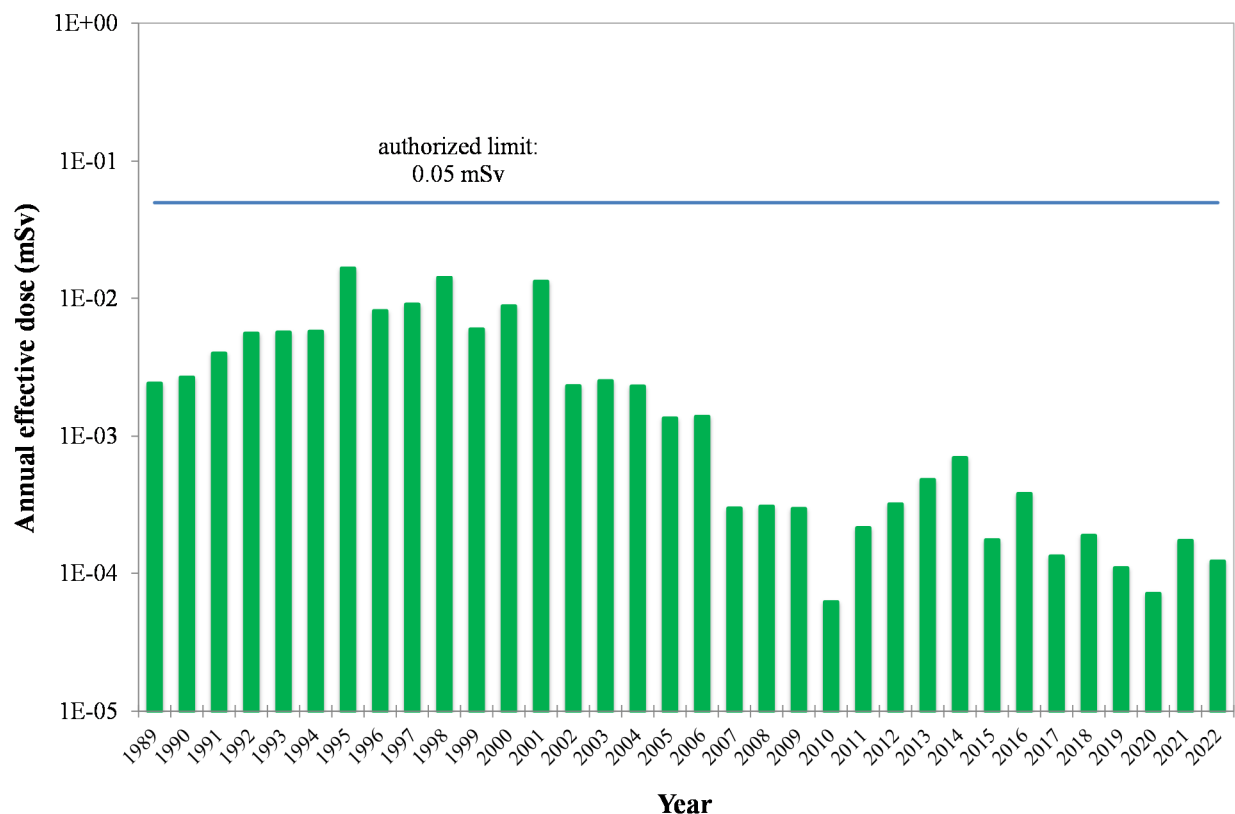


Figure I14: The sum of the estimated annual effective doses of the representative persons - individuals from different population groups - due to the Krško NPP emissions from 1989 to 2022. The authorized annual limit (0.05 mSv) is also marked. The total sum of NPP's contributions is informative, as we 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 2022 is given in Table E, 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 2022, 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 $1.2 \text{ E-4 mSv per year}$;
- 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 0.005 % 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 (82 %), with C-14 from atmospheric discharges being the major contributor among radionuclides;
- inhalation effective dose due to Krško NPP operation contributes 16 % 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 3 % to the total effective dose. Among the radionuclides, Co-60 from liquid discharges is the major contributor;
- 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 2022 za izbrane emisijske vzorce tekočinskih izpustov iz odpadnih merilnih rezervoarjev WMT ter za imisijske vzorce iz okolja – posamične vzorce sadja in poljščin iz okolice NEK. V letu 2022 je bil program nadzora plinastih emisij spremenjen in sicer je bilo treba določiti vsebnost radionuklidov v dveh kalibracijskih filtrih in dveh filtrih, ki sta bila pripravljena v NEK in ki sta morala vsebovati vsaj 4 umetne radionuklide nad mejo detekcije. Opravljena je bila tudi statistična primerjava vseh rezultatov meritev različnih vzorcev iz okolja v obdobju 2017–2022. Glede na kompleksnost postopkov vzorčenja, priprave vzorcev in meritev lahko ocenimo, da so ujemanja med sodelujočimi laboratoriji dobra. Primerjava meritev vsebnosti C-14 iz programa nadzora tekočih emisij in vzorcev iz programa plinastih emisij ni bila izvedena, ker meritve iz programa neodvisnega nadzora in iz programa obratovalnega nadzora niso bile izvedene na istih setih vzorcev. Zato predlagamo, da se v prihodnje v projektni nalogi poleg programa meritev navedejo tudi obseg in izvajalci rednih meritev. Ravno tako predlagamo, da bi sočasno sodelovali obe neodvisni inštituciji – IJS in ZVD – pri neodvisnem nadzoru meritev vsebnosti umetnih radionuklidov v vzorcih WMT, 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] in Pravilnikom o monitoringu radioaktivnosti (JV10) [8] se izvaja neodvisni nadzor meritev obratovalnega nadzora NE Krško, ki ga razpiše in vodi upravni organ (URSVJ). 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 2022* [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 2022 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 IJS kot izvajalec neodvisnega nadzora. Ta del neodvisnega nadzora se izvaja na enak način kot prejšnja leta. IJS in ZVD se kot izvajalca neodvisnega nadzora še vedno izmenjujeta z letno periodo. Za razliko od prejšnjih let so se na vzorcih vode iz WMT letos določevale koncentracije aktivnosti C-14 namesto H-3. Tu sta sodelovala IRB kot izvajalec rednih meritev in IJS, Odsek O-2, kot izvajalec neodvisnega nadzora. 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, IJS in NEK) nato opravijo meritve prevzetih vzorcev po svojih postopkih. IJS je tako prejel enkratne vzorce vode iz WMT za meritve vsebnosti radionuklidov z visokoločljivostno spektrometrijo gama in za določitev vsebnosti C-14, medtem ko IRB izvaja meritve na kompozitnih četrletnih vzorcih. Zaradi tega primerjava koncentracij aktivnosti C-14, določenih na IJS, Odsek O-2, in IRB, ni mogoča.



Pri neodvisnem nadzoru emisij – plinastih izpustov smo do sedaj 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 dodatne vrednosti. Tako so v letu 2022 program nadzora plinastih emisij spremenili in sicer je bilo treba določiti vsebnost radionuklidov v dveh kalibracijskih filterih in dveh filterih, ki sta bila pripravljena v NEK in ki sta morala vsebovati vsaj 4 umetne radionuklide nad mejo detekcije. Tu naj bi se opravila primerjava rezultatov med NEK kot izvajalcem rednih meritev in ZVD kot izvajalcem meritev v okviru neodvisnega nadzora. V letu 2022 ta primerjava ni bila mogoča, ker smo prejeli le rezultate meritev, ki jih je izvedel ZVD.

Tabela 1: Program nadzora emisij – tekočinski izpusti (sklop 1) za leto 2022

VRSTA IN OPIS MERITVE	VZORČEVALNO MESTO	VRSTA VZORCA	POGOSTOST VZORČENJA	LETNO ŠT. MERITEV
Specifična analiza, določitev koncentracije C-14	Odpadni merilni rezervoarji (WMT)	Vzorec, odvzet hkrati za NEK, za izvajalca primerjalnih meritev in za neodvisni nadzor (manj kot 0,5 L vode)	4-krat letno (četrtletno)	4
Izotopska analiza sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama	Odpadni merilni rezervoarji (WMT)		4-krat letno (četrtletno)	4 (brez joda in žlahtnih plinov)

Tabela 2: Program nadzora emisij – plinasti izpusti (sklop 2) za leto 2022

VRSTA IN OPIS MERITVE	VZORČEVALNO MESTO	VRSTA VZORCA	POGOSTOST VZORČENJA	LETNO ŠT. MERITEV
Izotopska analiza sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama	Aerosolni filtri	Kalibracijski filter (zagotovi NEK)	2-krat letno	4
		Filter, pripravljen v NEK za primerjavo (vsaj 4 radionuklidi nad mejo detekcije)	2-krat letno	

Tabela 3: Program nadzora imisij (sklop 3) za leto 2022

VRSTA IN OPIS MERITVE	VZORČEVALNO MESTO	VRSTA VZORCA	POGOSTOST VZORČENJA	LETNO ŠT. MERITEV
Izotopska analiza sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama	Izbrani kraji na krško-brežiškem polju	Sezonski vzorci – povrtnine, poljščine in razno sadje	1-krat letno, 2 vzorca sadja	2
			1-krat letno, 2 vzorca poljščin	2
1-krat letno, 2 vzorca sadja			2	
1-krat letno, 2 vzorca poljščin			2	
Specifična analiza, določitev koncentracije C-14			1-krat letno, 2 vzorca sadja	2
			1-krat letno, 2 vzorca poljščin	2
Specifična analiza, določitev koncentracije Sr-90				



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. Poleg tega se je v dveh vzorcih sadja (jabolka) in dveh vzorcih poljščin (koruza in pšenica) določal tudi C-14. Pri teh primerjavah sta sodelovala IRB kot izvajalec rednih meritev in IJS kot izvajalec meritev v okviru neodvisnega nadzora. Vsi izvajalci, IJS, IRB in ZVD so pripravili vzorce in opravili meritve po svojih postopkih.

REZULTATI MERITEV S ČASOVNIMI POTEKI

Primerjava rezultatov meritev za leto 2022

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 7 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 IJS in NEK rezultatov meritev vod iz odpadnih merilnih rezervoarjev WMT (sklop 1). Poročani in primerjani so bili 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 o aktivnostih, izračunanih na podlagi ene četrtine meje detekcije (MDA). Te aktivnosti so v primerjalnih tabelah obarvane modro ter jih nismo primerjali z rezultati IJS. Oba laboratorija (NEK in IJS) sta v teh 4 vzorcih nad mejo kvantifikacije za sevalce gama poročala le o treh radionuklidih v decembrskem vzorcu (Co-58, Co-60 in Ag-110m). Vsi ti rezultati so med seboj primerljivi. NEK je v vseh primerih poročal višje vrednosti od IJS, v junijskem vzorcu za okoli 4–20 % in z ζ -preskusi manjšimi od –0,91.

Na drugi strani je IJS poročal nad mejo kvantifikacije o Mn-54, Co-58, Co-60, Ag-110m, Sb-125, Te-125m, Te-127m in Cs-137 v marčevskem vzorcu, o Co-58, Co-60, Ag-110m, Sb-125, Te-125m in Cs-137 v junijskem vzorcu, o Co-60, Ag-110m, Sb-125, Te-125m in Cs-137 v avgustovskem vzorcu ter o Mn-54, Co-58, Co-60, Ag-110m in Te-127m v decembrskem vzorcu. Pri večini od teh radionuklidov je bila koncentracija aktivnosti, ki jih je poročal IJS, višja od poročenih mej detekcije pri NEK.



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

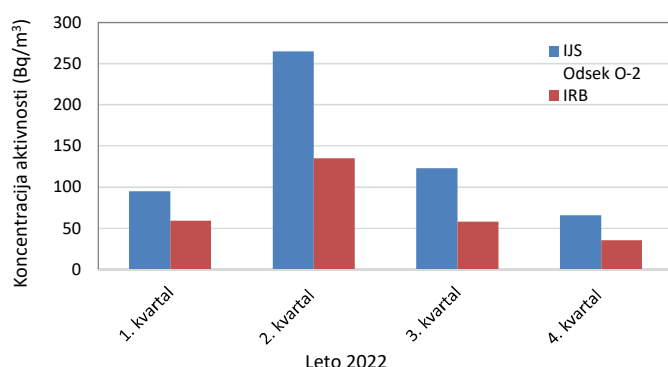
Vzorč. mesto	WMT											
Pooblaščenca organizacija	IJS, Odsek F-2 (gama spektrometrija), Odsek O-2 (C-14)				NEK				ζ-preskus			
Datum vzor.	16. 3. 2022	28. 6. 2022	28. 8. 2022	13. 12. 2022	16. 3. 2022	28. 6. 2022	14. 9. 2022	13. 12. 2022	Prvi vzorec	Drugi vzorec	Tretji vzorec	Četrti vzorec
Kol. vzorca (L)	0,30	0,26	0,25	0,27	1,0	1,0	1,0	1,0				
Koda vzorca	KI22WWM31	KI22WWM61	KI22WWM91	KI22WWM C1	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								< 3,4E+02				
Cr-51								< 4,5E+02				
Mn-54	3,5E+02 ± 1E+02			2,7E+02 ± 1E+02								
Fe-59												
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								

* 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 ¼ MDA. S krepkim tiskom na sivi podlagi so označeni ζ-preskusi, večji po absolutni vrednosti od 2.


Tabela 5: Primerjava rezultatov meritev C-14 v tekočinskih izpustih iz WMT*

WMT						
Pooblaščenca organizacija		IJS Odsek O-2		IRB		C-14
Radionuklid		C-14		C-14		
Datum vzorčenja		Koda vzorca	KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI (Bq/m ³)	Koda vzorca	KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI (Bq/m ³)	rel. odmik (%)
1. kvartal	16. 3. 2022	KI22WWM31	9,5E+01 ± 4E+00	Z-8102	5,9E+01 ± 2E+00	161
2. kvartal	28. 6. 2022	KI22WWMC1	2,7E+02 ± 1E+01	Z-8175	1,4E+02 ± 3E+00	196
3. kvartal	28. 8. 2022	KI22WWM91	1,2E+02 ± 1E+01	Z-8282	5,8E+01 ± 2E+00	212
4. kvartal	13. 12. 2022	KI22WWMC1	6,6E+01 ± 5E+00	Z-8358	3,6E+01 ± 9E-01	186

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


Slika 1: Primerjava rezultatov meritev C-14 na IJS in IRB

V tabeli 5 so rezultati meritev C-14 v vzorcih vode iz WMT. Ker je IRB opravil meritve na kompozitnih četrtletnih vzorcih, IJS pa na posamično vzorčenih vzorcih, primerjava ni mogoča. Kljub vsemu lahko vidimo, da je časovni trend primerljiv, le rezultati se razlikujejo za 40 % do 110 %, pri čemer so rezultati meritev na IJS višji kot na IRB.

V tabeli 6 so rezultati meritev emisijskih meritev zračnih izpustov, ki jih je opravil ZVD. V okviru neodvisnega nadzora je ZVD opravil meritve enega zračnega filtra in treh brisov, slednji so bili odvzeti v času remonta. Ker rezultatov meritev teh vzorcev, opravljenih v NEK, nismo prejeli, primerjave ni možno narediti.



Tabela 6: Rezultati emisijskih meritev zračnih izpustov (ZVD)*

Vzorč. mesto	NEK			
Vrsta vzorca	Aerosolni filtri	Bris		
Datum vzorčevanja	8. 7. 2022 - 15. 7. 2022	12. 10. 2022	12. 10. 2022	12. 10. 2022
Kol. vzorca	348,8 m ³	vzorec	vzorec	vzorec
Koda vzorca	RV2530722	RV4121022	RV4131022	RV4141022
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)			
Cr-51	3,8E+00 ± 7E-02	2,1E+01 ± 1E+00	1,1E+02 ± 4E+00	6,8E+02 ± 2E+01
Mn-54			8,2E+00 ± 3E-01	2,3E+01 ± 7E-01
Co-56				
Co-57				1,2E+01 ± 9E-01
Co-58		5,0E+01 ± 1E+00	1,2E+02 ± 3E+00	4,6E+03 ± 1E+02
Co-60		2,2E+01 ± 8E-01	1,3E+02 ± 5E+00	2,7E+02 ± 8E+00
Zn-65				
Br-82				
Y-88				
Zr-95			3,0E+01 ± 7E-01	1,4E+02 ± 3E+00
Nb-95x	7,9E-03 ± 8E-04	8,4E+00 ± 3E-01	5,3E+01 ± 1E+00	2,8E+02 ± 7E+00
Ru-106				
Cd-109				
Sn-113			2,5E+00 ± 2E-01	1,5E+01 ± 7E-01
I-131				
Cs-134				
Cs-137			3,4E+00 ± 2E-01	
Ce-139				
Hg-203				
Ag-110m			3,9E+02 ± 6E+00	2,0E+03 ± 3E+01

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

V tabeli 7 in 8 so prikazani rezultati meritev IJS in ZVD za vzorce sadja in poljščin. Vzorčenje je bilo opravljeno 17. 8. 2022. Pri sadju sta bila izbrana vzorca jabolk gala royal in hrušk viljamovk v Evrosadu, Vrbinu, pri zelenjavi (poljščinah) pa vzorca sladkih feferonov in babura paprike pri Vrtnarstvu Leon Efermovski v Bregah. Tu lahko nad mejo sprejemljivosti med seboj primerjamo 10 rezultatov, od teh imajo 4 rezultati $|\zeta|$ -preskus > 2 . Pripomniti velja, da so vsi rezultati, razen za K-40, nizki in blizu mej detekcije, kar ima velik vpliv na kakovost primerjave. Ključna je le razlika pri K-40 v vzorcu feferonov z ζ -preskusom $-2,71$ in relativnim odmikom 13 %. V tem primeru prispeva k višji vrednosti ζ -preskusa predvsem majhna merilna negotovost. V splošnem so nabori radionuklidov v poročilih obeh izvajalcev podobni.

V tabeli 9 so prikazani rezultati meritev C-14 v vzorcih sadja in poljščin. Predstavniki IJS in IRB so 7. 7. 2022 sočasno na standardnih lokacijah v okolici NEK, kjer IRB vzorči v okviru rednega programa, odvzeli vzorec koruze, pšenice in dva vzorca jabolk. Rezultate IJS smo primerjali z rezultati IRB iz poročila Izvješče o mjenjenjima aktivnosti ¹⁴C u okolišu Nuklearne elektrane Krško tijekom 2022. godine (LNA-8/2023) [20]. Rezultati IRB so sistematično za 15 % višji z ζ -preskusi med $-5,3$ in $-10,4$. Glavni vzrok za tako visoke vrednosti ζ -preskusa so izjemno majhne merilne negotovosti rezultatov IRB (0,3–0,4 %) in majhne negotovosti IJS (1,5–2,5 %).



Tabela 7: Primerjava rezultatov meritev vsebnosti radionuklidov v vzorcih sadja*

Vzorč. mesto	Evrosad Vrbina (Krško)					
Pooblaščen organizacija	IJS		ZVD		jabolka	hruške
Vrsta vzorca	jabolka	hruške	jabolka	hruške		
Datum vzorčevanja	17. 8. 2022	17. 8. 2022	17. 8. 2022	17. 8. 2022		
Kol. vzorca (kg)	0,28	0,30	4,54	4,57	ζ-preskus	ζ-preskus
Koda vzorca	K20HSJB781	K22HSHR781	RV2840822	RV2830822		
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)					
U-238	± 1,7E-01 ± 1E-01	± 2,9E-02 ± 5E-02	1,8E-01 ± 1E-02	3,8E-01 ± 3E-02	-0,11	-5,81
Ra-226	± 1,8E-02	1,6E-01 ± 5E-02	< 2,9E-01	< 8,6E-01		
Pb-210	± 3,4E-02 ± 4E-02			9,7E-02 ± 6E-02		
Ra-228	5,1E-02 ± 2E-02	3,7E-02 ± 1E-02				
Th-228						
Th-230						
K-40	4,3E+01 ± 1E+00	4,6E+01 ± 2E+00	4,4E+01 ± 2E+00	4,5E+01 ± 2E+00	-0,29	0,15
Be-7	1,7E-01 ± 7E-02	1,1E+00 ± 7E-02	3,2E-01 ± 5E-02		-1,69	
I-131						
Cs-134						
Cs-137		1,1E-02 ± 5E-03	< 4,1E-02	< 1,2E-01		
Co-58						
Co-60						
Cr-51						
Mn-54						
Zn-65						
Nb-95						
Ru-106						
Sb-125						
Sr-90	± 1,2E-03	6,1E-03 ± 1E-03	< 2,3E-02	< 1,9E-02		

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

(±) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije.

(†) Rezultat meritve je pod mejo detekcije.

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

Vzorč. mesto	Brege (Leskovec pri Krškem)					
Pooblaščen organizacija	IJS		ZVD		feferoni	paprika
Vrsta vzorca	feferoni	paprika	feferoni	paprika		
Datum vzorčevanja	17. 8. 2022	17. 8. 2022	17. 8. 2022	17. 8. 2022		
Kol. vzorca (kg)	0,19	0,19	2,01	1,50	ζ-preskus	ζ-preskus
Koda vzorca	KI22HPFE281	KI22HPPAP281	SZNEK080822	SZNEK090822		
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)					
U-238	± 1,4E-01 ± 2E-01		9,0E-02 ± 9E-03	8,8E-02 ± 7E-02	-0,26	
Ra-226	± 1,4E-01 ± 3E-01	± 1,4E-02	2,2E-01 ± 5E-02			
Pb-210						
Ra-228						
Th-228	± 5,6E-04 ± 5E-03	2,2E-02 ± 1E-02				
Th-230	± 3,5E-01 ± 2E+00					
K-40	8,7E+01 ± 3E+00	6,8E+01 ± 2E+00	1,0E+02 ± 6E+00	6,7E+01 ± 4E+00	-2,71	0,33
Be-7	3,1E-01 ± 1E-01		1,1E+00 ± 7E-02	3,3E-01 ± 6E-02	-5,28	
I-131						
Cs-134						
Cs-137			< 4,0E-02	1,4E-02 ± 5E-03		
Co-58						
Co-60						
Cr-51						
Mn-54						
Zn-65						
Nb-95						
Ru-106						
Sb-125						
Sr-90	5,9E-03 ± 2E-03	4,2E-03 ± 1E-03	< 2,2E-02	2,5E-02 ± 1E-02		-2,15

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

(±) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije.

(†) Rezultat meritve je pod mejo detekcije.



Tabela 9: Primerjava rezultatov meritev C-14 v vzorcih sadja in poljščin*

Vrsta vzorca		SADJE IN POLJŠČINE				
Pooblaščenca organizacija		IJS Odsek F-2		IRB		C-14
Radionuklid		C-14		C-14		
Datum vzorčevanja	Vzorčevalno mesto	Koda vzorca	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq na kilogram ogljika)	Koda vzorca	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq na kilogram ogljika)	ζ- preskus
7. 7. 2022	Koruza	KI22HPKZH71	2,3E+02 ± 4E+00	Z-8188	2,6E+02 ± 1E+00	-7,83
	Pšenica	KI22HPPSO71	2,2E+02 ± 5E+00	Z-8196	2,6E+02 ± 1E+00	-7,26
	Jabolka	KI22HSJBJ71	2,7E+02 ± 7E+00	Z-8192	3,1E+02 ± 1E+00	-5,29
	Jabolka	KI22HSJBD71	2,2E+02 ± 4E+00	Z-8183	2,6E+02 ± 8E-01	-10,36

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

Primerjava rezultatov meritev različnih vzorcev iz okolja

Pooblaščenim laboratorijem 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 zgoščenki v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško - Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320, marec 2023* 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.

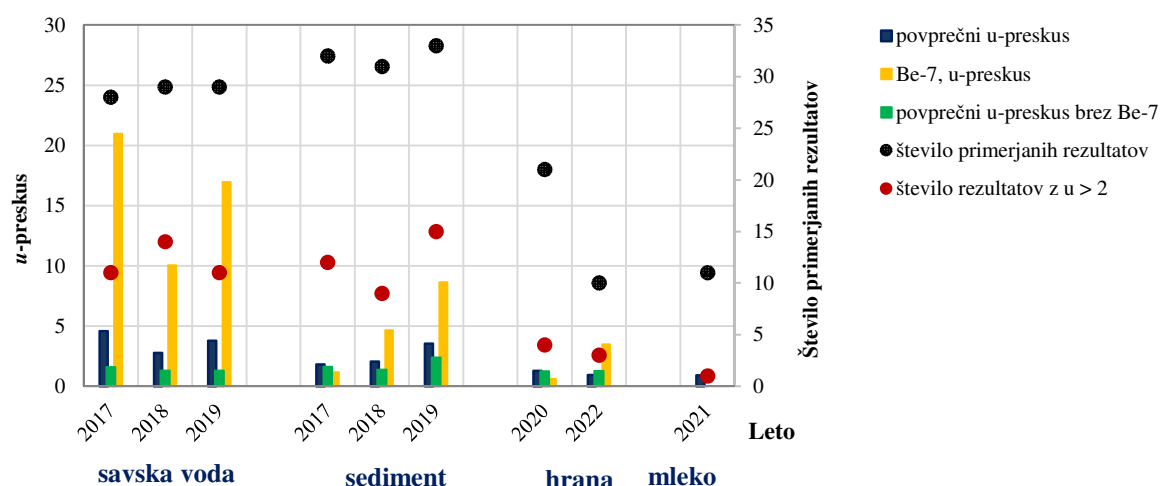
Med primerjalnimi meritvami in neodvisnim nadzorom je ključna razlika. Pri mednarodnih medlaboratorijskih primerjavah laboratoriji dobijo v analizo pripravljene vzorce z dobro definiranimi referenčnimi vrednostmi, določenimi na neodvisen način. Vzorčenja ni, v laboratoriju opravijo le zadnjo fazo priprave 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 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. Rezultati te analize so prikazani na sliki 2. Za vsako leto je bil določen povprečen u -preskus (1σ -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 najmanjši pri vzorcih hrane (sadje, poljščine, mleko). K visokim povprečnim vrednostim u -preskusa v savski vodi in tudi v sedimentih prispeva predvsem Be-7, kar je lahko posledica vzorčenja ali priprave vzorcev. Za razliko od vzorčenja in priprave savskih vod in sedimentov, je vzorčenje hrane iz istega soda ali območja bolje določeno in enolično, kar se posledično kaže s skladnimi rezultati in manjšimi vrednostmi u -preskusov.



Slika 2: Statistična obdelava rezultatov meritev savske vode in sedimentov v Krškem in Brežicah za obdobje 2017–2019 ter hrane v letih 2020–2022

DISKUSIJA IN SKLEPI

Pri neodvisnem nadzoru emisijskih in imisijskih meritev je sedanji 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 dveh kalibracijskih filtrih in dveh filtrih, pripravljenih v NEK, ki vsebujeta vsaj 4 umetne radionuklide nad mejo detekcije. Do sedaj smo pri neodvisnem nadzoru primerjali meritve, ki jih je v ta namen izvedel pooblaščen izvajalec, z meritvami, ki jih sicer redno izvaja drugi pooblaščen izvajalec. Ker pa nov program emisijskih meritev zračnih izpustov nima za primerjavo rednega in vnaprej določenega programa meritev, rezultatov izvajalca rednih meritev nismo prejeli in tako nismo mogli opraviti primerjave. V projektni nalogi, ki je osnova za izvedbo neodvisnega nadzora, ni navedeno, za katere meritve iz obratovalnega nadzora NE Krško se izvaja neodvisni nadzor in kdo je izvajalec predpisanih rednih meritev. **Zaradi tega predlagamo, da so v prihodnje v projektni nalogi poleg programa meritev navedeni tudi obseg in izvajalci rednih meritev.** Ta pristop zagotavlja, da bodo v času evalvacije vsi rezultati na razpolago.

V vzorcih tekočinskih izpustov iz WMT so prisotni različni umetni radionuklidi v merljivih koncentracijah, kar omogoča kakovostno primerjavo med posameznimi pooblaščenimi izvajalci. **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. Tudi pri neodvisnem nadzoru emisijskih meritev tekočih izpustov je URSJV spremenil obseg meritev in namesto meritev vsebnosti H-3 predpisala meritve vsebnosti C-14. Ker se pri rednem nadzoru vzorči voda iz WMT v drugačnih časovnih intervalih, primerjava ni bila mogoča. **To potrjuje naš predlog, da je treba v prihodnje v projektni nalogi poleg programa meritev navesti tudi obseg in izvajalce rednih meritev, kar zagotavlja, da bodo v času evalvacije na razpolago primerljivi rezultati.**

Primerjava rezultatov meritev vsebnosti radionuklidov v vzorcih iz programa neodvisnega nadzora emisijskih meritev kaže, da je ocena merilne negotovosti ključna in znatno prispeva k oceni primerljivosti rezultatov. To je predvsem zelo izrazito pri primerjavah vsebnosti C-14 v sadju in poljščinah, kjer se rezultati med IJS in IRB razlikujejo za okoli 15 %, vendar so zaradi izjemno majhnih merilnih negotovosti vrednosti ζ -preskusov nesprejemljivi. Merilne negotovosti reda velikosti 0,5 % v vzorcih iz okolja so nerealno nizke.

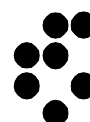
Na podlagi statistične primerjave vseh rezultatov v okviru neodvisnega nadzora v obdobju od 2010 do 2022 poudarjamo naslednje sklepe:

- tako kot prejšnja leta predlagamo, da pri neodvisnem nadzoru tekočinskih emisij (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;
- spreminjanje izbora okoljskih vzorcev, ki ga je uvedel URSJV v letu 2020, omogoča kompleksnejšo analizo rezultatov in prinaša dodatne zaključke; zato predlagamo, 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; pri letošnji primerjavi meritev vzorcev iz okolja se je pokazalo, da so merilne negotovosti pri določanju vsebnosti C-14 nerealno nizke;
- v projektni nalogi za neodvisni nadzor za leto 2022 so bili določeni vzorci, ki nimajo primerljivih vzorcev v rednem programu obratovalnega nadzora, zato predlagamo, da se v projektni nalogi poleg program meritev navedejo tudi obseg in izvajalci rednih meritev.

**OCENA IZPOSTAVLJENOSTI PREBIVALSTVA IN
BIOTE ZARADI NADZOROVANIH TEKOČIH IN
ATMOSFERSKIH IZPUSTOV V OKOLJE IZ
NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO**



Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija





OCENA IZPOSTAVLJENOSTI PREBIVALSTVA IN BIOTE ZARADI NADZOROVANIH TEKOČIH IN ATMOSFERSKIH IZPUSTOV V OKOLJE IZ NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

Odgovorni za izdajo: doc. dr. Benjamin Zorko

Urednika: doc. dr. Benjamin Zorko in mag. Denis Glavič - Cindro

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 2023

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

539.16:502.175(497.4)
621.311.25(497.4Krško)

OCENA izpostavljenosti prebivalstva in biote zaradi nadzorovanih
tekočih in atmosferskih izpustov v okolje iz Nuklearne elektrarne
Krško / [urednika Benjamin Zorko in Denis Glavič-Cindro]. - 1. izd. -
Ljubljana : Institut "Jožef Stefan", 2023

ISBN 978-961-264-267-9
COBISS.SI-ID 147967491

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	1 / 118
2	Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi	27 / 118
3	Radioaktivnost v usedih	45 / 118
4	Zrak	57 / 118
5	Zunanje sevanje	81 / 118
6	Radionuklidi v hrani	97 / 118
7	Reference	113 / 118





PREDGOVOR UREDNIKA

Monografija *Ocena izpostavljenosti prebivalstva in biote zaradi nadzorovanih tekočih in atmosferskih izpustov v okolje iz Nuklearne elektrarne Krško* obravnava stanje v okolju v okolici jedrske elektrarne Krško (NEK) v letu 2022, ko se je aprila iztekel 32. gorivni cikel in se je z majem začel 33. gorivni cikel delovanja jedrske elektrarne. Je samostojna priloga poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2022*, interna oznaka 9/2023. 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. Neprekinjeno zbiranje in vrednotenje merskih podatkov (obdobna povprečja) omogoča prikazovanje časovnih teženj in s tem tudi vzdržnost 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 [58]. 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 *Ocena izpostavljenosti prebivalstva in biote zaradi nadzorovanih tekočih in atmosferskih izpustov v okolje iz Nuklearne elektrarne Krško* 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 *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti in ocene učinkov izpustov NEK na 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 ефективne 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.

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 zmognosti (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 2022 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 izbrana kot referenca 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 0,023 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 v pretočni akumulaciji HE Brežice. Pod jezom HE Brežice se efektivna doza za referenčno osebo oceni iz rezultatov analiz okoljskih vzorcev. Letna efektivna doza zaradi zadrževanja na obrežju zaradi zunanjega sevanja in zaužitja rib za odraslo referenčno osebo v pretočni akumulaciji HE Brežice (obravnavane lokacije) po savski prenosni poti ocenjena po novem modelu je nižja ali enaka 0,015 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) upošteva 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. Poleg tega sta tu še tritij (H-3) in radioaktivni

ogljik (C-14), ki sta tako kozmogene kot antropogene narave. Poleg naravnih in kozmogennih 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)* [25], [26]. 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* [32]. Model PCFLOW3D ([30], [31]), 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 [28]. 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. 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 jeza NEK.

V okviru projektne naloge je bila predlagana tudi eksperimentalna študija sledenja vsebnosti tritija v reki Savi nizvodno od jezu 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 onesnaženja nizvodno od jezu NEK [33], hidravlične lastnosti reke Save pa so bile dodatno podkrepjene z batigrafskim slikanjem globine [34].

Neodvisno od radiološkega nadzora NEK se izvaja tudi nadzor drugih rek po Sloveniji v okviru programa nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji [19]. 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.

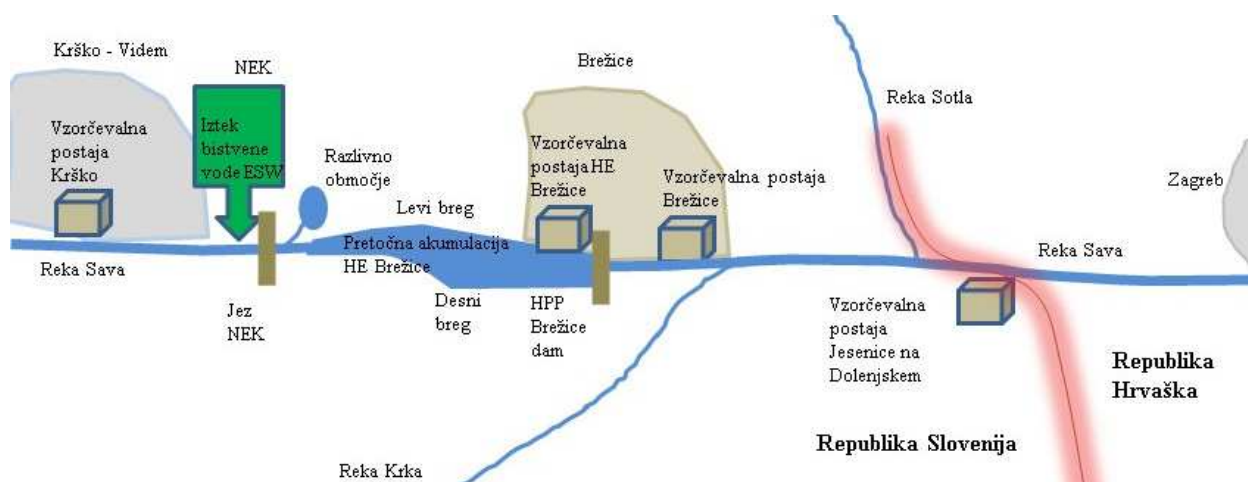
OKOLJSKI VZORCI

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 jezo, 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 jezo (sliki 1.2 in 1.3). Košara za zajem vode je na sredini jeza 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 opravljale pooblaščenice 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 jezo 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 jezo 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 vodnem 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 343 g do 712 g; pred pripravo vzorcev se odstranijo repi in glave rib.



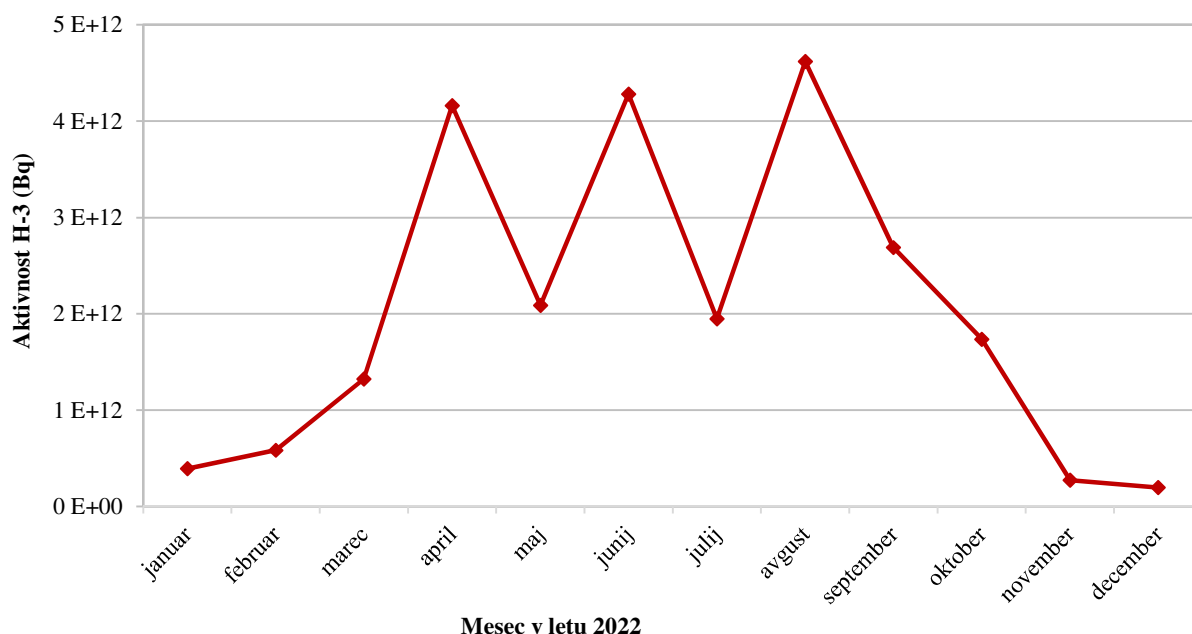
REZULTATI MERITEV IN TIPIČNI ČASOVNI POTEKI

Seznam meritev, pogostost posameznih meritev, merski rezultati in izvajalci meritev so navedeni v *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320, marec 2023*, 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 [24]. 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 [26].

Tritij je redno prisoten v tekočinskih efluentih NEK. Po podatkih NEK so bili največji mesečni tekočinski izpusti H-3 opravljeni v avgustu ($4,62 \text{ TBq}$, slika 1.4). Skupni letni izpust v letu 2022 $24,3 \text{ TBq}$ je bil opazno višji od povprečja letnih aktivnosti H-3 v tekočinskih izpustih od 1999 do 2021 ($12,0 \text{ TBq}$). Na sliki 1.5 je prikazana primerjava koncentracij aktivnosti tritija v savski vodi na lokacijah Krško, HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem v letu 2022.



Slika 1.4: Mesečne aktivnosti tekočinskih izpustov H-3 iz NEK v letu 2022



Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 nad jezom HE Brežice ($11,0 \text{ kBq/m}^3$) je višje od koncentracij aktivnosti na referenčnem odvzemnem mestu Krško ($0,6 \text{ kBq/m}^3$). V Brežicah (za jezo HE Brežice) je povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti $7,4 \text{ kBq/m}^3$ dvakrat višje od dolgoletnega povprečja $3,8 \text{ kBq/m}^3$ za zadnjih 19 let. Izmerjeno povprečje koncentracij aktivnosti v Jesenicah na Dolenjskem (letno povprečje $7,9 \text{ kBq/m}^3$) je nepričakovano višje kot v Brežicah.

Izmed lokacij, kjer se voda vzorčuje neprekinjeno (filtriran vzorec), je bila nad jezo HE Brežice najvišja vrednost izmerjena v mesecu marcu ($58,5 \text{ kBq/m}^3 \pm 0,3 \text{ kBq/m}^3$), v Brežicah v mesecu avgustu ($32,9 \text{ kBq/m}^3 \pm 1,8 \text{ kBq/m}^3$) in v Jesenicah na Dolenjskem v mesecu avgustu ($32,3 \text{ kBq/m}^3 \pm 2,1 \text{ kBq/m}^3$). V Krškem je bila najvišja vrednost tritija izmerjena v juliju ($0,8 \text{ kBq/m}^3 \pm 0,1 \text{ kBq/m}^3$).

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

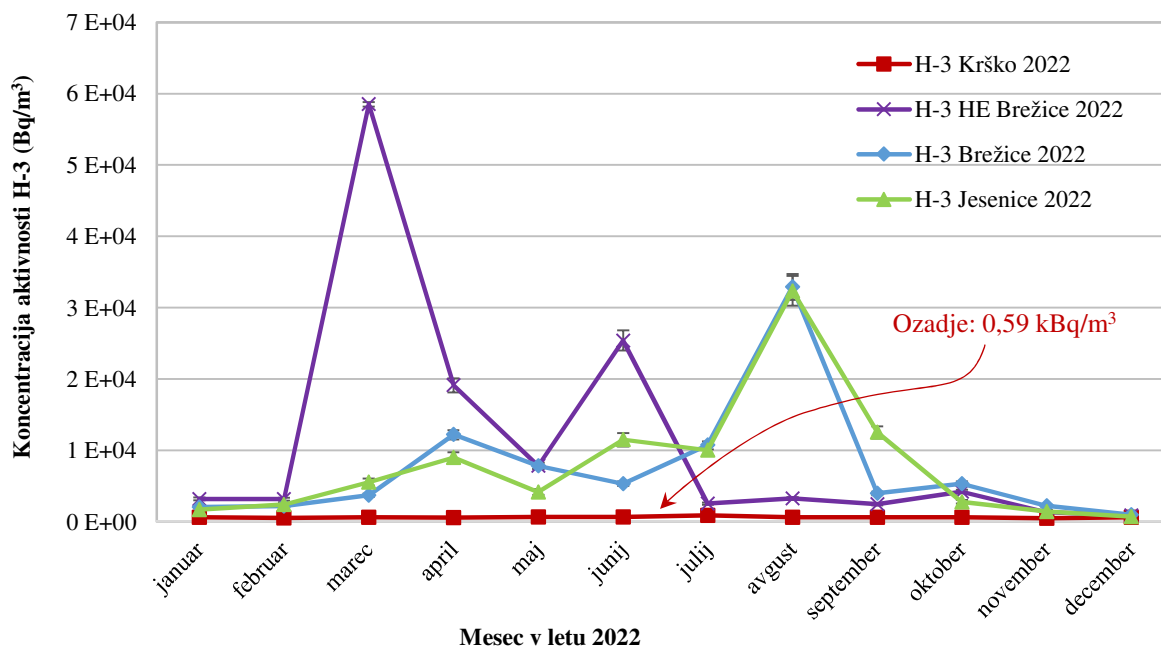
Vrednost korelacijskega koeficienta	Primerjava med izpusti in vzorčevalni lokacijami
0,20	levi breg
0,36	desni breg
0,18	nad jezo HE Brežice
0,71	Brežice
0,79	Jesenice na Dolenjskem

V tabeli 1.1 prikazujemo moč povezanosti mesečnih izmerjenih koncentracij aktivnosti na vzorčevalnih mestih nizvodno od jezu NEK in mesečnimi aktivnostmi H-3 v tekočinskih izpustih iz NEK. Merilo za korelacijo (povezanost med spremenljivkama) je vzorčni korelacijski (Pearsonov) koeficient [51], ki je predstavljen v tabeli 1.2. Iz tabele 1.1 lahko ugotovimo, da je povezanost močna med vzorčevalnima postajama Brežice in Jesenice na Dolenjskem ter aktivnostmi H-3 v reki Savi. Nasprotno je povezanost z izpusti šibka ali neznatna za levi breg pretočne akumulacije, desni breg pretočne akumulacije in lokacijo nad jezo HE Brežice.

Tabela 1.2: Merila moči povezanosti spremenljivk⁸ 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

⁸ Povzeto po https://sl.wikipedia.org/wiki/Pearsonov_koeficient_korelacije



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 2022 povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 0,59 kBq/m³.

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
0,80	levi breg–desni breg
–0,23	levi breg–nad jezo HE Brežice
0,19	levi breg–Brežice
0,33	levi breg–Jesenice na Dolenjskem
–0,21	desni breg–nad jezo HE Brežice
0,63	desni breg–Brežice
0,62	desni breg–Jesenice na Dolenjskem
–0,09	nad jezo HE Brežice–Brežice
–0,01	nad jezo HE Brežice–Jesenice na Dolenjskem
0,90	Brežice–Jesenice na Dolenjskem

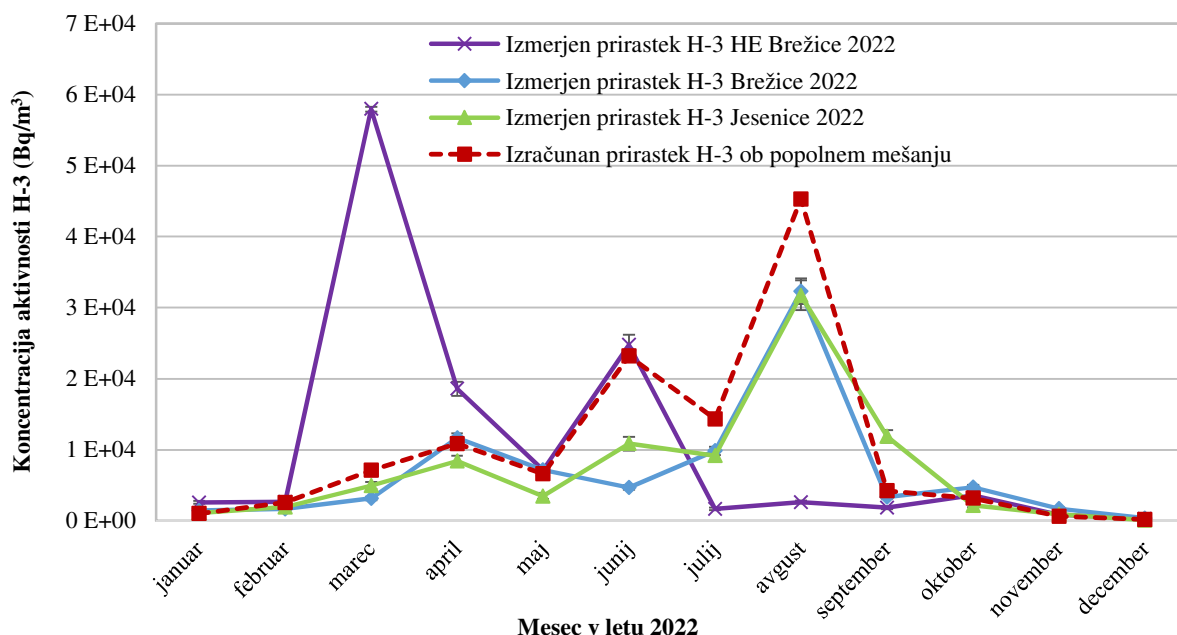


V tabeli 1.3 prikazujemo moč povezanosti izmerjenih mesečnih koncentracij aktivnosti na vzorčevalnih mestih nizvodno od jezua NEK. Ugotavljamo, da so povezanosti močne ali zelo močne med vzorčevalnimi postajami levi breg-desni breg in Brežice-Jesenice na Dolenjskem. Zmerna povezanost je med postajami desni breg-Brežice in desni breg-Jesenice na Dolenjskem. Šibka je povezanost med koncentracijami aktivnosti H-3 na lokacijah levi breg-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. Po pregledu časovnega poteka aktivnosti tekočinskih izpustov H-3 [5] lahko ugotovimo, da so vzorčenja v mesecih julij, avgust in september sovpadala z večjimi izpusti tritija. V vseh naštetih mesecih se je namreč zgodilo, da je bil v roku 72 ur pred vzorčenjem opravljen izpust, večji od 20 GBq. V kombinaciji s sušnim obdobjem in posledično zelo nizkim pretokom Save (v avgustu tudi pod 40 m³/s) to pomeni, da se oblak tekočinskega izpusta dlje časa zadržuje v pretočni akumulaciji. Posledično so bili rezultati nekaterih meritev v poletnem času (sploh na levem in desnem bregu pretočne akumulacije) močno povišani.

Najvišja koncentracija aktivnosti H-3 ($115 \text{ kBq/m}^3 \pm 6 \text{ kBq/m}^3$) je bila na levem bregu pretočne akumulacije julija, ko je bil ujet močnejši dnevni izpust konec junija. Na desnem bregu je bil ob istem času vzorčenja prav tako zaznan junijski izpust, saj je bila koncentracija aktivnosti H-3 enaka $123 \text{ kBq/m}^3 \pm 6 \text{ kBq/m}^3$. To je tudi največja zabeležena vrednost na desnem bregu v letu 2022.

Koncentracija aktivnosti H-3 v razlivnem področju ("nadomestni habitat" 1,7 km nizvodno od NEK) je bila najvišja v tretjem četrtletju ($20 \text{ kBq/m}^3 \pm 0,4 \text{ kBq/m}^3$). Tudi v tem primeru je pomemben datum vzorčenja, saj lahko z zajeto vodo na dan vzorčenja zaznamo močnejše dnevne izpuste. Površinska voda iz razlivnega območja ni neposredno povezana s tekočo vodo iz Save. Sklepamo, da so povišane koncentracije aktivnosti najverjetneje posledica preteklih izpustov.



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).



V drugih rekah v Sloveniji je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 kot v preteklih letih, večinoma pod 1 kBq/m^3 [18]. Iz časovnega poteka na sliki 10 v [18] lahko opazimo zmanjševanje povprečja koncentracije aktivnosti H-3 v rekah. Pojavljajo se občasne anomalije, kot je bilo na primer v letih 2013 in 2020 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 povprečne izmerjene vrednosti precej višje. To je posledica kombinacije višje letne izpuščene aktivnosti tritija, sušnosti poletnih mesecev (nizek vodostaj Save) in vzorčenja, ki je po naključju v treh zaporednih mesecih potekalo v roku 72 ur po večjem izpustu tritija iz NEK.

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 jezu HE Brežice so se hidrodinamske razmere spremenile, kar smo že opisali v uvodu.

Po prejšnji metodologiji ocenimo razredčitveno razmerje DR (*Dilution Ratio*) na različnih lokacijah pod jezo 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 $C_{w,tot}$ [26]:

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

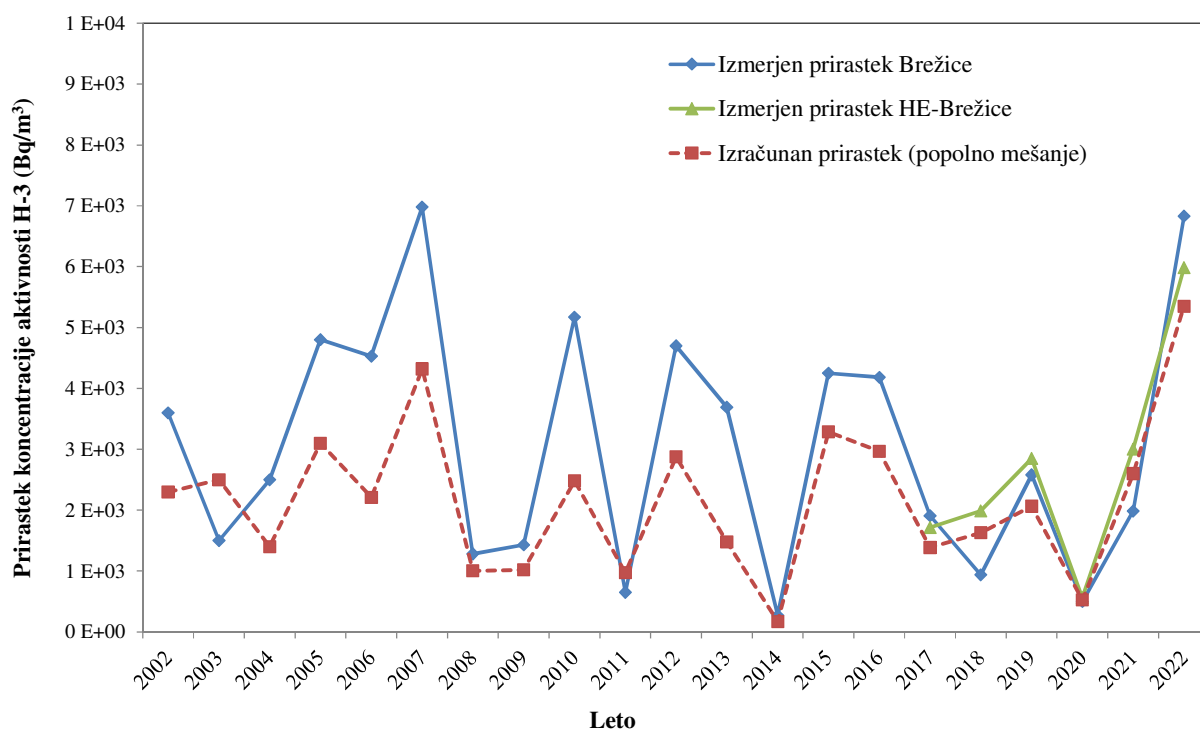
Prirastek koncentracije aktivnosti na mestu popolnega mešanja izračunamo iz izraza:

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

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 $C_{w,L}$ $6,83 \text{ kBq/m}^3$, v Jesenicah na Dolenjskem pa $7,29 \text{ kBq/m}^3$. Izračunani prirastek koncentracije aktivnosti tritija na mestu popolnega mešanja $C_{w,tot}$ je bil $5,35 \text{ kBq/m}^3$. Rezultat meritvev se dobro ujema z izračunanim prirastkom na mestu popolnega mešanja. Neobičajno je, da je koncentracija tritija v Jesenicah na Dolenjskem višja od koncentracije v Brežicah. Razredčitvena razmerja za točke med jezo NEK in jezo HE Brežice so definirana drugače in jih določimo s pomočjo novo razvite programske opreme DOSENEK (več v poglavju o ocenah učinkov).



Slika 1.7: Primerjava med letnima povprečnima prirastkoma koncentracije aktivnosti H-3 v reki Savi na jezcu HE Brežice ter za jezo v Brežicah in izračunano koncentracijo aktivnosti H-3, dobljeno iz letnih tekočinskih izpustov in pretoka Save ob predpostavki popolnega mešanja

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 2022 opravil IRB. Iz posameznih meritev in volumna izpuščene vode iz WMT (kvartalni izpusti) smo ocenili četrtletne aktivnosti C-14. Te so bile od 0,017 GBq v prvem četrtletju do 0,065 GBq v drugem četrtletju, ko so bili tekočinski izpusti v reko Savo najvišji. Skupno letno izpuščeno aktivnost C-14 0,14 GBq smo izračunali kot vsoto četrtletnih vrednosti. Izpusti so za velikostni red nižji, kot je dolgoletno povprečje (1,5 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 [44]). Aktivnost izpuščenega C-14 je do 4 velikostne rede nižja kot pri tritiju.

C-14 je bil v letu 2022 merjen tudi v savski vodi in v ribah [20]. 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 89 pMC⁹ (10,0 Bq/m³ vode) in 100 pMC (11,3 Bq/m³ vode), kar je primerljivo z naravnim, večinoma kozmogenim, C-14 v okolju (okrog 11 Bq/m³). Glede na letne izpuste v Savo je pričakovati, da bi povprečna koncentracija aktivnosti C-14 v Brežicah narasla na okrog 0,04 Bq/m³. Od povprečja se odmikajo izmerjene vrednosti v tretjem četrtletju. Izmerjena koncentracija aktivnosti C-14 v Savi na levem bregu je bila 11 Bq/m³, na desnem bregu pa 16 Bq/m³.

⁹ 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 [22].



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 [45]. Iz bioakumulacijskega faktorja C-14 in ocenjenega povprečnega prirastka C-14 v Savi ($0,07 \text{ Bq/m}^3$) zaradi učinka NEK lahko ocenimo, da se relativna specifična aktivnost C-14 v ribah podobno kot v vodni bioti minimalno poveča ($< 0,2 \text{ Bq/kg}$) in je pod mejo detekcije. Izmerjena sta bila tudi dva vzorca rib (platnica in klen) v akumulacijskem jezeru HE Brežice.

Izmerjeni relativni specifični aktivnosti C-14 v ribah sta bili 87 pMC in 98 pMC (197 Bq/kg C in 221 Bq/kg C). Obe izmerjeni aktivnosti sta nižji od trenutnih atmosferskih aktivnosti (102 pMC). V primerjavi s prejšnjimi leti so specifične aktivnosti C-14 v reki Savi in ribah v okviru negotovosti meritev enake.

Jod (I-131)

Kratkoživi radioaktivni jod (I-131) občasno opazimo v tekočinskih efluentih NEK. V izpustih iz NEK v letu 2022 I-131 ni bil zaznan.

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 črnobilski nesreči. V nekaterih rekah v Sloveniji ga je mogoče najti zaradi uporabe tega radionuklida v medicini.

V letu 2022 koncentracija aktivnosti I-131 zelo niha in je včasih tudi pod mejo detekcije. V posamičnih vzorcih je bila do $7,2 \text{ Bq/m}^3$ v Krškem v prvem četrtletju, kjer je bilo tudi najvišje povprečje $4,1 \text{ Bq/m}^3$ v letu 2022. Na levem bregu so bile koncentracije aktivnosti od $1,3 \text{ Bq/m}^3$ do $5,0 \text{ Bq/m}^3$, na desnem bregu od $0,6 \text{ Bq/m}^3$ do $4,0 \text{ Bq/m}^3$, nad jezero HE Brežice od $2,2 \text{ Bq/m}^3$ do $4,4 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah od $1,8 \text{ Bq/m}^3$ do $4,5 \text{ Bq/m}^3$ in v Jesenicah na Dolenjskem od $0,9 \text{ Bq/m}^3$ do $2,5 \text{ Bq/m}^3$.

Če primerjamo rezultate meritev z ločenim nadzorom v življenjskem okolju v RS [18], so bile povprečne koncentracije na reki Savi v Brežicah ($2,4 \text{ Bq/m}^3$) nižje, kot jih izmerimo v Savi v Ljubljani (14 Bq/m^3). V Muri, Dravi in Savinji so bile povprečne koncentracije aktivnosti I-131 nižje ($0,4 \text{ Bq/m}^3$, $0,1 \text{ Bq/m}^3$ in $1,0 \text{ Bq/m}^3$). V Soči, Krki in Kolpi v letu 2022 jod I-131 ni bil zaznan.

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

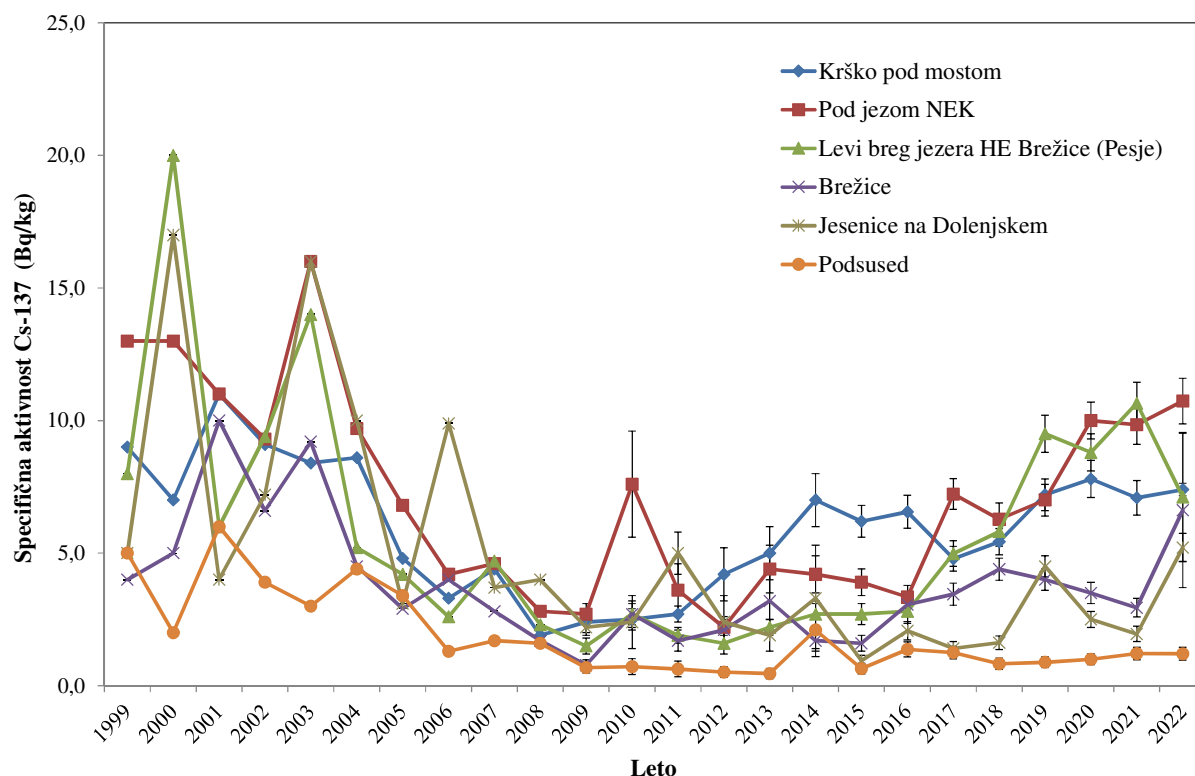
V vzorcih rib iz referenčnega odvzema (v Krškem nad jezero) in tudi v vzorcih iz nadzornih odvzemnih mest pod jezero NEK (meritve ZVD in IRB) v letu 2022 ni bila zaznana prisotnost I-131, kar je enako kot v preteklih letih. Glede na koncentracije aktivnosti joda v posamičnih vzorcih nefiltrirane vode (okrog 10 Bq/m^3) bi pričakovali, da je specifična aktivnost joda v ribah okrog $0,4 \text{ Bq/kg}$ (upoštevajoč bioakumulacijski faktor $B_f = 0,04 \text{ m}^3/\text{kg}$) [26]. 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 2022 je bil $1,5 \text{ MBq}$, kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo kot v preteklih letih (2012–2020) in nižje kot dolgoletno povprečje $14,5 \text{ MBq}$ (2000–2021). Cezij se slabo (le v nekaj odstotkih) veže na grobo suspendirano snov [26]. 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 in povprečni pretok Save ter ob privzetku razredčitvenega razmerja na levem bregu v Brežicah lahko ocenimo prirastek koncentracije aktivnosti Cs-137 v Brežicah na okrog $0,4 \text{ mBq/m}^3$. 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 $0,28 \text{ Bq/m}^3$, na odvzemnem mestu Jesenice na Dolenjskem pa $0,07 \text{ Bq/m}^3$. V Brežicah in nad jezero HE Brežice Cs-137 v vodi ni bil zaznan v nobenem vzorcu.



Slika 1.8: Primerjava specifičnih aktivnosti Cs-137 v talnem sedimentu reke Save na lokacijah vzvodno in nizvodno od jezua NEK. Prikazane so povprečne specifične aktivnosti od 1999 do 2022.

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 in v Brežicah je bila koncentracija aktivnosti pod mejo detekcije. Nad jezo HE Brežice je bila povprečna koncentracija aktivnosti $0,18 \text{ Bq/m}^3$ (najvišja v avgustu $0,3 \text{ Bq/m}^3$).

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 2022 je bila od $0,05 \text{ Bq/m}^3$ v Krki do $0,8 \text{ Bq/m}^3$ v Muri. V Soči, Savi pri Ljubljani in Kolpi Cs-137 v letu 2022 ni bil detektiran, ali pa je bil vsaj en rezultat meritve pod mejo kvantifikacije (velika merska negotovost) [18].

Povprečja specifičnih aktivnosti Cs-137 v sedimentih so od $2,8 \text{ Bq/kg}$ v Jesenicah na Dolenjskem do $10,2 \text{ Bq/kg}$ na desnem bregu pretočne akumulacije HE Brežice. Na referenčnem mestu v Krškem je bilo povprečje $7,4 \text{ Bq/kg}$ (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, ulovljenih na lokacijah, od katerih je referenčna v Krškem, druge pa so nizvodno pod izpustom NEK, ki jih je opravil ZVD, kažejo, da so povprečne mesečne specifične aktivnosti Cs-137 v nekaterih ribah nad mejo detekcije. V Krškem je bilo povprečje 0,03 Bq/kg, v Jesenicah na Dolenjskem pa 0,04 Bq/kg. Povprečja so izračunana po štirih vzorcih rib. V pretočni akumulaciji nad jezom HE Brežice in v Brežicah so bile vrednosti cezija v vseh vzorcih rib pod mejo detekcije. V okviru negotovosti povprečij so vsebnosti Cs-137 v ribah na vseh odvzemnih mestih podobne.

Glede na izpuste cezija iz NEK in posledično na povišanje koncentracije aktivnosti Cs-137 v vzorcih nefiltrirane vode (največ 0,0004 Bq/m³) bi pričakovali, da je specifična aktivnost Cs-137 v ribah okrog 0,0008 Bq/kg (upoštevajoč koncentracijski faktor $B_r = 2,0 \text{ m}^3/\text{kg}$) [26], 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 nizka 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.

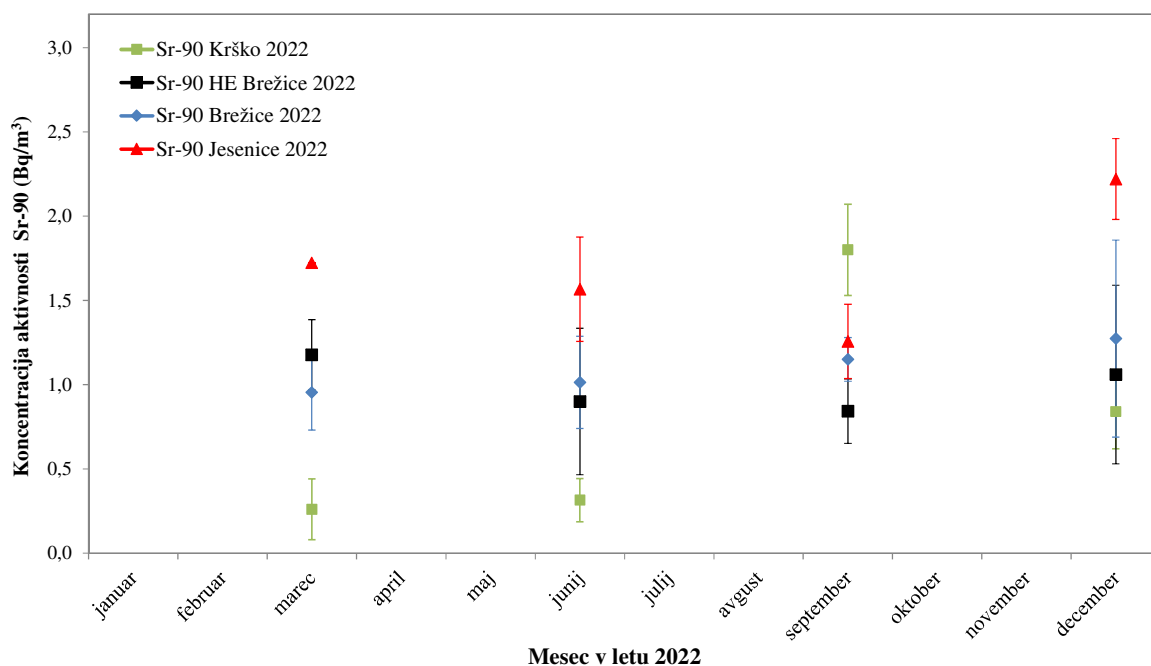
Radioaktivni izotop stroncija Sr-90 je redno v tekočinskih izpustih NEK. V letu 2022 je bila v reko Savo izpuščena aktivnost 0,05 MBq.

Večina stroncija je raztopljena v vodi, saj je koncentracija aktivnosti Sr-90 v vodi vsaj 10-krat večja kot v filtrskem ostanku. Rezultati meritev Sr-90 v filtrskem ostanku so na vseh vzorčevalnih lokacijah (Krško, Brežice, nad jezom HE Brežice, Jesenice na Dolenjskem) pod mejo detekcije. Na splošno so koncentracije stroncija v vodi do 10-krat višje kot za Cs-137. Na sliki 1.9 je prikazana primerjava rezultatov meritev Sr-90 v vodi na različnih odvzemnih mestih v letu 2022.

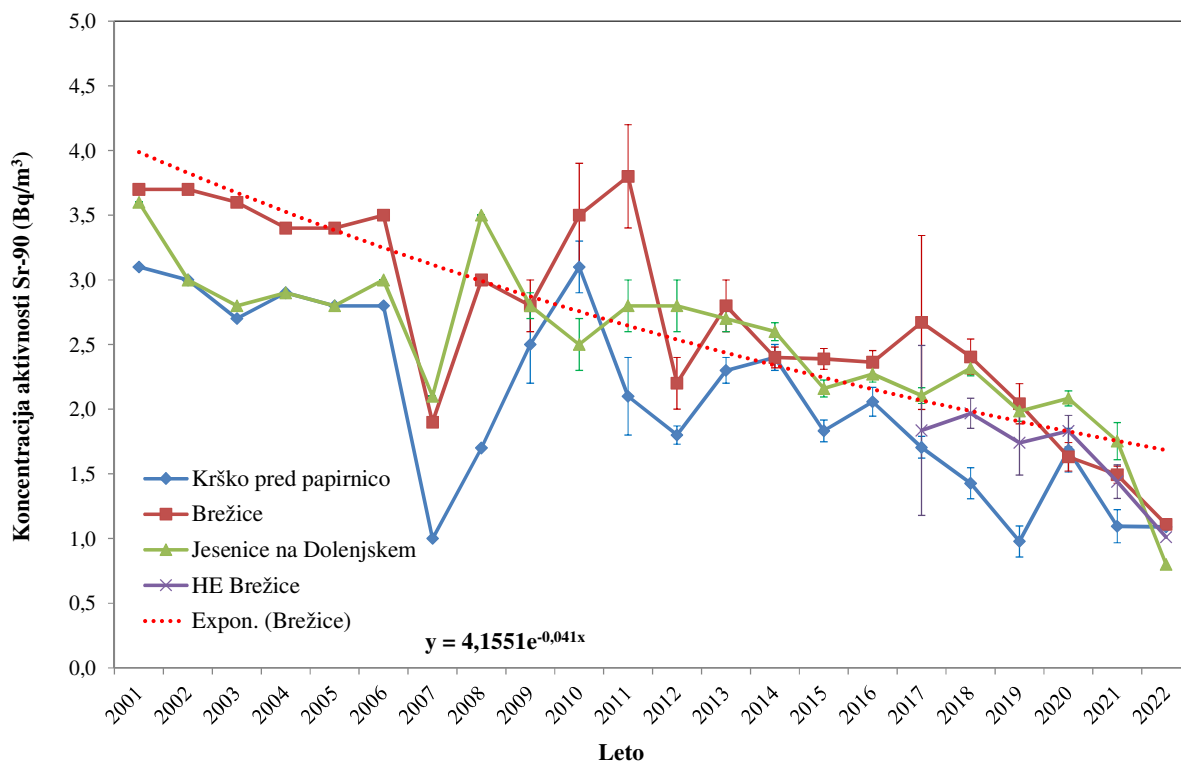
Razlike med povprečji koncentracij aktivnosti Sr-90 na lokacijah, kjer se neprekinjeno vzorči, so v okviru negotovosti povprečij majhne, od 1,0 Bq/m³ nad jezom HE Brežice do 1,7 Bq/m³ v Jesenicah na Dolenjskem. Tudi koncentracije aktivnosti Sr-90 v posamičnih (nefiltriranih) vzorcih vode v okviru merskih in vzorčevalnih negotovosti ne odstopajo od meritev neprekinjeno vzorčenih vzorcev filtrirane vode in so od 0,8 Bq/m³ v Krškem do 1,1 Bq/m³ v razlivnem območju (nadomestnem habitatu).

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 2,1 Bq/m³, v Dravi 1,0 Bq/m³ in v Muri 1,7 Bq/m³ [18]. Koncentracije aktivnosti Sr-90 v savski vodi so v okviru merskih in vzorčevalnih negotovosti podobne rezultatom iz zadnjih nekaj let (glej sliko 1.10). Opazna je težnja upadanja, ustreznega razpolovni dobi stroncija (28,8 let). Primerjava meritev na različnih lokacijah z upoštevanjem merskih negotovosti kaže, da je učinek NEK nemerljiv.

Specifične aktivnosti stroncija v obrežnih sedimentih so tipično do 10-krat nižje od specifičnih aktivnosti cezija. Na referenčni lokaciji v Krškem in na lokaciji nad jezom HE Brežice stroncij ni bil zaznan. Na ostalih lokacijah nizvodno od jezov NEK so bile povprečne specifične aktivnosti Sr-90 od 0,09 Bq/kg na desnem bregu do 0,35 Bq/kg v Jesenicah na Dolenjskem. Specifična aktivnost stroncija v obrežnem sedimentu je tako primerljiva z rezultati meritev iz predhodnih let. V obrežnih sedimentih je učinek NEK nemerljiv.



Slika 1.9: Primerjava četrletnih 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 in v Brežicah so mesečne.



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 ($(0,041 \pm 0,01)$ na leto).



Povprečja koncentracij stroncija Sr-90 v ribah so od 0,05 Bq/kg v Jesenicah na Dolenjskem do 0,35 Bq/kg nad jezo HE Brežice. V Krškem je bilo povprečje 0,06 Bq/kg. 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 ($1,2 \pm 0,3$) Bq/m³ bi pričakovali, da je specifična aktivnost stroncija v ribah 0,07 Bq/kg (upoštevajoč koncentracijski faktor $B_r = 0,06$ m³/kg) [26]. Povprečje specifičnih aktivnosti v ribah 0,13 Bq/kg (mišice in kosti ribe skupaj, meritve ZVD), vendar k povprečju daleč največ prispeva povprečna koncentracija stroncija v ribah nad HE Brežice. Povprečje preostalih treh lokacij (Krško, Brežice in Jesenice na Dolenjskem) je 0,06 Bq/kg in 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 2022 je bila skupna aktivnost teh radionuklidov vsaj šest 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 koncentracije aktivnosti U-238 do 8,7 Bq/m³, Ra-226 do 4,5 Bq/m³, Pb-210 do 41 Bq/m³, Ra-228 do 5,7 Bq/m³, Th-228 do 8,2 Bq/m³ in Be-7 do 304 Bq/m³. Povprečne koncentracije aktivnosti K-40 so od 34 Bq/m³ do 47 Bq/m³ na vseh lokacijah od referenčne lokacije v Krškem do Jesenic na Dolenjskem. 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 vrhnji plasti zemlje, njegove spojine pa so topne v vodi. Povprečna koncentracija aktivnosti K-40 v rekah v letu 2022 je bila od 8,4 Bq/m³ v reki Soči do 217 Bq/m³ v Savinji. Najvišja koncentracija aktivnosti je bila v Savinji (270 ± 10) Bq/m³. Povišano vsebnost kalija lahko razlagamo s povišano sedimentacijo reke (mešanje vode in zemljine) na mestu odvzema (npr. po čistilni napravi v Laškem) [18].

V sedimentih so bile na vseh odvzemnih mestih specifične aktivnosti U-238 do 48 Bq/kg, Ra-226 do 40 Bq/kg, Pb-210 do 132 Bq/kg, Ra-228 do 41 Bq/kg in Th-228 do 36 Bq/kg. Povprečne specifične aktivnosti K-40 so bile od 241 Bq/kg (Jesenice na Dolenjskem) do 457 Bq/kg (Krško). V sedimentu je bil občasno zaznan Be-7 z razponom od 0 Bq/kg do 118 Bq/kg na vseh lokacijah.

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 [25], revidirana pa v letu 2009 (*Izpostavitve referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo – Nova referenčna lokacija* [26]). V metodologiji so prepoznane glavne prenosne poti, načini izpostavitve in referenčne osebe¹⁰ za Slovenijo in Hrvaško. Za modelno oceno obremenitev, ki bi jih lahko prinesle zgolj po Savi potekajoče prenosne poti,

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



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.

Enodimenzionalni (veljavni) model

V tabeli 1.4 je podan inventar letnih tekočinskih izpustov NEK za obdobje 2016–2022. Aktivnost izpuščenega tritija H-3 v letu 2022 (24,3 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 2022 0,16 GBq. Pri izračunu letne učinkovite doze nismo upoštevali prispevka žlahtnih plinov Xe-131m, Xe-133, Xe-133m, Xe-135, Kr-85m in drugih zelo kratkoživih radionuklidov, ker za vnos v telo niso pomembni.

Za izračun letne učinkovite doze v letu 2022 so bili uporabljeni naslednji vhodni podatki:

- letni izpust radionuklidov iz poročil NEK (tabela 1.4);
- povprečni pretok Save v Brežicah v tem obdobju ($144 \text{ m}^3/\text{s}$);
- 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 ($6,8 \text{ g/m}^3$, 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 za vnos izpuščenih radionuklidov 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 $0,011 \text{ } \mu\text{Sv}$. Na bližji lokaciji (350 m nizvodno od NEK) pa je izračunana letna učinkovita doza za odraslo osebo (maksimalna poraba) $0,023 \text{ } \mu\text{Sv}$ (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 $0,1 \text{ } \mu\text{Sv}$). V poročilu *IJS-DP-10114* [26] 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 2016–2022 [5].

Radionuklid	2016 [Bq/leto]	2017 [Bq/leto]	2018 [Bq/leto]	2019 [Bq/leto]	2020 [Bq/leto]	2021 [Bq/leto]	2022 [Bq/leto]
H-3	1,99E+13	8,64E+12	1,05E+13	1,36E+13	2,95E+12	1,61E+13	2,43E+13
C-14	9,20E+09	1,25E+08	4,1E+07	8,76E+07	2,98E+08	1,31E+08	1,43E+08
Na-24	–	–	–	–	–	–	–
Cr-51	–	–	–	–	–	–	4,02E+06
Mn-54	–	–	4,57E+05	4,01E+04	4,28E+05	9,07E+05	3,39E+04
Fe-55	2,95E+06	2,02E+06	3,96E+06	4,25E+06	2,97E+06	3,86E+06	2,80E+06
Fe-59	–	–	–	–	–	–	–
Co-57	–	–	–	–	–	–	–
Co-58	2,22E+06	5,97E+05	3,40E+06	7,33E+06	1,18E+06	9,09E+06	4,98E+06
Co-60	2,36E+06	1,38E+06	2,00E+06	3,70E+06	2,37E+06	4,94E+06	2,43E+06
Zn-65	–	–	–	–	–	–	–
Se-75	–	–	–	–	–	–	–
Sr-85	–	–	–	–	–	–	–
Sr-89	–	–	–	–	–	–	–
Sr-90	6,51E+04	1,34E+05	4,43E+04	7,80E+04	4,38E+04	4,34E+04	5,34E+04
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	3,17E+06	1,39E+06	1,96E+06	6,90E+06	1,97E+06	1,19E+07	1,84E+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	2,01E+04	–	–	1,92E+05	–	–	–
I-132	–	–	–	–	–	–	–
I-133	–	–	–	–	–	–	–
I-134	–	–	–	–	–	–	–
Cs-134	–	–	–	–	–	–	–
Cs-137	1,71E+06	1,00E+06	1,99E+06	2,17E+06	9,60E+05	1,81E+06	1,47E+06
Cs-136	–	–	–	–	–	–	–
Cs-138	–	–	–	–	–	–	–
Xe-131m	–	–	–	–	–	–	–
Xe-133	9,33E+05	–	–	–	–	–	–
Xe-133m	–	–	–	–	–	–	–
Xe-135	–	–	–	–	–	–	–
Xe-135m	–	–	–	–	–	–	–
Ba-140	–	–	–	–	–	–	–
La-140	–	–	–	–	–	–	–
Ce-141	–	–	–	–	–	–	–
Ce-144	5,91E+05	–	–	–	–	–	–
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 2022

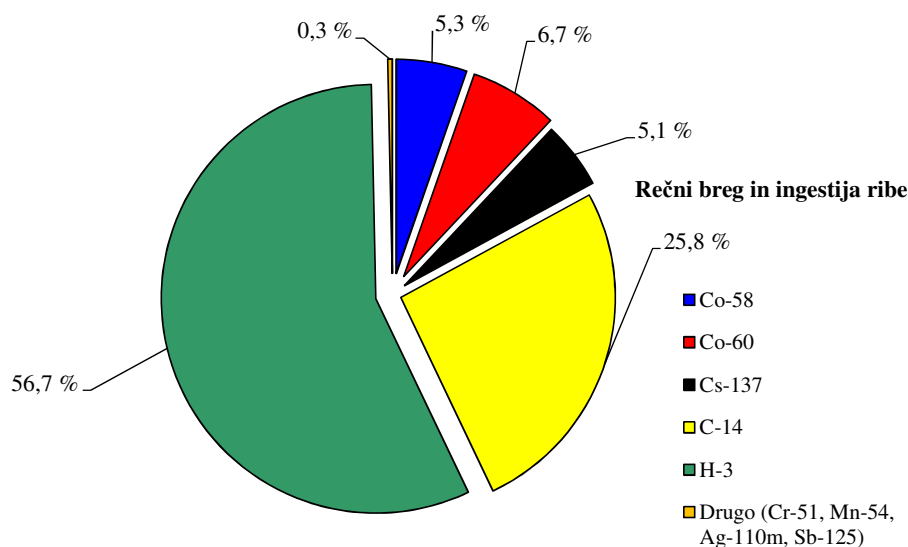
Lokacija	Brežice
Prenosne poti	Rečni breg in uživanje rib (zelo verjetna prenosna pot)
Starostna skupina referenčne osebe	Učinkovita doza (μSv na leto)
odrasli (> 17 let)	0,011 μSv Prispevek zunanjega sevanja: 0,0013 μSv Prispevek zaužitja rib: 0,0094 μSv
otroci (od 7 do 12 let)	0,0033 μSv Prispevek zunanjega sevanja: 0,0006 μSv Prispevek uživanja rib: 0,0027 μSv
dojenčki (1 leto)	0 μSv

Tabela 1.7: Ocenjena učinkovita letna doza posameznika iz prebivalstva na lokaciji 350 m pod jezo v letu 2022, pri čemer upoštevamo maksimalno izpostavljenega posameznika (ekstremna poraba)

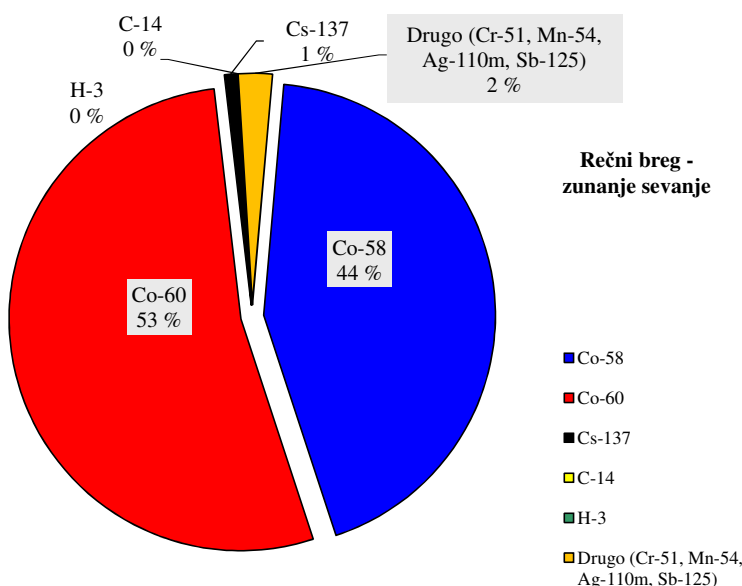
Lokacija	350 m pod jezo NEK
Prenosne poti	Rečni breg in uživanje rib
Starostna skupina	Letna učinkovita doza (μSv)
odrasli (> 17 let)	0,023 μSv Prispevek zunanjega sevanja: 0,0027 μSv Prispevek zaužitja rib: 0,020 μSv
otroci (od 7 do 12 let)	0,0071 μSv Prispevek zunanjega sevanja: 0,0014 μSv Prispevek uživanja rib: 0,0058 μSv
dojenčki (1 leto)	0 μSv

Na slikah 1.11, 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 (57 %, dominantno je zaužitje rib (64 %)). V prispevku zadrževanja na bregu je praktično celotna obremenitev zaradi Co-60 in Co-58, in sicer 97 %. 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 jezo NEK 0,1 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 2022. 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 2022. Največ prispevata Co-60 in Co-58.



Tridimenzionalni (novi) model

V letu 2017 je bila zgrajena HE Brežice, ki je s svojim jezo 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 [25] in revidirana v letu 2009 [26], nista bila več ustrezna. Za primerjavo je tudi ocena učinkov izračunana po novi metodologiji.

V začetku leta 2023 je bil zaključen projekt izdelave nove programske opreme DOSENEK [32]. 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 ([29], [30], [31]). 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
- 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 jezo 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)

Ob vsakem izpustu radioaktivnih snovi iz elektrarne se na posamični točki 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 efektivni 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 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 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 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. Program ločeno poda efektivne doze, ki so posledica posamičnih izpuščenih radionuklidov.

Dodatno program omogoča izračun hitrosti absorbirane doze na bioto [91]. Referenčna organizma sta postrv (ves čas plava v reki) in bokoplavutarica (pol časa plava v vodi, pol časa pa na meji med 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 [92]. Hitrosti absorbirane doze za postrv in bokoplavutarico 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 efektivnih doz zaradi tekočinskih izpustov iz NEK* [91].



Tabela 1.8: Značilnosti referenčne osebe na posamični lokaciji v pretočni akumulaciji HE Brežice, uporabljene v metodologiji za oceno letne efektivne doze [91]. 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

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 efektivna doza (μSv)	Dojenček	1,9E-08	3,6E-04	1,8E-04	1,5E-04	1,4E-04	1,5E-04	0,0E+00
	Otrok	5,3E-03	8,3E-03	4,2E-03	3,6E-03	3,4E-03	3,6E-03	1,7E-03
	Odrasli	8,5E-03	1,5E-02	7,3E-03	6,2E-03	5,8E-03	6,2E-03	2,7E-03
Hitrost absorbirane doze (μGy/dan)	Postrv	4,7E-03	4,2E-03	2,0E-03	1,7E-03	1,6E-03	1,7E-03	1,5E-03
	Bokoplavutaria	4,7E-03	4,2E-03	2,0E-03	1,7E-03	1,6E-03	1,7E-03	1,5E-03

Ocenjene letne doze za referenčne osebe in živali za točke T1-T7 so navedene v tabeli 1.9.

V splošnem so prejete efektivne 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 referenčnih osebah je najvišja ocenjena doza pri točki T2. Doza v točki T1 (350 m nizvodno) je nekoliko manjša, ker za to lokacijo ni predvideno zadrževanje na bregu in plavanje v reki.

Pri referenčnih organizmih smo predpostavili dve prenosni poti in sicer notranjo in zunanjo dozo. Ker referenčna organizma obe dozi prejmeta ne glede na lokacijo, postrv in bokoplavutaria največjo dozo prejmeta na točki T1.



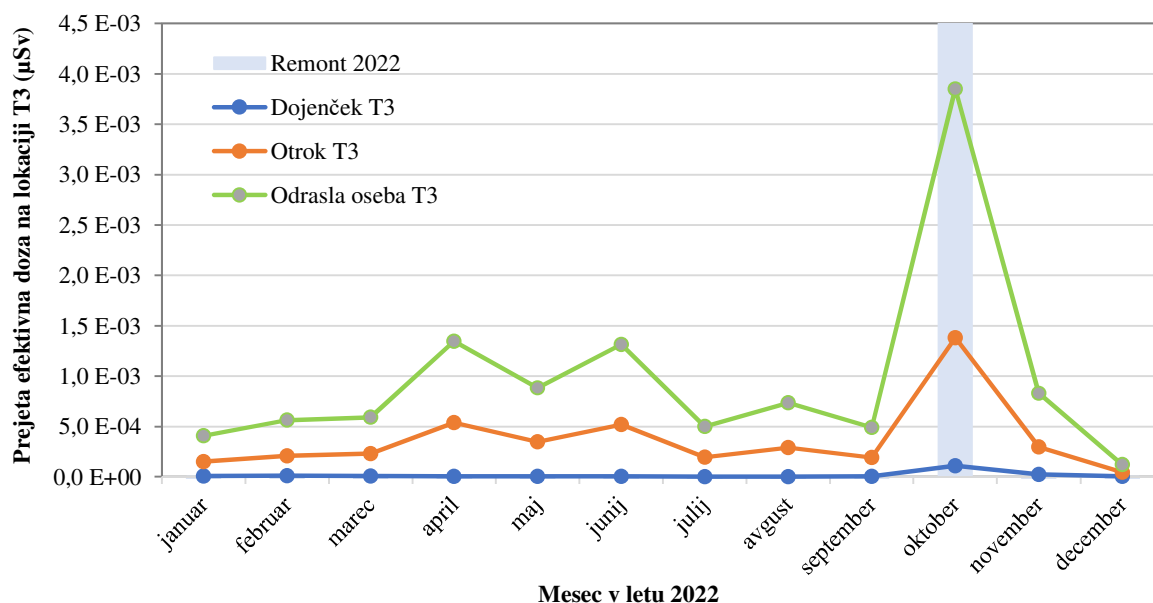
Slika 1.13 prikazuje prejete mesečne efektivne doze za tri referenčne osebe na lokaciji T3 v letu 2022. Lokacija T3 je izbrana, ker spada med točke z najvišjo prejeto efektivno dozo, ki jo referenčna oseba prejme po vseh petih prepoznanih prenosnih poteh. Opazimo lahko, da mesec oktober glede prejete doze močno odstopa. V tem času je potekal redni 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 in Co-60, pri otroku in odrasli osebi tritij H-3 in oba kobalta, pri ribah pa skoraj izključno tritij H-3.

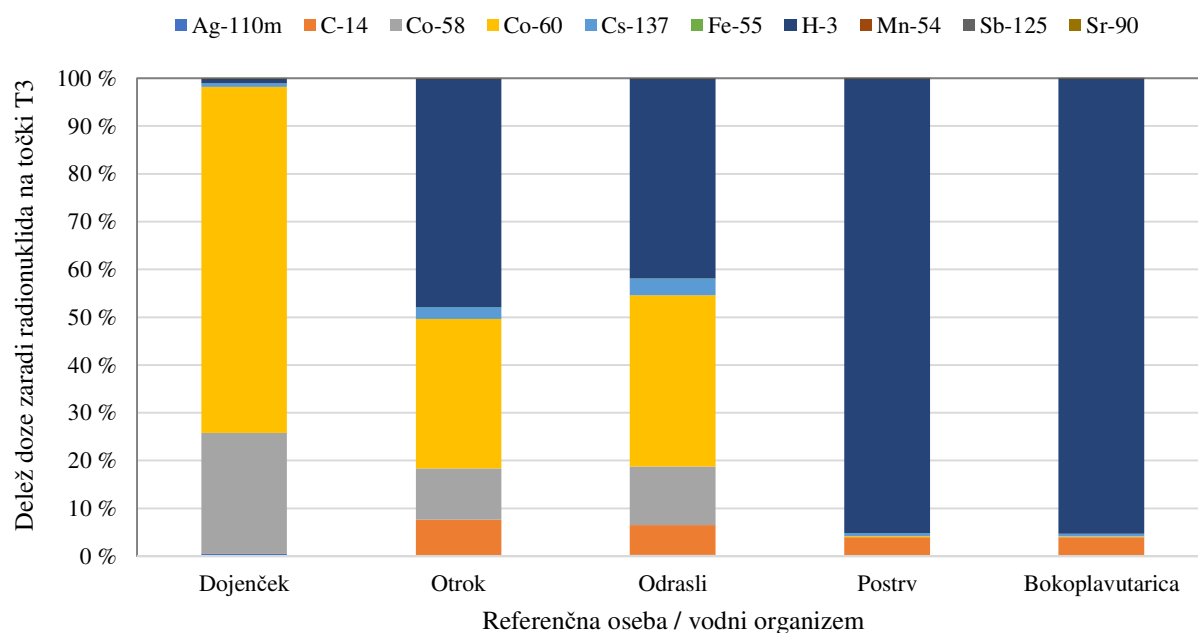
Prikazani deleži so v tesni odvisnosti z deleži po prenosnih poteh, ki jih prikazuje slika 1.15. Na tem grafu manjkata prikaza za ribi, saj je v njunem primeru notranja doza za štiri velikostne rede večja od zunanje doze. Opazimo, da otrok in odrasla oseba dozo prejmeta predvsem preko uživanja rib in izpostavljenosti na rečnem bregu. Ker za dojenčka ni predvideno prehranjevanje z ribami (tabela 1.8), je v njegovem primeru prejeta doza skoraj izključno posledica zadrževanja na rečnem bregu. Delež prejete doze zaradi dveh ostalih prenosnih poti (plavanje in čolnarjenje) je pri vseh treh referenčnih osebah manjši od 1 %. Za odraslo osebo so v tabeli 1.10 navedene prejete doze po posameznih prenosnih poteh za vse radionuklide za točko T3 v pretočni akumulaciji HE Brežice.

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 k koncentraciji, ki je posledica NEK (slika 1.6). Posredno lahko iz izmerjenih koncentracij tritija izračunamo faktor razredčitve radioaktivnih snovi od HE Brežice, Brežic oziroma Jesenic na Dolenjskem in grobo predpostavimo, da so za isti faktor manjše tudi prejete doze.

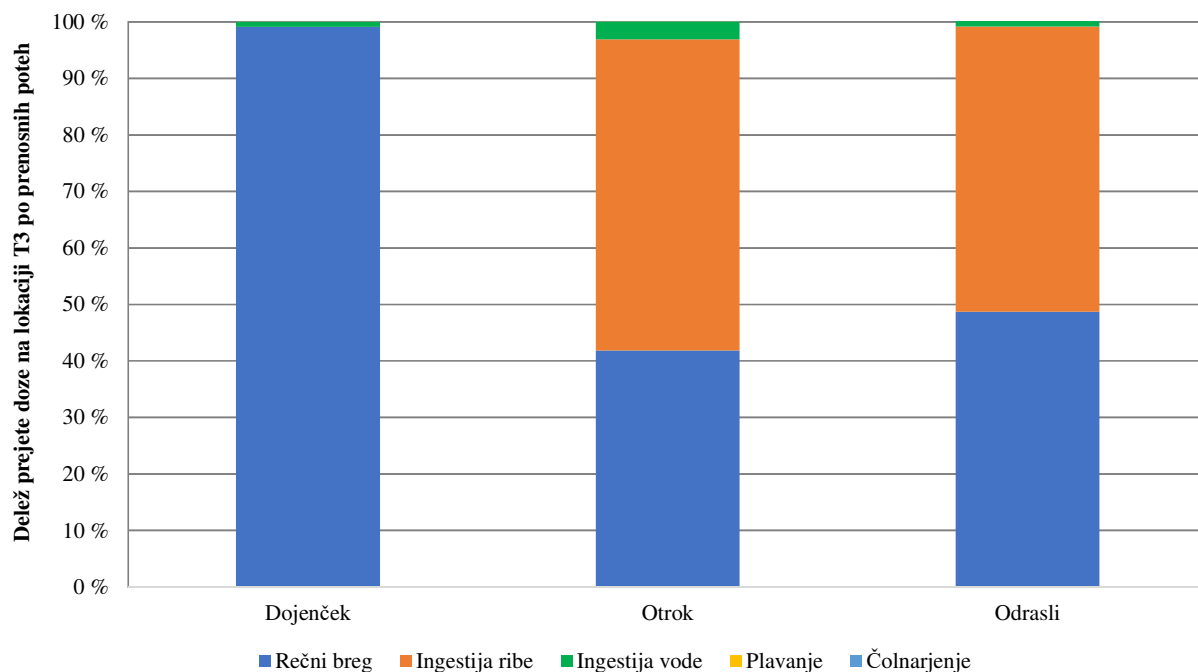
Za oceno prejetih doz referenčnih oseb na teh točkah lahko predpostavljamo, da so lastnosti teh oseb na lokacijah Brežice in Jesenice na Dolenjskem enake kot za osebe na lokacijah T3–T6. S tem zajamemo vseh pet prenosnih poti. Za potrebe računanja predpostavimo, da za točke T3–T6 in lokacijo Brežice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



Slika 1.13: Prikaz mesečnih prejetih efektivnih doz referenčne osebe po starostnih skupinah (dojenček, otrok in odrasla oseba) na lokaciji T3 v letu 2022. Močno je opazen vpliv rednega remonta NEK, v času katerega so bile izpuščene aktivnosti radionuklidov višje kot sicer.



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 (ribi) je učinkovita doza zaradi notranje obsevanosti za 4 velikostne rede višja od doze zaradi zunanje obsevanosti.



Povprečne koncentracije tritija na lokacijah nad jezo HE Brežice, v Brežicah in na Jesenicah na Dolenjskem so bile v letu 2022 11,0 kBq/m³, 7,4 kBq/m³ in 7,9 kBq/m³. Če od teh koncentracij odštejemo še ozadje (povprečno meritev na referenčni točki v Krškem, 0,6 kBq/m³), dobimo naslednje povprečne prirastke h koncentraciji aktivnosti tritija: 10,4 kBq/m³ (nad jezo HE Brežice), 6,8 kBq/m³ (Brežice) in 7,3 kBq/m³ (Jesenice na Dolenjskem). Točka nad jezo HE Brežice dejansko sovpa 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 1,55E–04 μSv, za otroka 3,70E–03 μSv in za odraslo osebo 6,38E–03 μSv. Grobo ocenjene prejete doze na lokacijah Brežice in Jesenice na Dolenjskem za tri referenčne osebe v letu 2022 prikazuje tabela 1.11.

Tabela 1.10: Povprečne letne koncentracije radionuklidov [Bq/m³] in letne prejete doze (μSv) za odraslo osebo po vseh petih prenosnih poteh na točki T3. 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)						
Ag-110m	2,0E-03	1,9E-05	8,6E-08	1,1E-09	2,6E-08	2,0E-07	1,9E-05
C-14	5,4E-02	2,8E-08	4,5E-04	6,0E-09	1,0E-12	0,0E+00	4,5E-04
Co-58	5,4E-03	8,9E-04	3,9E-06	7,5E-10	2,4E-08	1,9E-07	8,9E-04
Co-60	6,3E-03	2,6E-03	2,1E-05	4,0E-09	7,4E-08	5,5E-07	2,6E-03
Cs-137	1,5E-03	2,7E-05	2,3E-04	3,7E-09	4,0E-09	3,1E-08	2,6E-04
Fe-55	3,3E-03	0,0E+00	9,6E-07	2,1E-10	0,0E+00	0,0E+00	9,6E-07
H-3	2,5E+04	0,0E+00	2,9E-03	8,4E-05	0,0E+00	0,0E+00	3,0E-03
Mn-54	9,7E-06	2,0E-06	5,2E-09	1,3E-12	3,7E-11	2,9E-10	2,0E-06
Sb-125	1,0E-03	3,9E-06	7,4E-07	2,2E-10	1,9E-09	1,7E-08	4,7E-06
Sr-90	6,1E-05	2,1E-07	6,2E-07	3,3E-10	3,8E-14	0,0E+00	8,3E-07
Skupna doza (prenosna pot)		3,5E-03	3,6E-03	8,4E-05	1,3E-07	9,8E-07	7,3E-03

Tabela 1.11: Ocene prejetih efektivnih doz za referenčno osebo po starostnih skupinah (dojenček, otrok, odrasla oseba) na lokacijah Brežice in Jesenice na Dolenjskem v letu 2022. Vrednosti so podane v enotah μSv.

Lokacija	Brežice	Jesenice na Dolenjskem
Starostna skupina	Efektivna doza (μSv)	
Dojenček	1,01E–04	1,09E–04
Otrok	2,42E–03	2,60E–03
Odrasla oseba	4,17E–03	4,48E–03



Ocenjene prejete doze so za lokacijo Jesenice na Dolenjskem višje kot za Brežice. To je posledica nepričakovanih rezultatov meritev, ki so v letu 2022 v Jesenicah pokazali višje vrednosti tritija kot v Brežicah. Pri prejetih dozah v tabeli 1.11 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 do trikrat višja kot z uporabo novega modela. Razliko pripisujemo realni porabi, ki jo upoštevamo v računih pri novem modelu. Prav tako pri enodimenzionalnem modelu upoštevamo konzervativne predpostavke, kar zvišuje ocenjeno vrednost. Prav takšna je tudi razlika pri ocenjenih efektivnih dozah za odraslo osebo v Brežicah.

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 2022 nekoliko višji od dolgoletnega povprečja. Povprečne letne koncentracije aktivnosti H-3 so na vseh odvzemnih mestih nekaj kBq/m³ (6,8–19,8 kBq/m³), kar je do 35-krat več od običajnega ozadja (okrog 0,6 kBq/m³). Tritij in Co-60 sta glede na prispevek k prejeti dozi referenčnih oseb prevladujoča radionuklida. Sledita še Co 58 in C-14.

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, Ag-110m in Sb-125. Aktivnost naštetih radionuklidov v izpustih je pet 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 ribi. Izmerjene specifične aktivnosti v vzorcih so enake značilnim okoljskim vrednostim. Prispevek C-14 iz tekočinskih izpustov iz NEK smo ocenili iz meritev v četrtletnih vzorcih WMT, ki jih je opravil IRB.

V letu 2022 I-131 ni bil zaznan v izpustih NEK, redno pa ga opazimo v vseh 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 2022 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 2022 in upoštevania 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 0,023 μ Sv 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* [27]. 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 jezu NEK in Brežice) do trikrat 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 T2 (nižja ali enaka $0,015 \mu\text{Sv}$ na leto za odraslo osebo, $0,008 \mu\text{Sv}$ za otroka in $0,0004 \mu\text{Sv}$ za dojenčka – tabeli 1.8 in 1.9). Tudi hitrosti absorbirane doze za postrv in bokoplavutarico 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 točki 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 2022 ter na podlagi rezultatov meritev iz preteklih let ugotavljamo učinek izpustov NEK na pitno vodo in podtalnico v občinah Krško in Brežice. V letu 2022 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 je bilo analiziranih še 14 vzorcev na dveh dodatnih referenčnih lokacijah. V odvzetih vzorcih so bile izmerjene koncentracije aktivnosti naravnih in umetnih radionuklidov. Tako kot v prejšnjih letih sta bila tudi v letu 2022 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 0,2 % v brežiškem in 1,4 % 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 2022 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 2022 ni bila spremenjena nobena lokacija. Vodovod Ljubljana je referenčna lokacija in se redno analizira v okviru republiškega nadzora radioaktivnosti v pitni vodi v Sloveniji [19]. Izračun izpeljanih vrednosti koncentracij (IK) umetnih radionuklidov v pitni vodi je v *Uredbi o mejnih dozah, referenčnih ravneh in radioaktivni kontaminaciji (UV2)* [10]. 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.

Pandemija ni vplivala na obseg in kakovost vzorčenja ter analiz. 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 2022 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 odmikov.

Med radionuklidi umetnega izvora v letu 2022 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 [46]. 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 2022 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 jezua 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 [19].

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 [48] 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) [49]. Vrtini in vodnjaka zagotavljata skoraj 98 % pitne vode, od tega dobro polovico, skoraj 52 % celotne pitne vode, vodnjak Glogov Brod.

Centralni vodovodni sistem Ljubljana sestavlja pet vodarn s 44 črpališči, področje je razdeljeno na devet vodooskrbnih območij [50].

V vseh treh vodovodnih sistemih izvajajo nadzor pitnih vod po ustaljenih postopkih na osnovi HACCP načrtov. 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 Krško v letu 2022 poročali o 1,6 % neskladnih vzorcih za mikrobiološka preskušanja, vsi vzorci so bili ustrezni na kemijskih preskušanjih. Za vodovoda Brežice in Centralni vodovodni sistem Ljubljana v času priprave tega poročila na spletu še ni bilo letnega poročila s podatki za leto 2022.



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 2022, IJS-DP-14320, marec 2023*, 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 2022 razdelimo v tri različne razrede. Večino leta 2022 so vrednosti za tritij s črpališča Brege in vodovoda Spodnji Stari Grad primerljive, drugi par sta črpališče Brežice - Glogov Brod in vodovod Brežice, tritijeve vrednosti za vzorce s črpališča Rore pa so med obema paroma. V letu 2022 so vsebnosti tritija za črpališče Brege brez velikih posebnosti, ni opaznih razlik med pomladno – poletnim in jesensko – zimskim obdobjem, kar je običajni naravni potek koncentracij aktivnosti tritija predvsem v padavinah. Povprečna vrednost tritija za črpališče Brege je istega velikostnega reda kot v zadnjih treh letih in še vedno pada. Črpališče Brege je vir pitne vode z najvišjimi vrednostmi tritija v Sloveniji, vendar dosega manj kot dva odstotka mejne vrednosti 100 Bq/L^{11} , ki je predpisana v *EU direktivi za pitne vode* [41]. Vzorci vode vodovoda Spodnji Stari Grad so glede tritija v večini leta 2022 nekoliko nižji kot vrednosti za črpališče Brege, vendar primerljivi znotraj istega velikostnega razreda, kar pomeni, da je glavni vir vode vodonosnik, ki napaja črpališče Brege. V pomladanskih mesecih med marcem in majem opazimo v vzorcih vodovoda Spodnji Stari Grad izrazitejšo mešanje z vodo, ki je po lastnostih sorodna vzorcem iz črpališča Rore. Vodovod Spodnji Stari Grad se je torej v letu 2022 predvsem napajal z vodo iz črpališča Brege, kar je drugače kot leta 2021. Najnižje in precej konstantne vsebnosti tritija smo tudi v letu 2022 izmerili v vzorcih iz vodovoda Brežice in črpališča Glogov Brod, njuni povprečni vrednosti sta nekoliko nižji kot v letu 2021. Tako tudi za leto 2022 lahko trdimo, da sta se črpališče Glogov Brod in vodovod Brežice napajala iz istega vodonosnika, kjer prevladuje starejša voda z nizkimi koncentracijami aktivnosti tritija. Vrednosti so praktično identične za obe vzorčevalni mesti, tako kot je bilo to leta 2021 in prej. V letu 2022 za ti dve vzorčevalni mesti ni bilo odstopanj.

Tudi z vzorci s črpališča Rore se bolj ali manj nadaljuje potek celotnega obdobja od junija 2015 dalje, ko je bilo to črpališče vključeno v redni radiološki nadzor. Vpliva letnih časov ni videti, kar pomeni, da nimamo opraviti s pomembnejšim deležem meteornih vod.

Tabela 2.1 Srednja vrednost koncentracije aktivnosti H-3 v črpališčih in vodovodih v okolici NEK za obdobje od leta 2018 do 2022

	2022 (Bq/m^3)	2021 (Bq/m^3)	2020 (Bq/m^3)	2019 (Bq/m^3)	2018 (Bq/m^3)
ČRPALIŠČE BREGE	1026 ± 20	1401 ± 37	1473 ± 48	1319 ± 46	2043 ± 67
ČRPALIŠČE RORE	491 ± 11	573 ± 16	554 ± 18	620 ± 24	600 ± 20
VODOVOD SP. STARI GRAD	897 ± 17	812 ± 21	1058 ± 35	1177 ± 41	2010 ± 61
VODOVOD BREŽICE	104 ± 5	118 ± 6	99 ± 8	77 ± 8	83 ± 8
ČRPALIŠČE BREŽICE	117 ± 5	143 ± 40	114 ± 27	81 ± 18	250 ± 52

¹¹ 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].

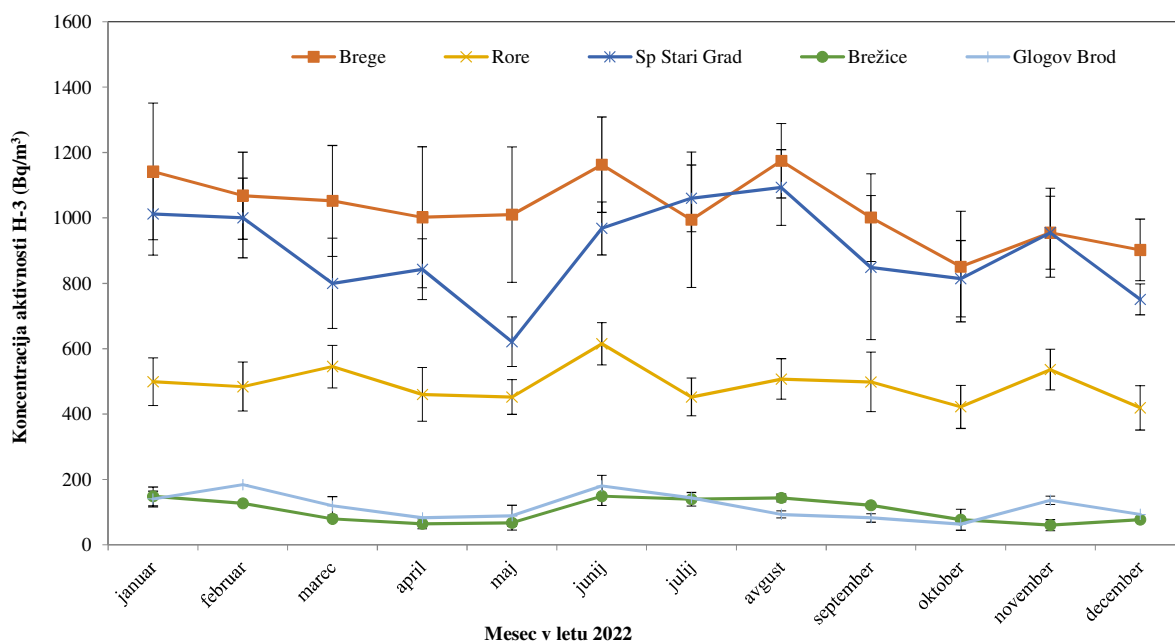


Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti tritija za mesečne vzorce z neprekinjenim vzorčenjem od leta 2018 do leta 2022 so zbrana v tabeli 2.1. Medtem ko se srednje vrednosti za črpališče Rore, črpališče Glogov Brod in vodovod Brežice v tem obdobju znatno ne spreminjajo, opazimo znižanje srednje vrednosti za črpališče Brege in vodovod Spodnji Stari Grad. Vrednosti se hitreje spreminjajo v vodovodu Spodnji Stari Grad, saj se deleži v mešanici vod iz leta v leto spreminjajo in zato tudi vrednosti tritija nekoliko nihajo.

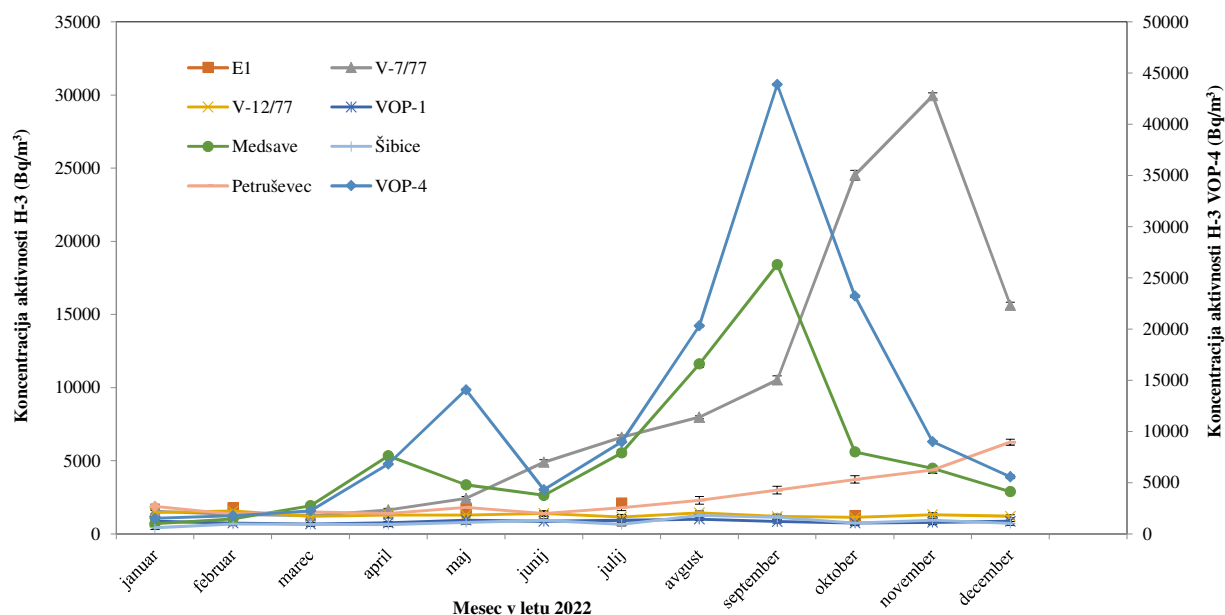
Poleg rednih mesečnih odvzemov vode na črpališčih in vodovodih v občinah Krško in Brežice je bila tudi v letu 2022 analizirana voda s po štirimi posamičnimi odvzemi na bencinskih servisih Petrol v Krškem in v Brežicah. Vrednosti za vodo iz brežiškega vodovoda so nizke; izračunana srednja vrednost koncentracije aktivnosti je 100 Bq/m^3 . V vzorcih krškega vodovoda so vrednosti drugega velikostnega reda, v povprečju okrog 460 Bq/m^3 in so primerljive s koncentracijo aktivnosti tritija v ljubljanskem vodovodu ($(503 \pm 54) \text{ Bq/m}^3$) in povprečno vrednostjo s črpališča Rore. Rezultati posamičnih vzorcev so primerljivi z mesečnimi vrednostmi matičnih vodovodov. Krški Petrol je v dneh vzorčenja očitno prejel večino vode iz črpališča Rore. Vsi štirje rezultati za četrtnetne 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 V-12/77, VOP-1, Šibice in četrtnetno vzorčena vrtina E1. Njihove vrednosti so primerljive čez celotno leto 2022, povprečna vrednost je sorazmerno nizka, okrog 1300 Bq/m^3 . V vrtinah VOP-4, V-7/77 in Medsave vrednosti zelo variirajo, od podobnih vrednosti kot v vrtinah iz prve skupine, do tudi 34-krat višjih vrednosti. Tudi v letu 2022 opazimo podoben potek vrednosti za vse tri 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. Dobra korelacija je predvsem med vrtinama VOP-4 in Medsave. Rezultati za vrtine iz druge skupine so navezani na potek izpustov. Visoke vrednosti sovpadajo z izpusti pred rednim remontom v oktobru 2022. Strategija izpustov je bila v letu 2022 drugačna kot v letu 2021 in zato je tudi odziv v vrtinah drugačen. Korelacija med izpusti in koncentracijo aktivnosti v vrtini VOP-4 je izredno dobra, če upoštevamo enomesečni zamik med izpusti in vsebnostjo tritija v vrtini. Vrtina Medsave se odziva v približno enakem obsegu kot VOP-4. Vrtino Petruševac lahko uvrstimo v drugo skupino vrtin, ki reagirajo na izpuste tritija iz NEK, le da z večjim, približno petmesečnim zamikom. Maksimum koncentracije aktivnosti tritija v tej vrtini, ki bo posledica intenzivnejših izpustov med marcem in septembrom 2022, torej pričakujemo v začetku leta 2023 in seveda ne bo tako izrazit kot v preostalih treh omenjenih vrtinah. 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 v enakomernih razmakih, ki sovpadajo s periodo remontov.

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. Izpusti v letu 2022 so bili najvišji v zadnjih dvajsetih letih ($24,3 \text{ TBq}$), korelacija je 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 izrazitejše zaradi stabilnega vodostaja, moramo dopolniti s pristavkom, da za to obstaja prag aktivnosti, kar smo potrdili tako z lanskimi kot z letošnjimi meritvami. Na sliki 2.3 so prikazani večletni rezultati za vse vrtine. Medtem ko je bila korelacija med vrtinama 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 vrtinah neznatna.



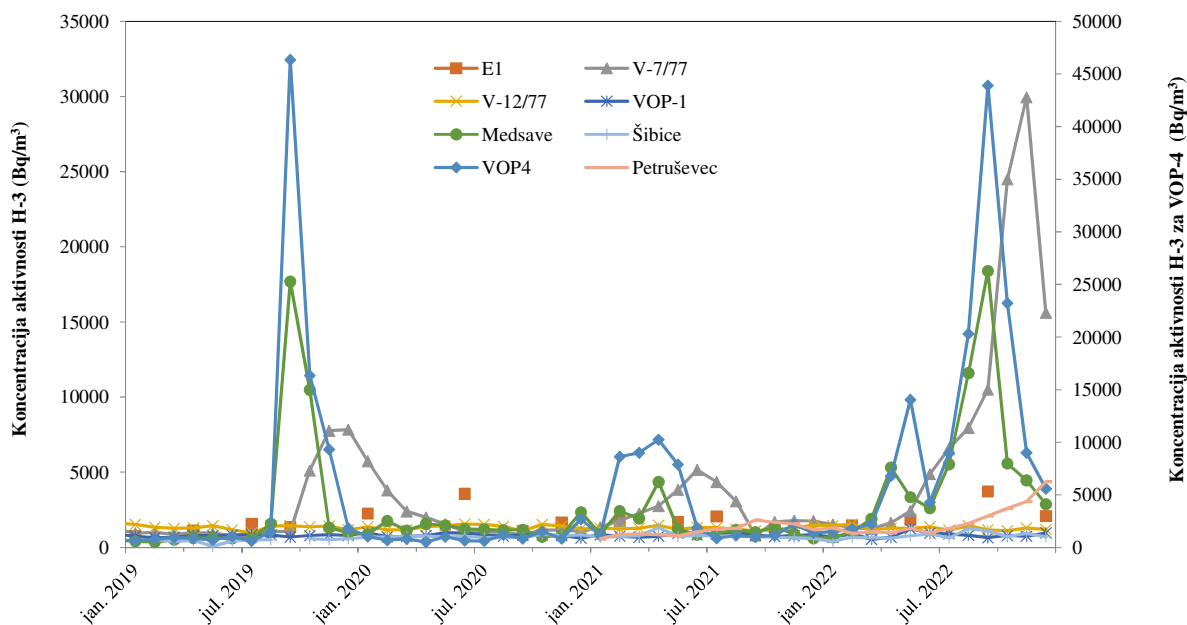
Slika 2.1: Mesečna koncentracija aktivnosti H-3 v vzorcih pitne vode iz črpališč in vodovodov krško – brežiškega polja za leto 2022



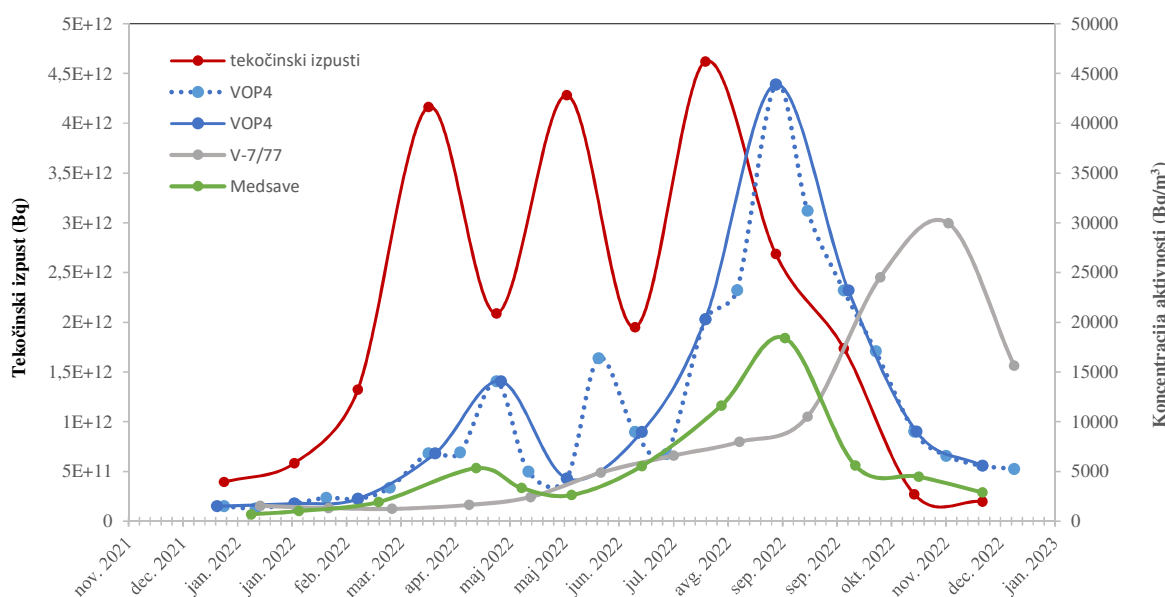
Slika 2.2: Koncentracija aktivnosti H-3 v mesečnih vzorcih vrtin



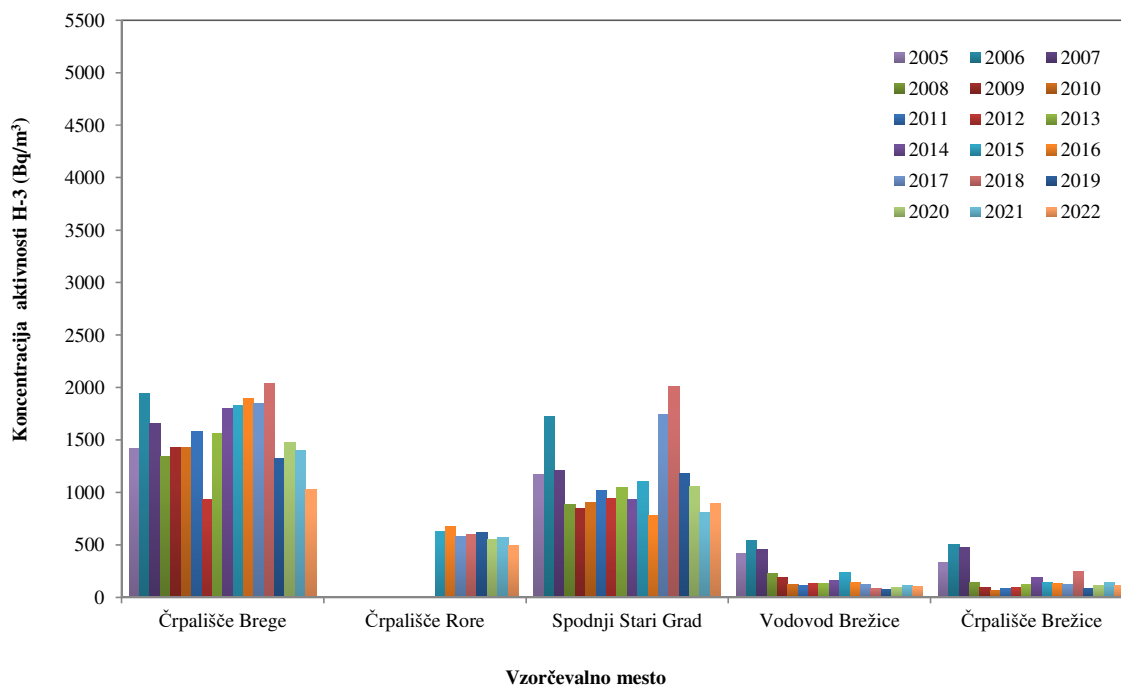
Na sliki 2.4. so prikazani rezultati koncentracije aktivnosti tritija za drugo skupino vrtin in aktivnosti tekočinskih izpustov. Vrednosti za vrtine so rezultati za enkratne mesečne vzorce. Vrtino VOP-4 zaradi želje po boljšem razumevanju hidrogeološke dinamike podzemnih vod in vodonosnikov krško – brežiškega 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.



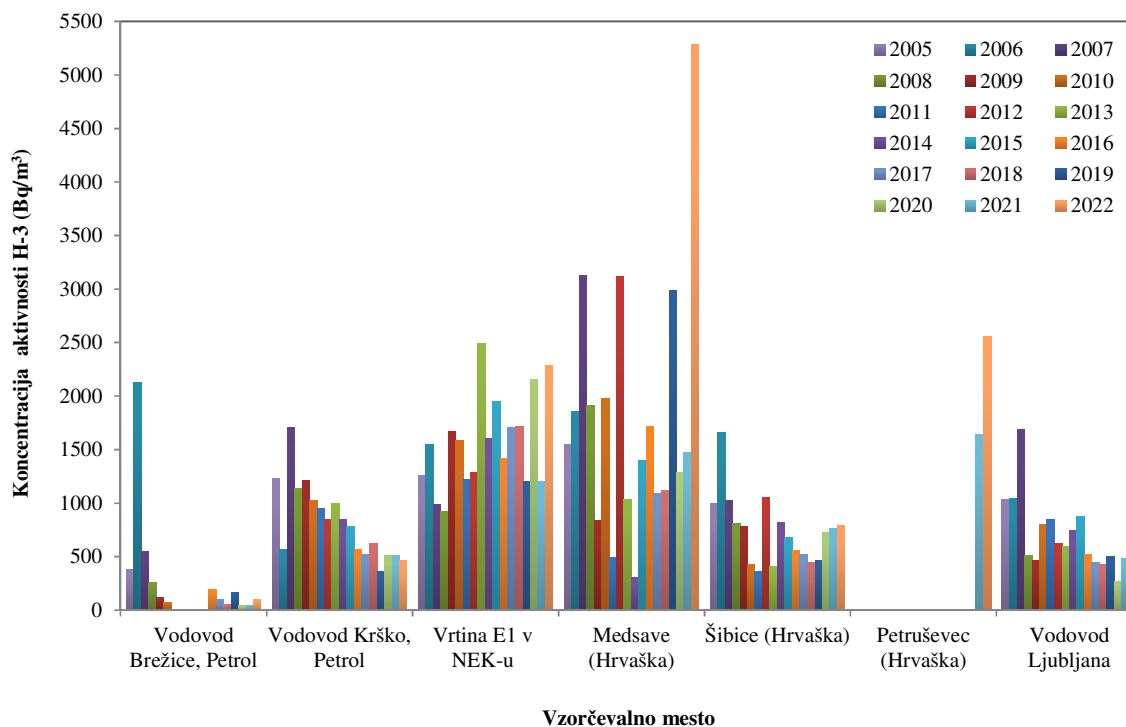
Slika 2.3: Koncentracije aktivnosti tritija za obdobje 2019–2022 za vse vrtine, ki so vključene v nadzor.



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 2022 v okolici NEK



Slika 2.6: Povprečne letne koncentracije aktivnosti H-3 v vodovodih in podtalnici od leta 2005 do 2022 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 2022 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 2022 so istega reda velikosti kot v zadnjih dveh letih. Izjema je vrednost za vrtino Medsave, ki je v letu 2022 občutno višja kot prejšnja leta, tako kot je bil najvišji tudi izpust NEK. Pri nekaterih vodovodih, črpališčih in vrtinah opazimo rahlo povečanje mesečne koncentracije aktivnosti, kar je lahko posledica večjega izpusta v 2022. Tudi hidrološke razmere, kot na primer sprememba nivoja podtalnice, vodostaja in pretoka Save, so iz leta v leto nekoliko drugačne in lahko vplivajo na povprečno vsebnost tritija v vzorcih.

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

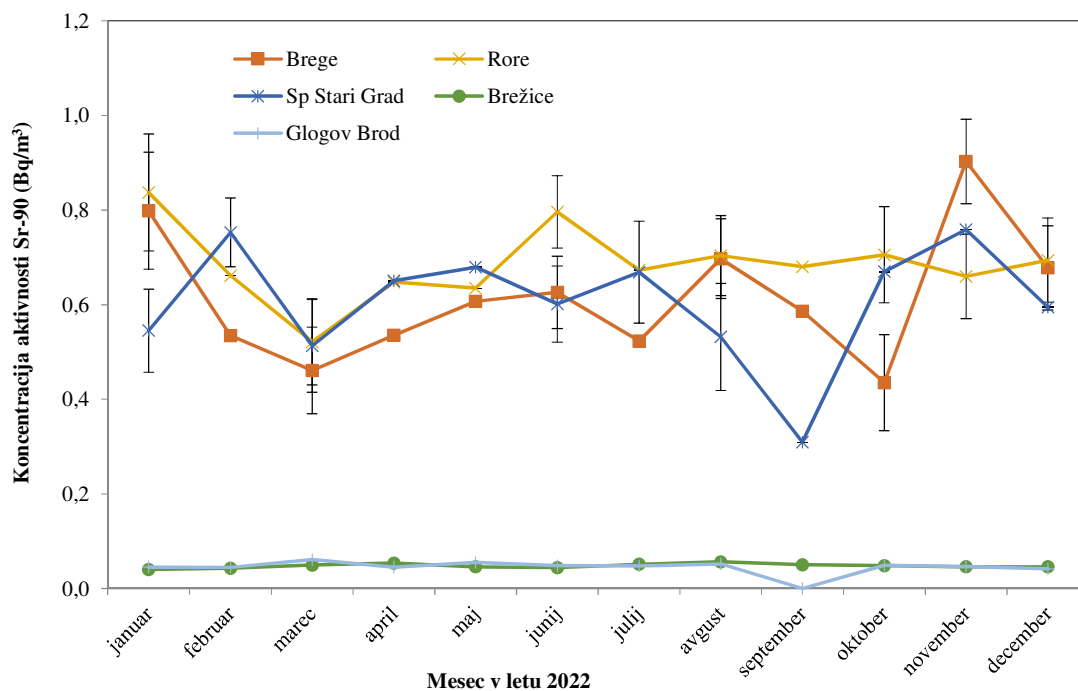
Med umetnimi radionuklidi smo pozorni predvsem na vsebnost cezija Cs-137 in stroncija Sr-90. Oba sta nehomogeno razširjena tudi na naših tleh, pripisujemo ju predvsem črnobilski nesreči in nadzemnim jedrskim poskusom. V majhnih količinah se pojavljata tudi v izpustih NEK. Oba lahko uporabimo kot sledilca za študij transportnih procesov. V tabeli 2.2 so prikazani deleži vzorcev, v katerih sta bila radionuklida izmerjena. Cs-137 se pojavlja v 19 % vzorcev, kar je več kot prejšnja leta. Stroncij je bil izmerjen v 75 % vzorcev, kar je primerljivo z letom 2021. 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 2022. 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 640 Bq/m³, ni posebnih odstopanj glede na letni čas, vrednosti so tudi primerljive z lanskimi rezultati.

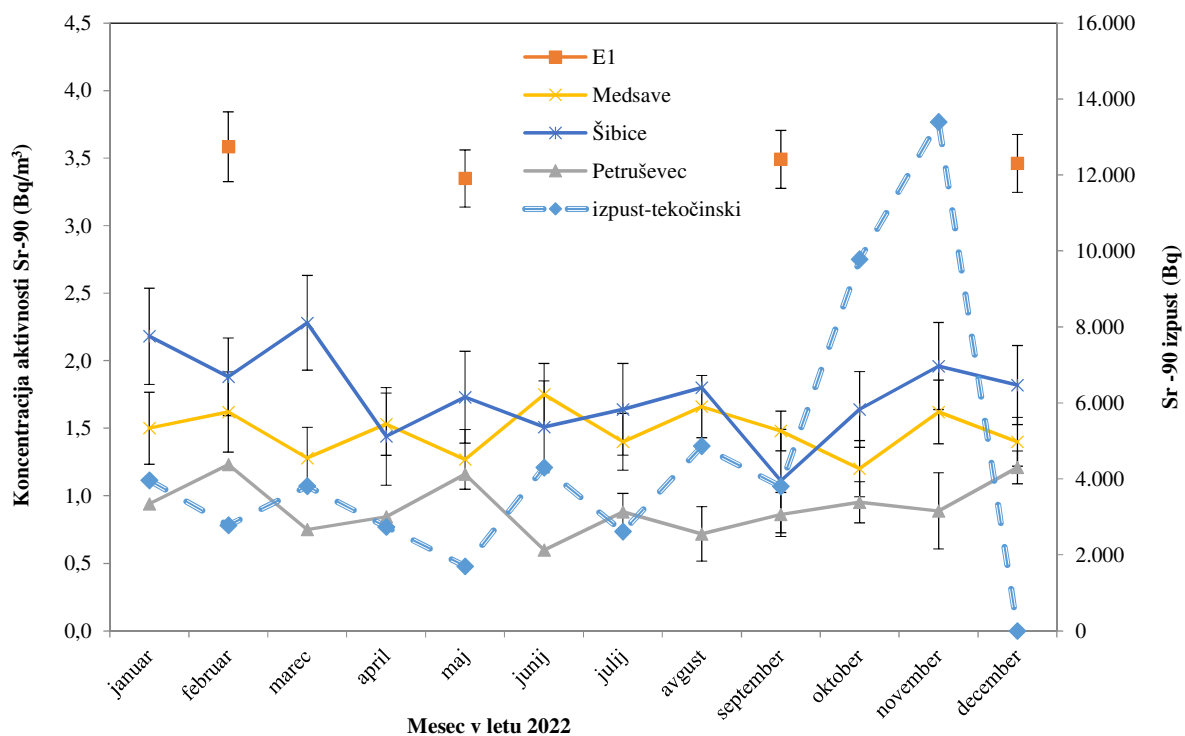
Na sliki 2.8 so prikazani mesečni tekoči izpusti Sr-90 iz NEK in koncentracija aktivnosti stroncija v hrvaških vrtinah in vrtini E1 znotraj ograje NEK. Tudi tu ni opaziti posebnosti, vrednosti za posamezno vzorčevalno mesto so čez celo leto primerljive, tudi vrednosti za vrtine so zelo podobne, predvsem to velja za vrtino 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 nižje kot v letu 2021, v primerjavi s hrvaškimi vrtinami pa 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

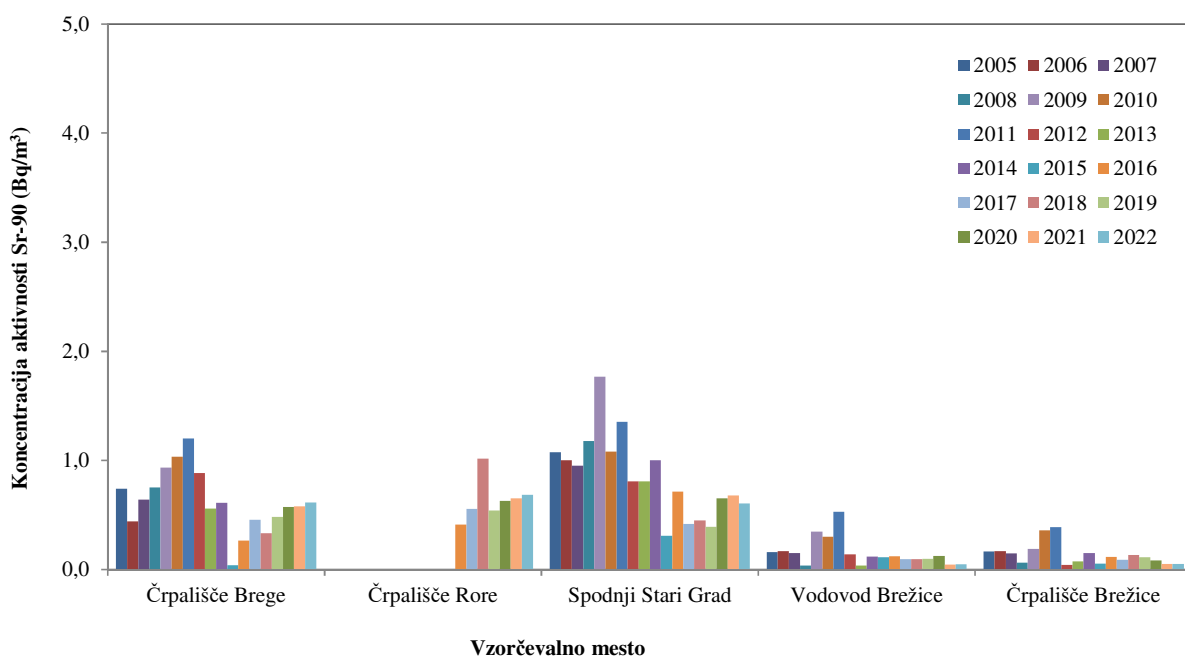
	št. mest	št vzorcev na leto	skupno število vzorcev	Cs-137	delež	Sr-90	delež
črpališča vodovodi	5	12	60	10	0,17	36	0,60
	2	4	8	1	0,13	5	0,63
	2	1	2	0	0,00	1	0,50
vrtine SLO	1	4	4	1	0,25	4	1,00
vrtine HR	3	12	36	9	0,25	36	1,00
skupaj	13		110	21	0,19	82	0,75



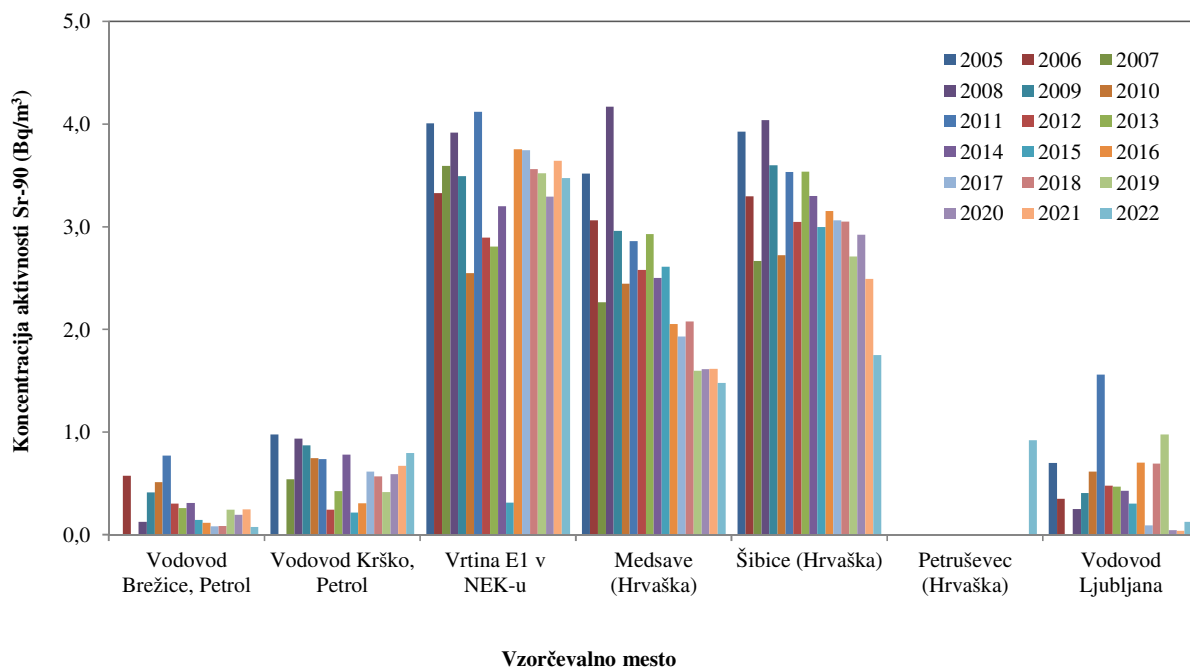
Slika 2.7: Koncentracija aktivnosti Sr-90 v mesečnih sestavljenih vzorcih iz črpališč in vodovodov v okolici NEK v letu 2022



Slika 2.8: Koncentracija aktivnosti Sr-90 v posamičnih mesečnih vzorcih vrtin ter mesečni tekočinski izpusti Sr-90 v Savo v letu 2022



Slika 2.9: Povprečne letne koncentracije aktivnosti Sr-90 v vodovodih in črpališčih v okolici NEK od leta 2005 do 2022



Slika 2.10: Povprečne letne koncentracije aktivnosti Sr-90 v vodovodih, črpališčih in podtalnici od leta 2005 do 2022 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 vrtine višje od najvišjih vrednosti za pitne vode. Letno povprečje koncentracije aktivnosti Sr-90 v krških črpališčih in vodovodu je bilo $0,67 \text{ Bq/m}^3$, kar je primerljivo s prejšnjima dvema letoma. V brežiškem vodovodnem sistemu je bila večina izmerjenih vrednosti pod mejo kvantifikacije. Vrednost za brežiški vodovod $0,05 \text{ Bq/m}^3$ je izpeljana iz detekcijskih mej. Za ljubljanski vodovod je bila v letu 2022 izpeljana vrednost okrog $0,13 \text{ Bq/m}^3$, kar je manj kot v vzorcih s krško-brežiškega polja in na prvi pogled približno trikrat več kot v letu 2021. Vrednosti sta kljub temu primerljivi, saj ju bremeni precejšnja negotovost. V posamično odvzetih četrletnih vzorcih vode iz vodovoda Brežice so bile tri vrednosti pod mejo zaznavnosti, v Krškem pa med seboj primerljive, v povprečju $0,80 \text{ Bq/m}^3$, kar je v obeh primerih podobno kot v letu 2021. 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 2022 na sliki 2.10 je v vseh treh vrtinah nekoliko nižje, a primerljivo z vrednostmi iz leta 2021.

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 2022 niso bili zaznani.

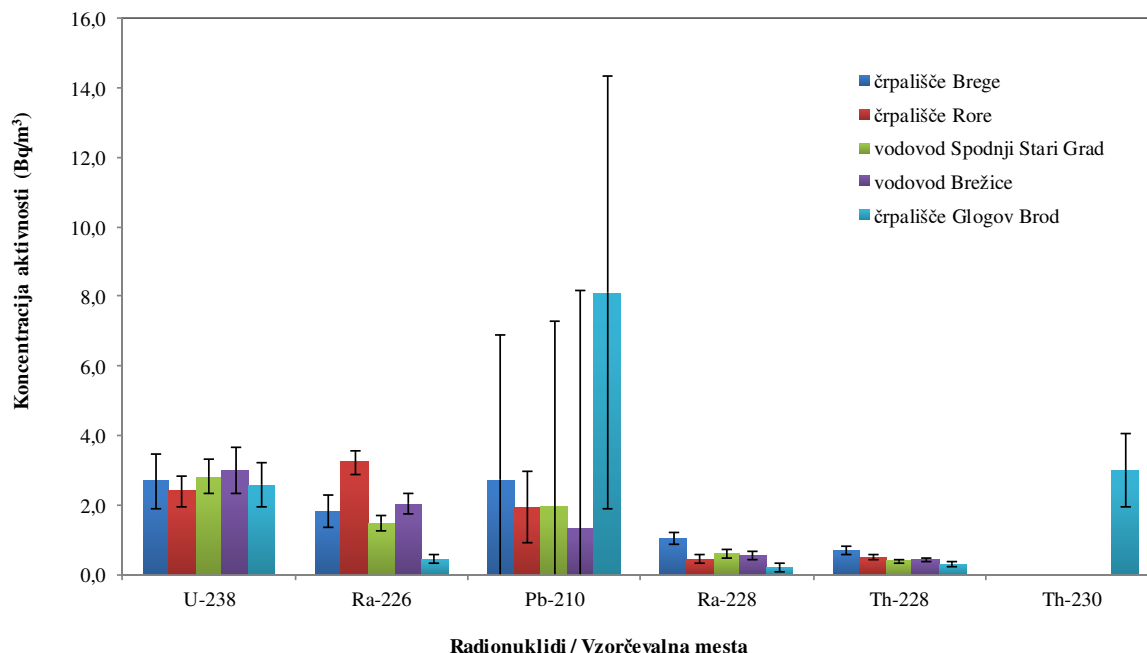
Naravni radionuklidi

Koncentracije aktivnosti naravnega radionuklida K-40 so bile leta 2022 izmerjene na vseh vzorčevalnih mestih. Mesečne koncentracije aktivnosti K-40 so v vseh črpališčih in obeh vodovodih večinoma podobne vrednostim iz leta 2021. 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 50 Bq/m^3 . V splošnem se vrednosti tudi za črpališče Brege zmanjšujejo, kar nas navaja na misel, da se na krško-brežiškem polju spreminja količina ali vsaj režim gnojenja kmetijskih površin nad območji vodonosnikov [47] 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 2022 precej višji kot na drugih vzorčevanih mestih, podobno kot leta 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. Medtem ko smo v letu 2021 v vzorcih na tem vzorčevalnem mestu petkrat izmerili vrednosti, višje od 10 Bq/m^3 , so bili taki vzorci v letu 2022 trije. Najvišja vrednost je bila tudi v letu 2022 ugotovljena v zimsko jesenskem mesecu, v novembru, in sicer $(26,8 \pm 2,4) \text{ Bq/m}^3$. Na splošno so bile, tako kot v letu 2021, tudi v letu 2022 vse tri najvišje vrednosti izmerjene v zimskih mesecih. Preverili smo tudi tritij, Be-7 in prevodnost, vendar nismo našli posebnosti. Raztros med posameznimi meseci je bil velik, saj je bila septembrska vrednost pod mejo detekcije.

Če izvezemo K-40, je v vzorcih ugotovljenega največ Pb-210 s povprečno vrednostjo okrog $3,2 \text{ Bq/m}^3$, kar je podobno kot leta 2019. Sledijo mu U-238 s približno $2,7 \text{ Bq/m}^3$, Be-7 s povprečno vrednostjo $2,2 \text{ Bq/m}^3$, in Ra-226 z $1,8 \text{ Bq/m}^3$. Povprečne vrednosti so za malenkost nižje kot v prejšnjem letu. Tudi Ra-228 in obeh torijevih radionuklidov je manj kot leto poprej. Najvišje povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti za Pb-210 je bilo tudi v letu 2022 izračunano za črpališče Glogov Brod $(8,1 \pm 6,2) \text{ Bq/m}^3$, za U-238 pa $(3,0 \pm 0,8) \text{ Bq/m}^3$ na vzorčevalnem mestu vodovoda Brežice. Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-226 se gibljejo od $0,5 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Glogov Brod) do $3,2 \text{ Bq/m}^3$ (črpališče Rore). Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-228 za črpališče Glogov Brod je $(0,23 \pm 0,12) \text{ Bq/m}^3$, za črpališče Brege pa $(1,0 \pm 0,2) \text{ Bq/m}^3$. Minimalne in maksimalne vrednosti se ne pojavljajo na istih vzorčevalnih mestih kot prejšnje leto in so nekoliko nižje 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 črpališču Glogov Brod do 3,7 Bq/m³ v vodovodu Spodnji Stari Grad, v povprečju približno 2,2 Bq/m³, kar je manj kot v letu 2021.



Slika 2.11: Povprečne letne koncentracije aktivnosti naravnih radionuklidov v vodovodih in črpališčih v letu 2022

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 2022 so bile očitne, obravnavamo jih v podpoglavjih o tritiju in stronciju. V letu 2022 smo zabeležili največji izpust H-3 v zadnjih 20 letih; letni izpust H-3 v Savo je bil približno 54 % letne omejitve izpusta, postavljenega na 45 TBq. Največji tekočinski izpust H-3 je bil avgusta (4,62 TBq), tudi v aprilu in juniju so bili izpusti istega velikostnega razreda. Največji mesečni izpust H-3 je primerljiv z najvišjo vrednostjo v letu 2021, razporejenost izpustov pa 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 2022 je prikazana na slikah 2.5, 2.6, 2.9 in 2.10. Vrednosti so tudi v letu 2022 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 oseba¹²) popije na leto 0,75 m³ vode,

¹² Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznika iz prebivalstva, ki prejemajo ali bi lahko prejeli najvišje doze.



desetletni otrok $0,35 \text{ m}^3$ vode in enoletni otrok $0,26 \text{ m}^3$ vode na leto. Te predpostavke so v rabi že vrsto let, povzete so po priporočilih Svetovne zdravstvene organizacije in privzete tudi pri pripravi dokumentov 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 efektivna 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 zaznati v izmerjenih vzorcih. Letna efektivna 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 $0,024 \mu\text{Sv}$. V brežiškem vodovodnem sistemu je ocenjena povprečna letna efektivna doza v letu 2022 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 $2,4 \mu\text{Sv}$ 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 2022 ga je bilo največ v vzorcih iz Glogovega Broda, enako kot v letu 2021. V krškem vodovodnem sistemu je prispevek umetnih radionuklidov približno devetkrat 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. Po drugi strani je skupna ocenjena doza za krški vodooskrbni sistem nižja kot za brežiški zaradi drugačnega prispevka naravnih radionuklidov. V ljubljanskem vodovodu je bil prispevek umetnih radionuklidov ocenjen na $0,009 \mu\text{Sv}$ na leto za odraslo referenčno osebo, kar je manj kot $0,7 \%$ celotne ocenjene letne doze zaradi prisotnosti umetnih in naravnih radionuklidov ($1,5 \mu\text{Sv}$) v pitni vodi. Celotna ocenjena letna doza je bila v letu 2022 za Ljubljančane nižja kot za prebivalce Brežic in Krškega. Poudariti velja, da je letna efektivna 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 efektivnih 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 2022 je ocenjena letna efektivna doza za vsa krško – brežiška vzorčevalna mesta nekoliko nižja kot v letu 2021. Slika 2.13 je podobna, le da gre za ocenjene letne efektivne 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 efektivni 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.

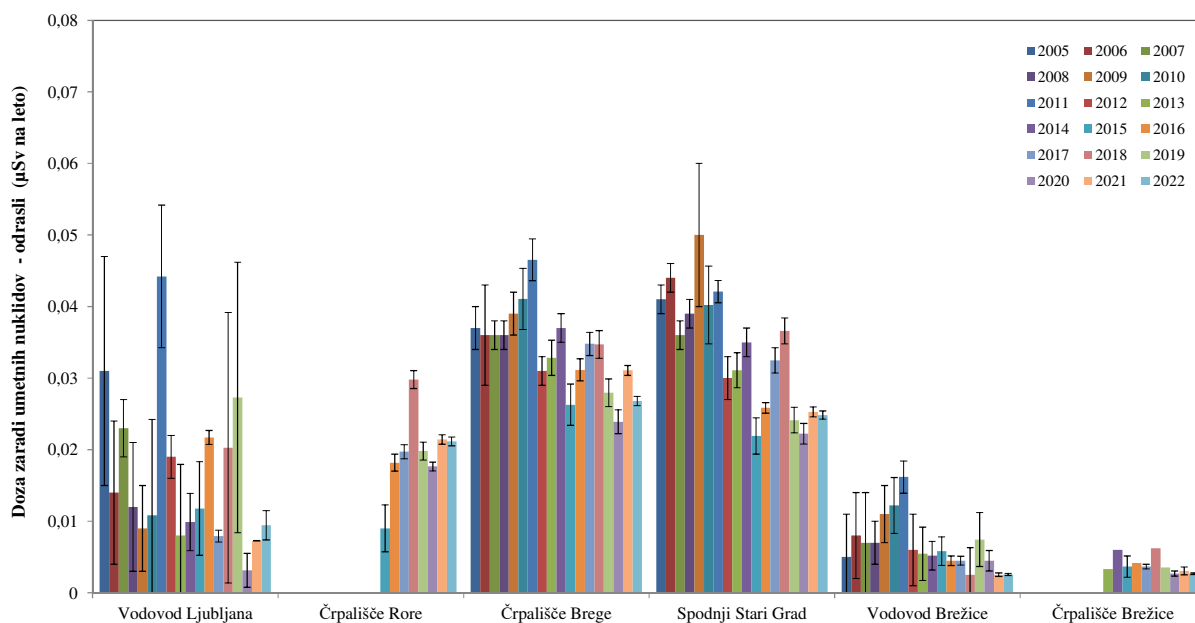


Tabela 2.3: Izračunane letne efektivne doze ter njihove vsote za odraslo referenčno osebo, otroka in dojenčka zaradi umetnih in naravnih radionuklidov v vodovodih ter črpališčih pitne vode in podtalnice v letu 2022 za krške vodovode in črpališča.

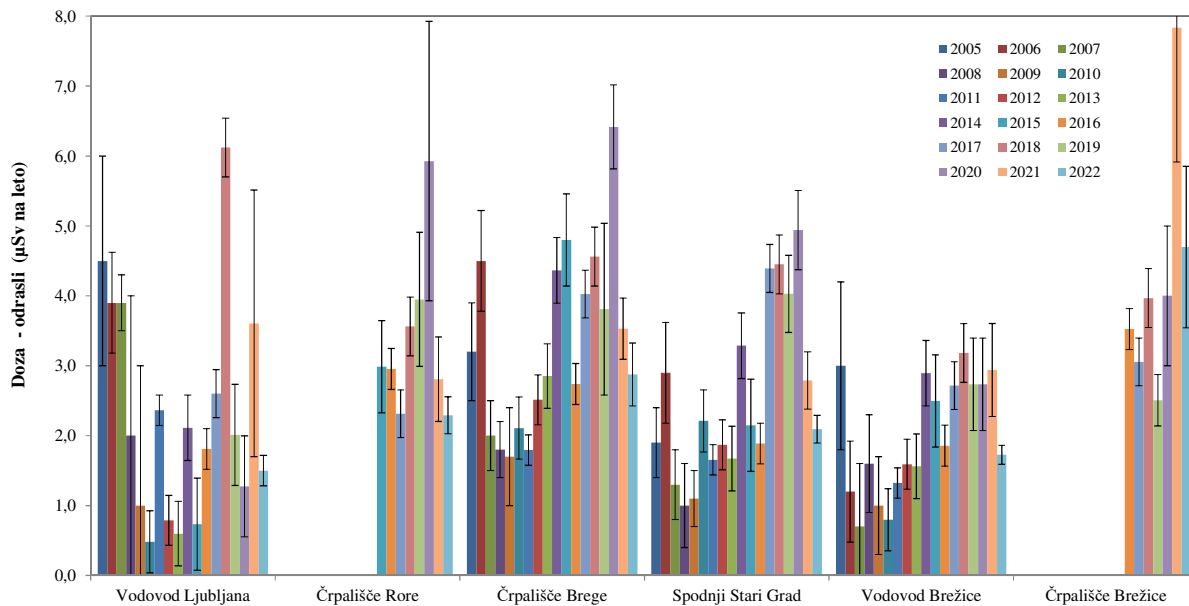
STAROSTNA SKUPINA	vrsta radionuklidov	vodovod Krško	Črpališče Brege	Črpališče Rore	Vodovod Krško (Spodnji Stari Grad)
		Letna efektivna doza (μSv)			
ODRASLI	umetni	0,023 $\pm$ 0,001	0,027 $\pm$ 0,001	0,021 $\pm$ 0,001	0,025 $\pm$ 0,001
	naravni	1,6 $\pm$ 0,1	2,8 $\pm$ 0,4	2,3 $\pm$ 0,3	2,1 $\pm$ 0,2
	Vsota	1,6 $\pm$ 0,1	2,9 $\pm$ 0,4	2,3 $\pm$ 0,3	2,1 $\pm$ 0,2
OTROCI	umetni	0,020 $\pm$ 0,001	0,021 $\pm$ 0,001	0,018 $\pm$ 0,001	0,020 $\pm$ 0,001
	naravni	2,8 $\pm$ 0,3	4,3 $\pm$ 0,6	3,2 $\pm$ 0,4	3,0 $\pm$ 0,3
	vsota	2,8 $\pm$ 0,3	4,3 $\pm$ 0,6	3,2 $\pm$ 0,4	3,0 $\pm$ 0,3
DOJENČKI	umetni	0,055 $\pm$ 0,003	0,054 $\pm$ 0,002	0,049 $\pm$ 0,002	0,051 $\pm$ 0,002
	naravni	14,1 $\pm$ 1,6	19,4 $\pm$ 2,3	14,0 $\pm$ 1,5	13,1 $\pm$ 1,3
	vsota	14,2 $\pm$ 1,6	19,5 $\pm$ 2,3	14,0 $\pm$ 1,5	13,1 $\pm$ 1,3

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 2022 za brežiške vodovode in črpališča.

STAROSTNA SKUPINA	vrsta radionuklidov	vodovod Brežice	Vodovod Brežice (Volčanšek)	Črpališča Brežice (Glogov Brod)
		Letna efektivna doza (μSv)		
ODRASLI	umetni	0,0031 $\pm$ 0,0011	0,003 $\pm$ 0,0001	0,003 $\pm$ 0,000
	naravni	1,7 $\pm$ 0,5	1,7 $\pm$ 0,1	4,7 $\pm$ 1,2
	vsota	1,7 $\pm$ 0,5	1,7 $\pm$ 0,1	4,7 $\pm$ 1,2
OTROCI	umetni	0,0025 $\pm$ 0,0010	0,0019 $\pm$ 0,0001	0,002 $\pm$ 0,000
	naravni	2,3 $\pm$ 0,6	2,6 $\pm$ 0,2	6,1 $\pm$ 1,5
	vsota	2,3 $\pm$ 0,6	2,6 $\pm$ 0,2	6,1 $\pm$ 1,5
DOJENČKI	umetni	0,0064 $\pm$ 0,0026	0,005 $\pm$ 0,000	0,005 $\pm$ 0,000
	naravni	9,7 $\pm$ 2,6	11,6 $\pm$ 1,2	21,7 $\pm$ 5,0
	vsota	9,7 $\pm$ 2,6	11,6 $\pm$ 1,2	21,7 $\pm$ 5,0



Slika 2.12: Ocenjeni prispevek umetnih radionuklidov v pitni vodi k letni dozi za odraslo osebo od leta 2005 do 2022 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 2022 na različnih vzorčevalnih lokacijah



SKLEPI

Med umetnimi radionuklidi sta bila v pitni vodi in podtalnici v letu 2022 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 v manj kot 20 % vzorcev pitnih vod. I-131 v letu 2022 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]. Tudi v tem črpališču se vrednosti nižajo, v primerjavi z letom 2021 povprečna koncentracija aktivnosti manjša za približno 25 %, glede na leto 2018 pa za 50 %.

V letu 2022 je bil tekočinski izpust H-3 najvišji v zadnjih 20 letih. Korelacije med vrtinami blizu reke Save in izpusti so nedvoumne in primerljive z opažanji v letih 2018, 2019 in 2021, ko smo spremenjene vrednosti v nekaterih vrtinah 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 2022 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, 6,1 μSv za otroke in 21,7 μSv za dojenčke. Vrednosti so precej nižje kot v letu 2021 in primerljive z vrednostmi za leto 2020. Praktično vsa obremenitev gre na račun naravnih radionuklidov, Pb-210 je glavni »krivec«, sledijo radijevi izotopi. Umetni radionuklidi prispevajo k obremenitvi kvečjemu dober procent (1,43 %). Za otroke in dojenčke je ta delež še manjši.

Ocenjena letna doza v ljubljanskem vodovodu v letu 2022 je 1,5 μSv za odraslo referenčno osebo, 2,3 μSv za otroka in 12,0 μSv za dojenčka, kar je približno dvakrat manj kot v letu 2021. Obremenitev z umetnimi radionuklidi iz ljubljanskega vodovoda je ocenjena na 0,63 % celotne izračunane letne doze zaradi radionuklidov v pitni vodi za odraslo referenčno osebo. V primerjavi s prebivalci Brežic in Krškega so Ljubljančani v letu 2022 prejeli manjšo 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].





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 2022 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 ni bil zaznan v nobenem vzorcu. 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 2022 za vzorčevalna mesta v okolici NEK ne kaže na korelacijo. Razlog za to je, da so bili zračni izpusti iz NEK enakomerno mesečno porazdeljeni skozi celo leto.

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 2022 so bili v vzorcih padavin in vazelinskih plošč izmerjeni H-3, umetni radionuklid Cs-137, 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 prestržanje 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 litrskemu 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

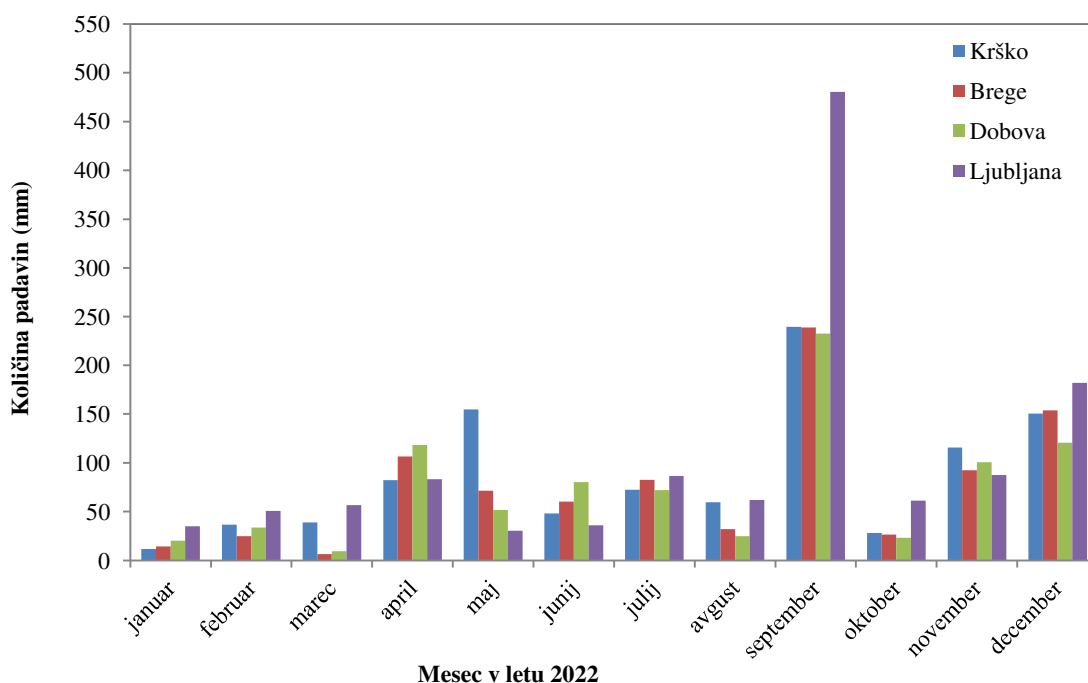
Rezultati meritev vzorcev padavin so prikazani v tabelah T-37 (Brege), T-38 (Krško), T-39 (Dobova) in T-40 (Ljubljana). Vse meritve je opravil IJS. Tabele z merskimi rezultati so na priloženi zgoščenki v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320*, marec 2023.

V vzorcih padavin so bili ugotovljeni H-3, Be-7, K-40, 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 vzorcu tudi Sr-89, saj ta kratkoživi radionuklid v izpustih NEK v letu 2022, podobno kot v prejšnjih letih, ni bil zaznan.



V tabeli 3.1 so izpisani meseci, v katerih smo izmerili maksimalno koncentracijo aktivnosti za posamezen radionuklid. Na vzorčevalnih mestih v okolici NEK je bil najvišji izmerek za tritij meseca novembra na Bregah, sledi mu izmerek iz meseca avgusta na lokaciji v Dobovi in izmerek iz meseca marca v Krškem. V Ljubljani je bila najvišja vrednost za tritij v mesecu juliju. Na vseh lokacijah so bile najvišje koncentracije aktivnosti Be-7 izmerjene v poletnem času; v Krškem v juniju, na ostalih vzorčevalnih mestih pa v avgustu. Sr-90 je v letu 2022, kot tudi leta poprej, izvzet iz obravnave, saj so praktično vse izmerjene vrednosti pod mejo detekcije.

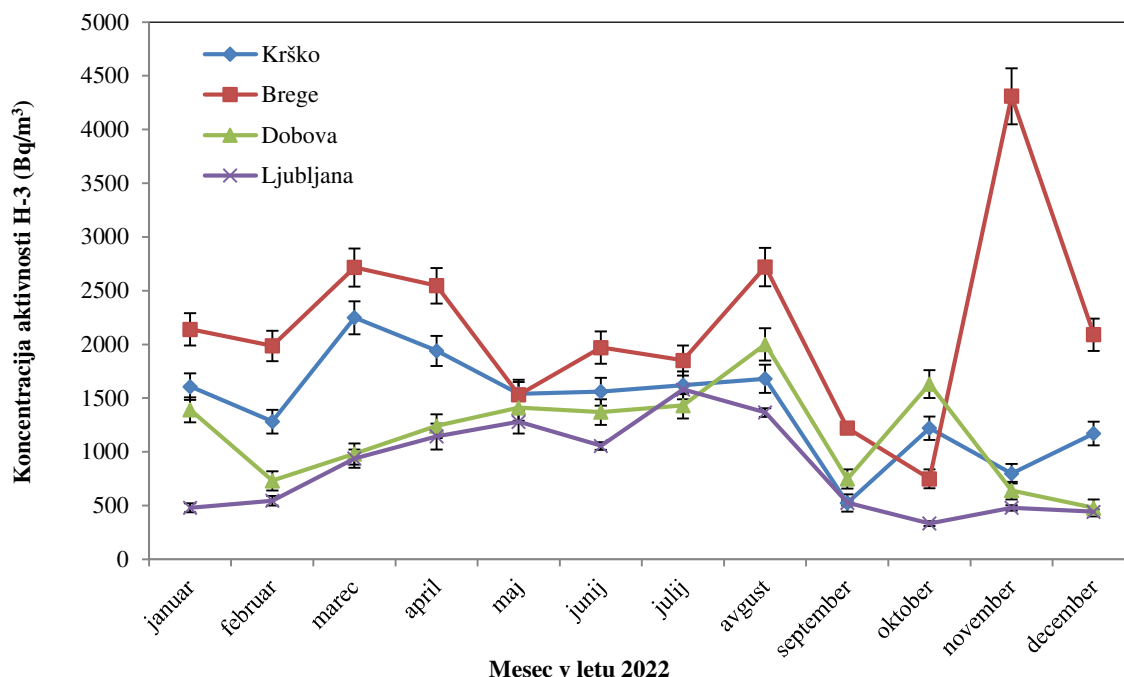
V letu 2022 je bila količina padavin na letni ravni v Ljubljani za približno 15% manjša kot v letu 2021. Količina padavin na Bregah (meteorološka merilna postaja na letališču Cerklje na Dolenjskem) je primerljiva s količino padavin v prejšnjem letu, v Krškem je za 24 % večja in 10 % manjša v Dobovi. Največ dežja na vzorčevalnih mestih v okolici NEK je padlo v Krškem, najmanj v Dobovi. V celem letu je največ padavin padlo v Ljubljani (1 251 mm), kar je približno 32 % 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 vzorčenja.



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 2022

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

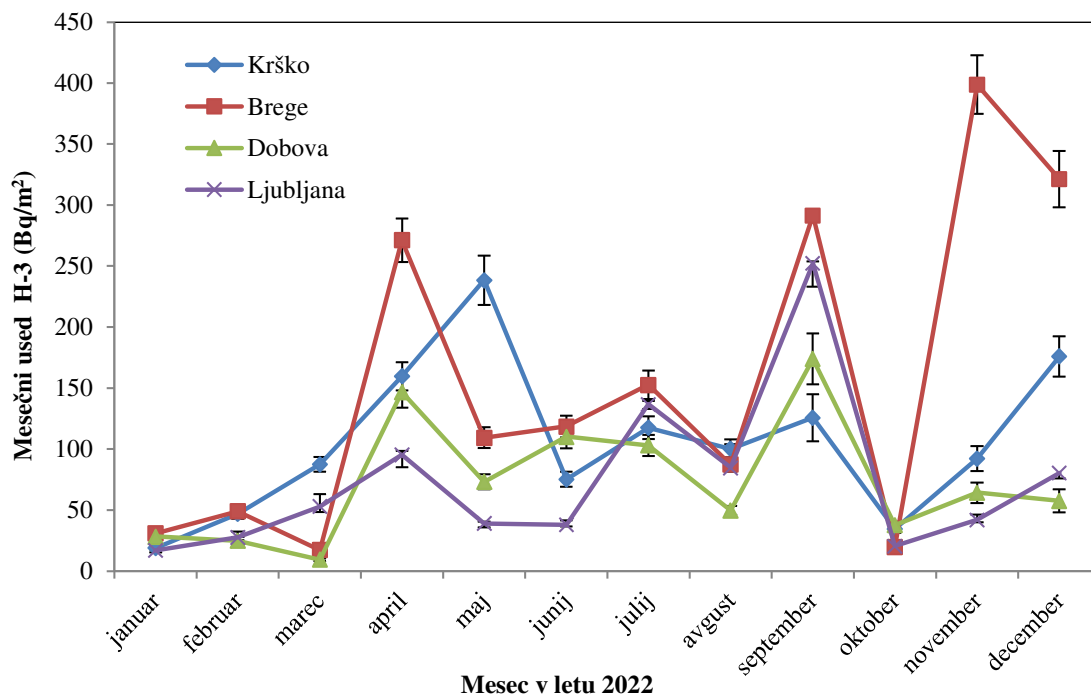


Slika 3.2: Mesečne koncentracije aktivnosti tritija v padavinah v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani. V mesecu januarju so bile koncentracije povišane, kar pripisujemo majhni količini vzorca padavin na vseh lokacijah.

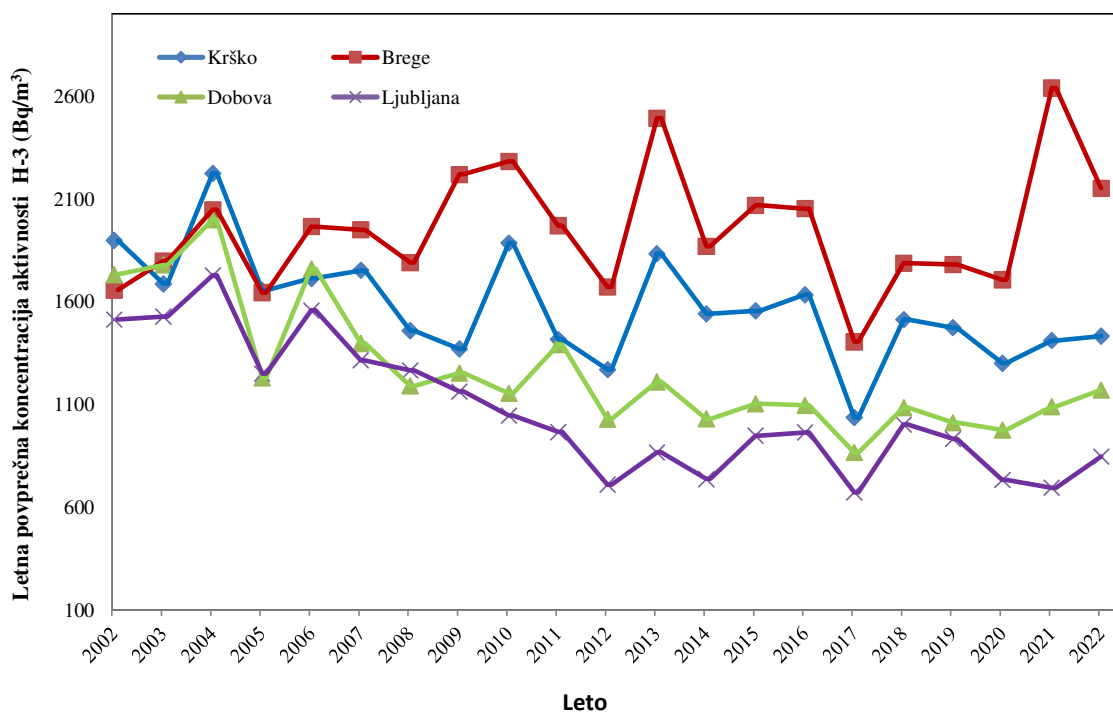
Tritij (H-3)

Koncentracije aktivnosti tritija v padavinah so prikazane na sliki 3.2. Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti so primerljiva s povprečji mesečnih koncentracij v letu 2021. Koncentracija aktivnosti tritija na Bregah je novembra znatno povišana glede na ostala vzorčevalna mesta. Zračni izpusti v letu 2022 so bili za 26 % nižji kot v letu 2021 in za 43 % višji od leta 2020. V letu 2022 so bili mesečni zračni izpusti tritija primerljivi, saj ni bilo velikih razlik v količini mesečnih zračnih izpustov iz NEK. Največji zračni izpust tritija, 12 % celoletnega izpusta, je bil v mesecu oktobru.

Povezanost med zračnimi izpusti in izmerjeno koncentracijo aktivnosti H-3 v letu 2022 ni bila zaznana na nobenem vzorčevalnem mestu v okolici NEK. Najvišja mesečna koncentracija tritija v padavinskih vzorcih v okolici NEK je bila v mesecu novembru 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 2006–2022



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 2022 je bilo na vseh lokacijah, razen v Bregah, višje kot v letu 2021. 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 lokaciji Brege, saj na omenjeni pojav umetno vplivamo z vnašanjem tritija v atmosfero preko zračnih izpustov iz NEK. Slednji pojav letos ni tako opazen, saj so bili zračni izpusti tritija v letu 2022 majhni in enakomerno razporejeni po mesecih čez celotno leto.

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 2022

	pomlad–poletje		jesen–zima	
	smerni koeficient	R^2	smerni koeficient	R^2
Ljubljana	1,5	0,9	0,5	1,0
Brege	2,2	0,9	1,4	0,5
Krško	1,4	1,0	0,6	0,7
Dobova	1,2	1,0	0,7	0,9

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 [51], [52]. 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

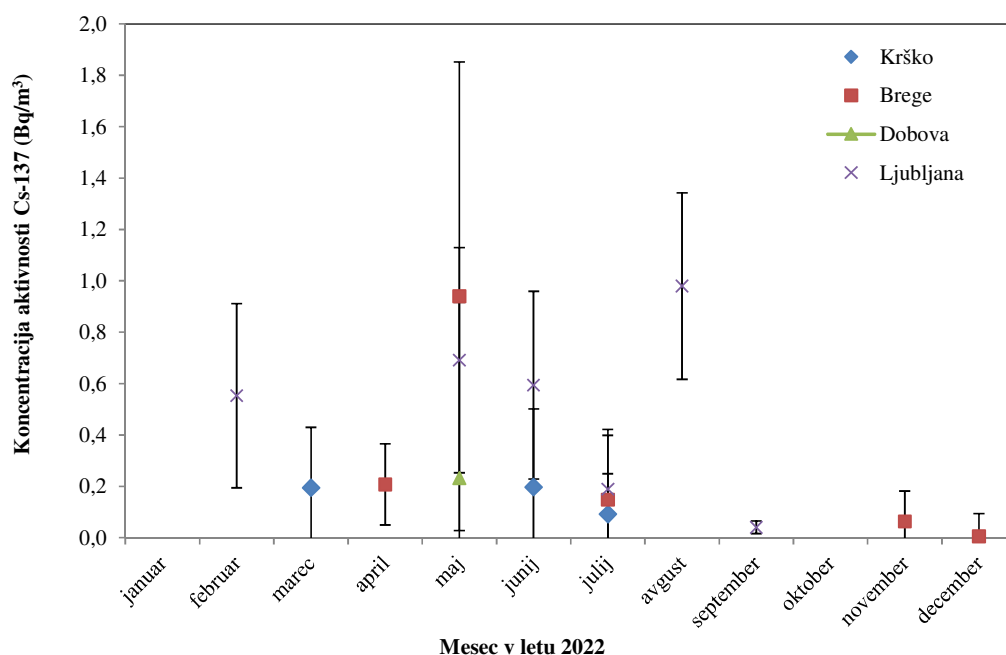
Vzorčevalno mesto	Letno povprečje padavinskega useda Be-7 (Bq/m ²)
Ljubljana	75 ± 1
Brege	36 ± 1
Krško	54 ± 3
Dobova	32 ± 3

Ogljik (C-14)

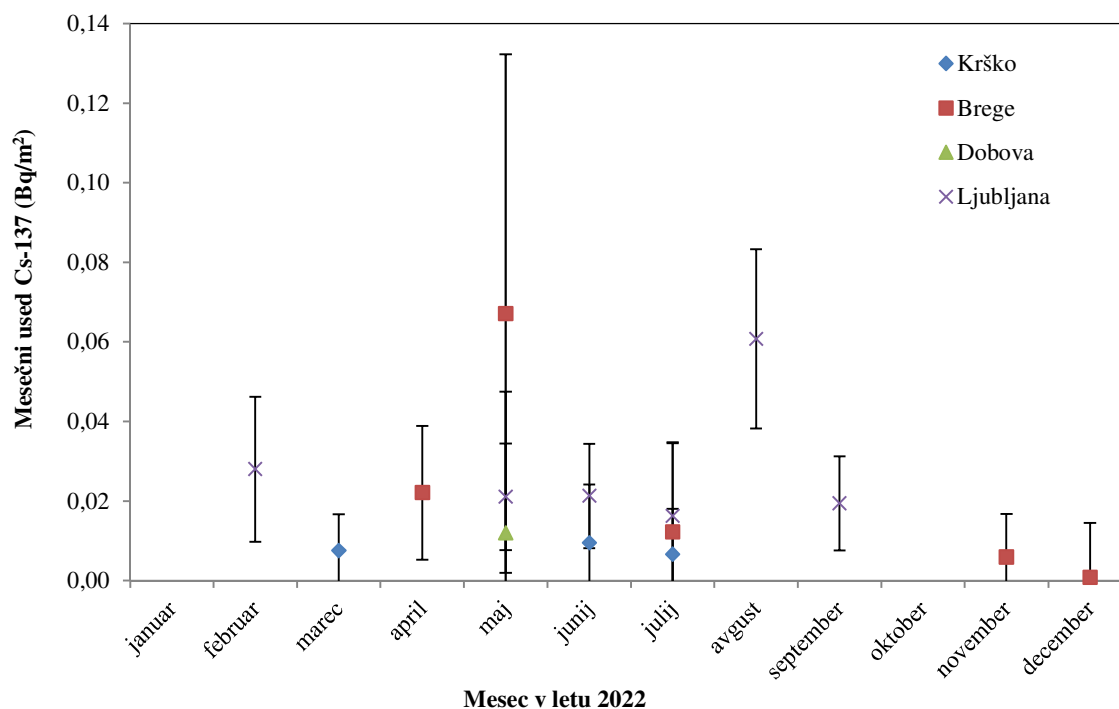
C-14 ni vključen v program meritev padavinskih vzorcev.

Cezij (Cs-137)

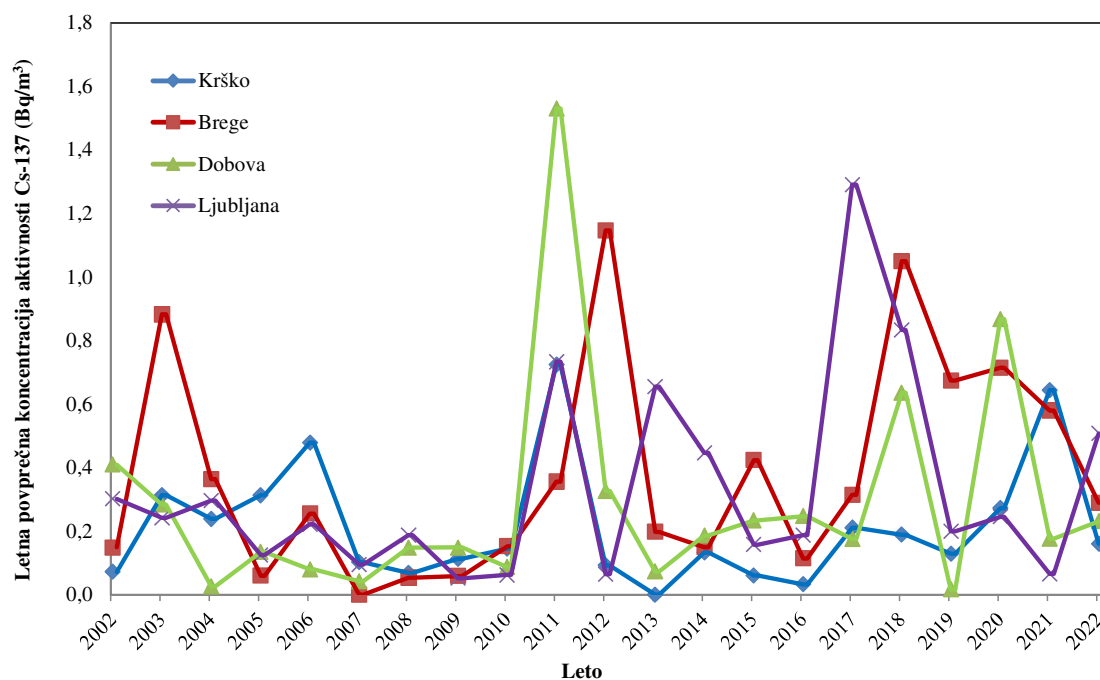
Mesečne koncentracije aktivnosti Cs-137 v padavinah v Krškem, Bregah, Dobovi in v Ljubljani so prikazane na sliki 3.5, padavinski used pa na sliki 3.6. V letu 2022 je bila največja vrednost izmerjena na vzorčevalni lokaciji v Ljubljani (1.0 ± 0.4) Bq/m³, ostale vrednosti pa so vse pod 1 Bq/m³. V okviru negotovosti je večina vrednosti zelo podobnih. Največja odmika, na primer v maju v Bregah in v avgustu v Ljubljani, bi lahko pripisali vetrovni resuspenziji s tal in majhni količini vzorca. 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 [18]. 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 se pokaže na vseh vzorčevalnih mestih (slika 3.7).



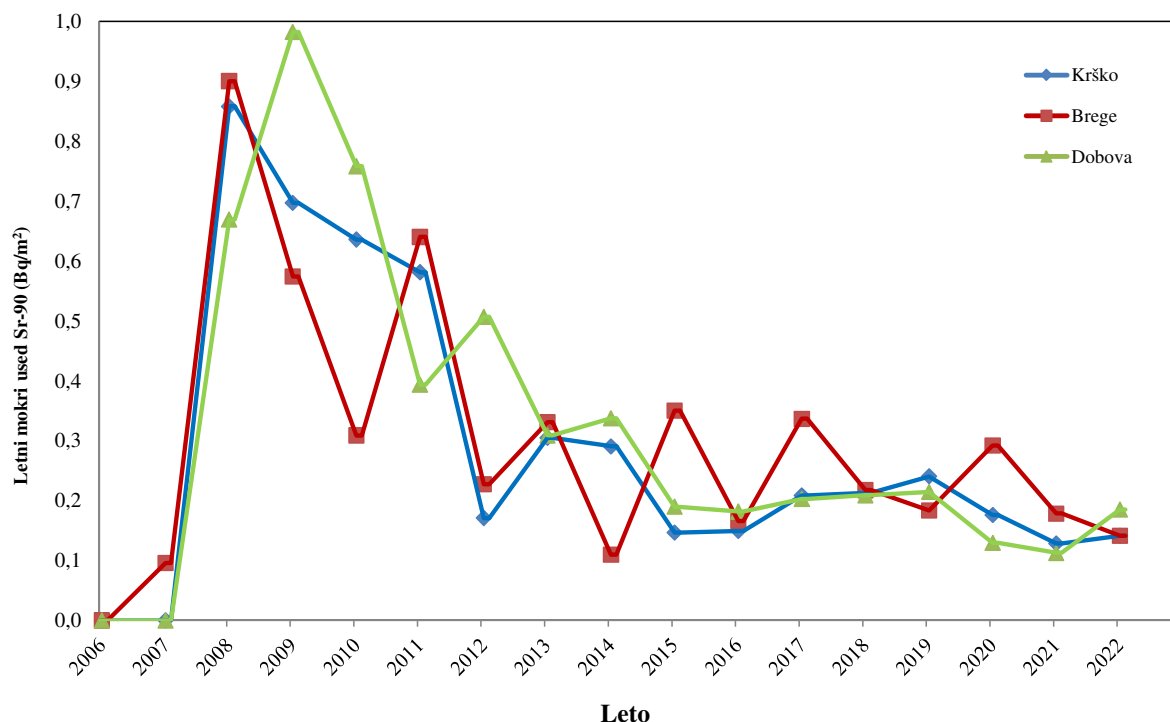
Slika 3.5: Mesečne koncentracije aktivnosti Cs-137 v padavinah v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani



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 2006–2022. Izrazito povišanje v letu 2011 na vseh vzorčevalnih mestih je posledica nesreče v Fukušimi.



Slika 3.8: Letni padavinski used Sr-90 za obdobje 2006–2022

Stroncij (Sr-90)

V letu 2022 so bile vse vrednosti za Sr-90 pod mejo detekcije. Vrednosti v tabelah 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 2022. Usedi oziroma njihove predvidene vrednosti so v letu 2022 primerljive z vrednostmi iz prejšnjih let.

Jod (I-131)

I-131 v padavinskih vzorcih in vzorcih suhega useda ni bil izmerjen.

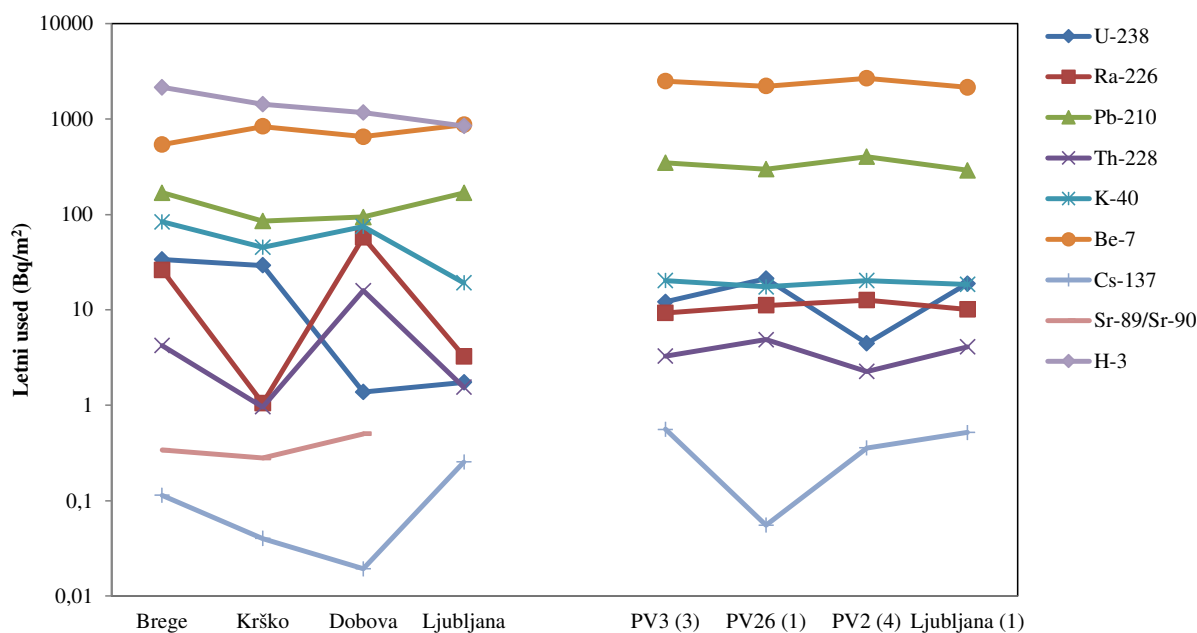
Suhi used

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 2022, IJS-DP-14320*, marec 2023.

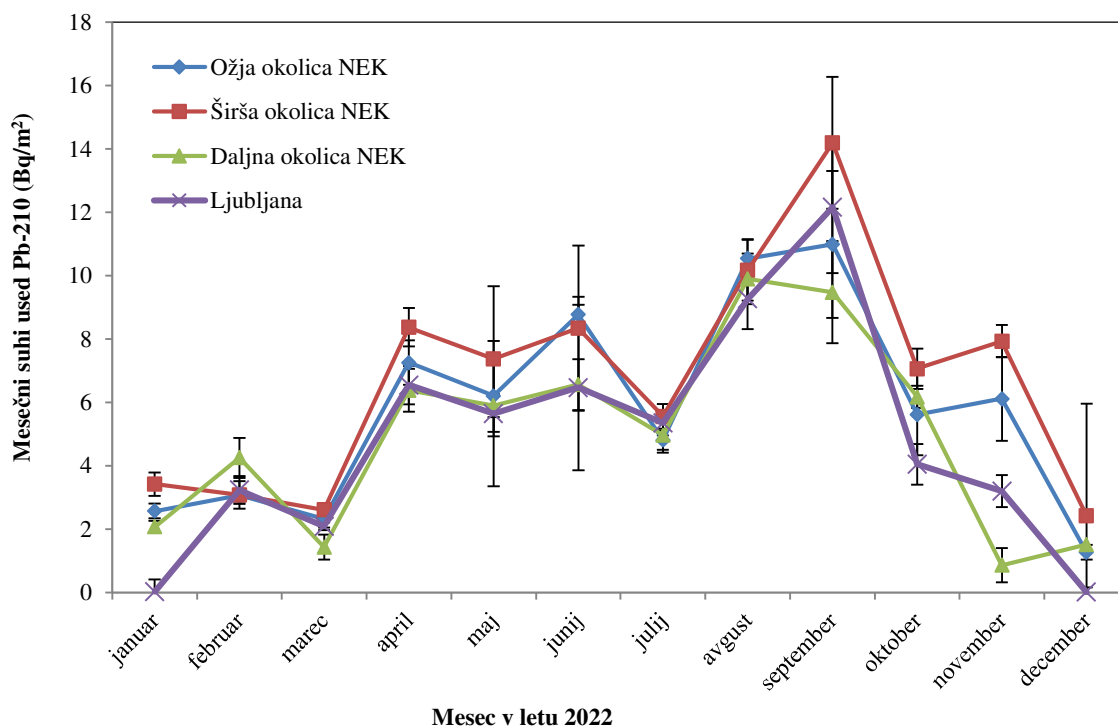
V vzorcih suhega useda so bili v letu 2022 izmerjeni Be-7, K-40, Cs-137 in potomci uranove in torijeve razpadne vrste. Analiza stroncija se na vzorcih z vazelinskih plošč ne izvaja. Na sliki 3.9 je primerjava med suhim in mokrim usedom na vseh lokacijah, kjer se izvaja vzorčenje.

Suhi used na vazelinskih ploščah v okolici NEK je primerljiv s suhim usedom v Ljubljani. Podobno velja tudi za padavinske usede.

Na sliki 3.10 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. Najvišje vrednosti v okolici Krškega so bile izmerjene v mesecu avgustu in septembru in prav tako septembra v Ljubljani.



Slika 3.9: Letni usedi v padavinah, zbranih v lovilnikih deževnice (leva stran grafa) in na vazelinških ploščah na različnih lokacijah okrog NEK (desna stran grafa) v letu 2022; PV2 (4): štiri vazelinške plošče v širši okolici NEK; PV26 (1): vazelinška plošča v daljni okolici NEK; PV (3): tri vazelinške plošče v ožji okolici NEK; Ljubljana (1): vazelinška plošča na dvorišču IJS.



Slika 3.10: Mesečni suhi used Pb-210 v Ljubljani, v širši in ožji okolici NEK ter na vzorčevalnem mestu, ki je najdlje 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 zaužitja¹³. 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 51 % in 83 %. Celotna efektivna doza zaradi zunanjega sevanja useda za umetne radionuklide v okolici NEK je v letu 2022 za 35 % manjša od vrednosti v letu 2021.

Tabela 3.4: Efektivne doze zaradi zunanjega sevanja iz useda v letu 2022 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	$(7 \pm 5) \text{ E-5}$	$(25 \pm 6) \text{ E-5}$
	VSI	$0,11 \pm 0,02$	$0,12 \pm 0,01$

Tabela 3.5: Efektivne doze zaradi zaužitja rastlin z usedlimi radionuklidi v letu 2022 za odrasle, otroke in dojenčke.

Starostna skupina	Masa zaužitega rastlinja (kg)	Radionuklidi	Okolica NEK (povprečje lokacij)	Ljubljana
			doza (μSv)	
ODRASLI	25	UMETNI	$0,011 \pm 0,002$	$0,014 \pm 0,001$
		VSI	20 ± 5	35 ± 1
OTROCI	15	UMETNI	$0,010 \pm 0,002$	$0,013 \pm 0,001$
		VSI	33 ± 7	58 ± 2
DOJENČKI	2,5	UMETNI	$0,029 \pm 0,004$	$0,05 \pm 0,001$
		VSI	195 ± 131	261 ± 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 2022 zanemarljivi in celo nižji kot v Ljubljani.

¹³ 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 rastlina (25 kg za odraslo osebo, 15 kg za otroke in 2,5 kg za dojenčke) in doznega faktorja [4], [10], [61]. 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 2022 je primerljiva z letom 2021: prispevek umetnih radionuklidov v okolici NEK je za 8 % do 12 % manjši, prispevek naravnih radionuklidov pa za približno 26 % manjši pri izračunu za odraslo osebo in otroka, pri dojenčku pa podobno kot prejšnje leto. Efektivna doza je bila v letu 2022 za umetne radionuklide v okolici NEK med 16 % in 43 % manjša kot na lokaciji v Ljubljani in med 25 % in 43 % 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 0,04 %, kar je primerljivo s prejšnjim letom. Za otroka in dojenčka je prispevek še manjši. Umetni radionuklidi so torej pri računanju zunanjih doz v letu 2022 zaradi vnosa s hrano zanemarljivi.

SKLEPI

V letu 2022 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. V tem letu ni bilo opaziti korelacij med zračnimi izpusti tritija iz NEK in izmerjenimi vrednostmi tritija. Razlog za to je verjetno v tem, da so bili izpusti enakomerno mesečno razporejeni skozi celo leto.

Med umetnimi radionuklidi je bil v padavinah občasno ugotovljen Cs-137. Zaznan je bil v 33 % vzorcev padavin in v 30 % vazelinskih plošč. Letna povprečna koncentracija aktivnosti za Cs-137 je bila v letu 2022 v primerjavi z izmerjenimi vrednostmi iz leta 2021 v Krškem in v Bregah nižja ter višja v Dobovi in v Ljubljani. Vzrok za detekcijo Cs-137 v padavinah je najverjetneje talna resuspenzija in kurjenje trdih goriv v zimskih mesecih. Sr-90 v letu 2022 ni bil detektiran. 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 8,9 nSv, na ograji NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja) pa 19,4 nSv, in zajema vse izpuščene radionuklide. Lokacije vzorčenja imisij so bile v okviru rednega nadzora radioaktivnosti zraka v okolici NEK v letu 2022 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 (vdihanja) in imerzije (zunanjšega sevanja) umetnih radionuklidov (0,10 nSv) so zanemarljive in več velikostnih redov nižje od letne efektivne doze, ki jo zaradi inhalacije povzročajo naravni radionuklidi (35 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 spektrometrške analize aerosolnih filtrov za vzorčenje zraka na glavnem ventilacijskem izpustu NEK tik pred izpustom v okolje (emisijske meritve) ter aerosolnih in oglenih 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 privzete modelsko določene koncentracije (imisije). Neodvisni laboratoriji vzorčijo okoljske vzorce in tako preverjajo vpliv elektrarne na okolje in ljudi.

Vzorčenje emisij je potekalo na glavnem ventilacijskem izpustu NEK, kjer se odvezajo vzorci za meritve joda (I-131), tritija (H-3), ogljika (C-14) in aerosolov (aerosolni filtri v monitorju RM-24) ter se opravljajo meritve žlahtnih plinov. Njihove koncentracije aktivnosti na izbranih lokacijah v okolici NEK se ugotavljajo z uporabo Lagrangeevega disperzijskega modela Spray [54]–[57], 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 proti jugozahodu in proti jugovzhodu. Kontrolne meritve aerosolov v okolju so bile opravljene z vzorci, ki so bili pridobljeni z vzorčenjem na lokaciji v Ljubljani.

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 doze¹⁴) torej

¹⁴ Efektivna okoljska doza je izračunana iz izmerjenih koncentracij aktivnosti radionuklidov v okolju.

na lokacijah, kjer so postavljene aerosolne črpalke. Metodologija računanja doz je predstavljena v postopku *Ocena sevalnih obremenitev (LMR-RP-01)*.

OKOLJSKI VZORCI

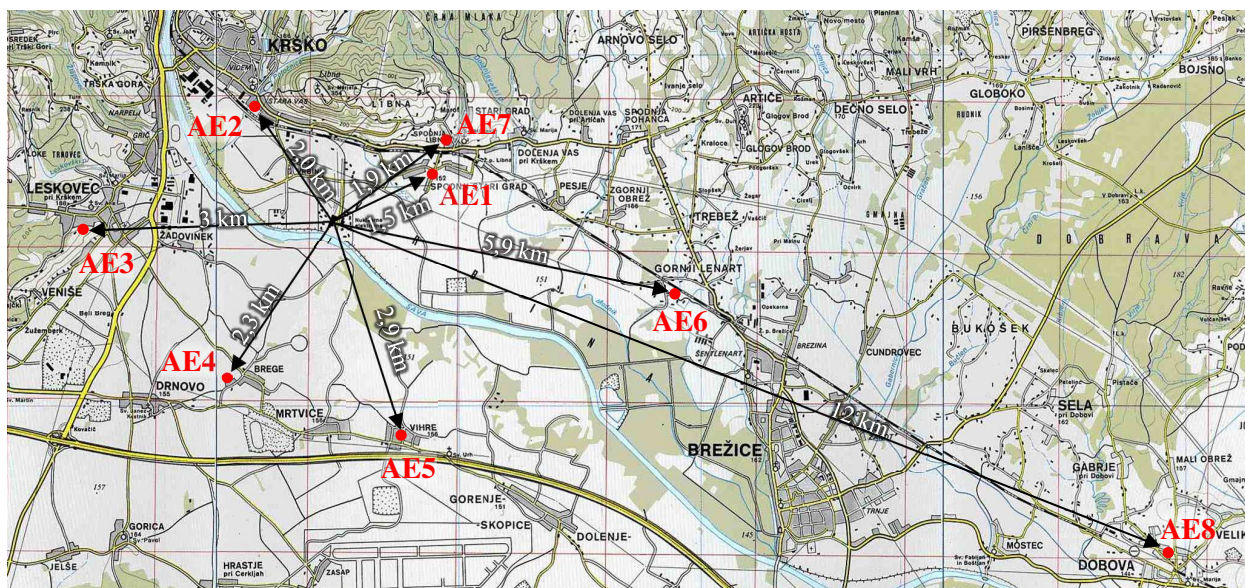
Značilnosti vzorčenja

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) [6] 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 [62].

Vzorčenje radioaktivnosti v zraku - aerosolov in I-131 (radioaktivnost zraka v okolju)¹⁵ je v letu 2022 potekalo na podoben način kot v preteklih letih, kar zagotavlja primerljivost z rezultati iz prejšnjih poročil oz. evalvacij.

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. 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.

Aerosole smo vzorčili na osmih mestih v okolici NEK (slika 4.1): 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 kot vzorčenje aerosolov je potekalo vzorčenje I-131 z izjemo lokacije v Dobovi. Vzorčenje za specifično meritev Sr-90 se je izvajalo v prvi polovici leta v Dobovi, v drugi polovici leta pa v Stari vasi, skladno z *NEK-RETS, Rev. 10*. 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 [18].



Slika 4.1: Načrt okolice NE Krško z vrisanimi okvirnimi lokacijami zračnih črpalk

¹⁵ Radioaktivnost zraka v okolju združuje prispevke emisij NEK, globalnega onesnaženja in naravnega ozadja



Slika 4.2: Poleg zračnih črpalk v okolici NEK sta visoko zmogljivi črpalke v Ljubljani in v Dobovi

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 4.2) 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.

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, I₂), metiljodid (CH₃I), 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 [42] 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 2022 [18]. 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 zgoščenki v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško - Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320*, marec 2023. 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 2022 je bil redni remont NEK, ki je trajal od 1. 10. 2022 do 7. 11. 2022, ko se je začel 33. gorivni cikel. 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 ($45,4 \text{ m}^3/\text{s}$ oziroma $163\,583 \text{ m}^3/\text{h}$ oziroma $3\,926\,000 \text{ m}^3$ 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 izviru, 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 izviru.

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)

Od umetnih radionuklidov je bil v letu 2022 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. Njuna 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 2022 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) [12], [14]. Iz tabele 4.1 lahko razberemo, da so bile povprečne koncentracije aktivnosti Cs-137 na lokacijah v okolici NEK v letu 2022 nižje od dolgoletnih povprečij. Povprečje po vseh lokacijah v okolici NEK za leto 2022 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.



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 2022

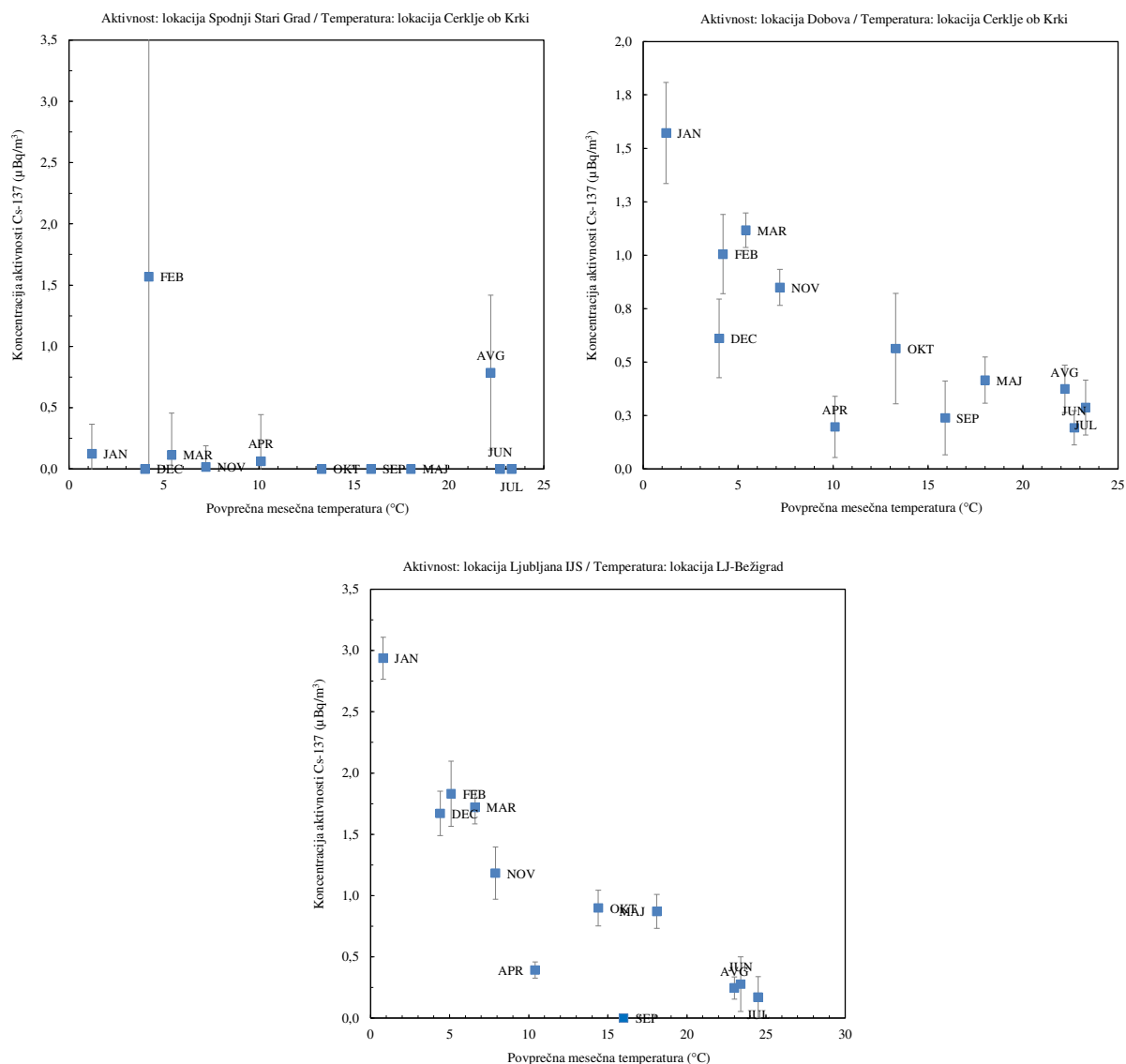
Lokacija	Od 2005 do 2021	2022
	Koncentracija aktivnosti (Bq/m ³)	
Spodnji Stari Grad	1,3E-06 ± 2E-07	2,2E-07 ± 2E-07
Stara vas	1,4E-06 ± 2E-07	3,9E-07 ± 1E-07
Leskovec	1,5E-06 ± 1E-07	2,7E-07 ± 1E-07
Brege	2,0E-06 ± 2E-07	3,0E-07 ± 6E-08
Vihre	1,2E-06 ± 3E-07	1,7E-07 ± 7E-08
Gornji Lenart	1,1E-06 ± 2E-07	1,0E-07 ± 7E-08
Spodnja Libna	1,1E-06 ± 3E-07	4,3E-07 ± 2E-07
Dobova	1,3E-06 ± 2E-07	6,2E-07 ± 5E-08
Povprečje NEK	1,1E-06 ± 2E-07	2,8E-07 ± 7E-08
Ljubljana	1,7E-06 ± 7E-08	1,0E-06 ± 5E-08
Murska Sobota	1,1E-06 ± 8E-07*	8,7E-7 ± 5E-7
Predmeja	2,5E-06 ± 8E-07	5,8E-7 ± 3E-7

* Samo od leta 2018 dalje

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 2022

Vzorč.mesto	MURSKA SOBOTA*	PREDMEJA*	LJUBLJANA	POVPREČJE KRAJEV V OKOLICI NEK
IZOTOP	Povprečne mesečne koncentracije aktivnosti (Bq/m ³)			
Na-22			3,5E-07 ± 5E-08	8,4E-08 ± 5E-08
U-238	2,3E-06 ± 3E-06	1,9E-06 ± 3E-06	1,9E-06 ± 8E-07	1,0E-05 ± 2E-06
Ra-226	2,1E-06 ± 8E-07	1,9E-06 ± 9E-07	3,2E-07 ± 2E-06	3,8E-06 ± 2E-06
Pb-210	4,9E-04 ± 2E-04	3,4E-04 ± 1E-04	8,1E-04 ± 3E-05	5,4E-04 ± 8E-05
Ra-228	1,3E-06 ± 1E-06	4,6E-07 ± 9E-07	3,4E-08 ± 9E-08	5,6E-06 ± 9E-07
Th-230			9,2E-07 ± 2E-06	3,7E-06 ± 2E-06
Th-228	1,7E-06 ± 2E-06	8,6E-07 ± 8E-07	1,4E-06 ± 1E-07	6,5E-06 ± 8E-07
K-40	2,6E-04 ± 4E-05	2,4E-04 ± 3E-05		
Be-7	3,6E-03 ± 2E-03	3,1E-03 ± 1E-03	4,2E-03 ± 6E-05	3,1E-03 ± 5E-04
I-131				
Cs-134				
Cs-137	8,7E-07 ± 5E-07	5,8E-07 ± 3E-07	1,0E-06 ± 5E-08	2,8E-07 ± 7E-08
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	3,2E-08 ± 2E-08

* Rezultati iz programa nadzora radioaktivnost v življenjskem okolju Republike Slovenije



Slika 4.3: 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 Dobovi in Ljubljani vzorčenje poteka z visoko pretočnima črpalkama, zato je korelacija med koncentracijo in povprečno mesečno temperaturo izrazitejša.

V izmerjenih povprečnih koncentracijah aktivnosti Cs-137 na filterih vzorčevalnih črpalk je samo majhen del posledica resuspenzije Cs-137 iz zemlje. Iz literature ([63], [64], [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) in posledičnega sproščanja v njih prisotnega črnobilskega 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 lebdjenja delcev v ozračju, v manjši meri pa prometa in industrije. Takšna temperaturna korelacija s koncentracijami Cs-137 v zraku je lepo vidna na sliki 4.3 za lokaciji Ljubljana in Dobova (visoko zmogljive črpalke) in manj izrazita za lokacijo Spodnji Stari Grad, kjer lahko potrdimo, da so izmerjene koncentracije Cs-137 v Sloveniji in tudi v okolici NEK posledica okoljske radioaktivnosti zaradi črnobilske nesreče. V okviru rednega nadzora življenjskega okolja v RS v letu 2022 smo vzorčili domače pelete oziroma brikete ali tiste iz uvoza (Avstrija, Bosna in Hercegovina, Hrvaška in Slovenija) ([15], [17]). Specifične aktivnosti Cs-137 so bile od 0,3 Bq/kg do 1,9 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 6 500 kg na leto. Na podlagi teh podatkov in ob upoštevanju povprečne specifične aktivnosti 1,0 Bq/kg za 8 vzorcev iz programa, ([15], [17]) lahko ugotovimo, da je skupna letna izpuščena aktivnost Cs-137 v lesnih kurivih na gospodinjstvo 23 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) [18] in konstantnega izpusta s hitrostjo aktivnosti 0,9 10⁻³ mBq/s (predpostavili smo, da se peleti skurijo v 3 mesecih), dobimo oceno za koncentracijo aktivnosti Cs-137 v zraku 0,1 µBq/m³ 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 2022, ki je 1,1 µBq/m³. 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 2022 so bile meritve opravljene v Stari vasi, vsi izmerki pa so bili pod mejo kvantifikacije. Ocenjena povprečna koncentracija aktivnosti v letu 2022 je bila 2,0 E-7 Bq/m³. Večletno povprečje koncentracije aktivnosti za Sr-90 v Dobovi (prejšnja lokacija vzorčenja) je 0,65 µBq/m³. V zračnih izpustih NEK je bil v letu 2022 sicer Sr-89/Sr-90 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 pod mejo detekcije.

Drugi aktivacijski in fisijski produkti

Med obratovanjem so bili v izpuhu NEK v letu 2022 zaznani izpusti Na-22, Co-58, Co-60, Se-75, Zr-95, Nb-95, Ag-110m, Te-127m, 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 imisij. Zračni izpusti so navedeni v tabeli 4.3.

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 2022 v okolici NEK je bila 3 093 µBq/m³, Pb-210 pa 539 µBq/m³. V Ljubljani sta bili ustrezni vrednosti 4 165 µBq/m³ in 812 µBq/m³, v Murski Soboti 3 557 µBq/m³ in 494 µBq/m³ in na Predmeji 3 088 µBq/m³ in 340 µBq/m³. 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 27 % nižja kot v Ljubljani, kot kaže večletno povprečje [88]: v letu 2022 pa jih je bilo za okrog 37 % 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 črpalke 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 ([12], [14], [15]).

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 2022 je bila v Ljubljani povprečna koncentracija aktivnosti Na-22 0,84 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Tabela 4.3: Zračni izpusti iz ventilacijskega izpusta NEK v letu 2022 na višini 60 m

	Radionuklid	Letni izpust (Bq)
Pare, plini	I-131	5,5E+05
	I-132	1,8E+06
	I-133	–
	I-135	–
	HTO	4,4E+12
	HT + CHT	5,3E+11
	C-14 v CO ₂	8,0E+10
	C-14 v CH ₄	6,4E+09
Aerosoli	Na-22	5,7E+03
	Mn-54	–
	Co-57	–
	Co-58	2,0E+04
	Co-60	9,9E+03
	Zr-95	1,7E+04
	Nb-95	1,8E+04
	Ru-103	–
	Ag-110m	1,4E+04
	Sb-125	–
	Te-123m	–
	Te-125m	–
	Te-127m	1,7E+04
	Cs-137	1,9E+04
	Fe-55	–
	Sr-89/Sr-90	1,2E+03
	Se-75	3,4E+05
Žlahtni plini	Xe-131m	3,8E+11
	Xe-133	1,1E+07
	Xe-133m	–
	Xe-135	–
	Xe-135m	–
	Ar-41	5,9E+09
	Kr-85	–
	Kr-85m	–
Skupna izpuščena aktivnost za pare, pline in aerosole		5,0E+12
Skupna izpuščena aktivnost žlahtnih plinov		3,9E+11
Skupna izpuščena aktivnost		5,4E+12



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 °C.

Glavni izpust 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.

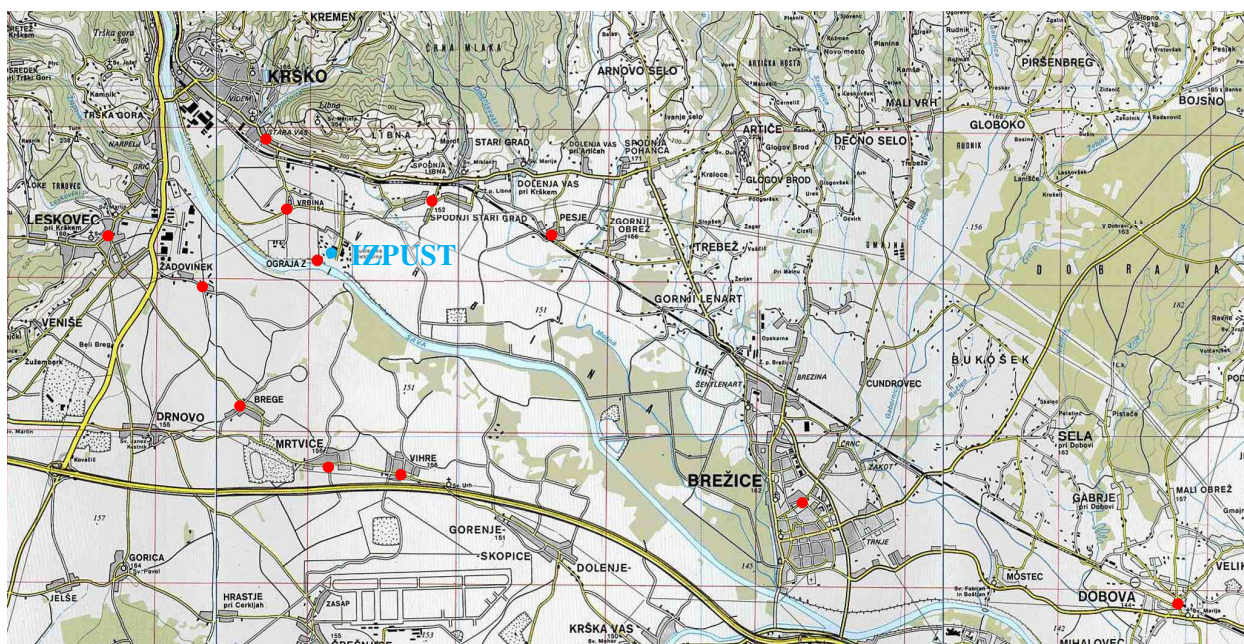
Koncentracije aktivnosti izpuščenih snovi v zunanjem zraku (imisije) na določeni lokaciji proč od izpusta ocenimo na podlagi razredčitvenih koeficientov (χ/Q) iz modela širjenja. Razredčitveni koeficient je normirano merilo za redčenje v ozračju in nam pove, kolikšna je koncentracija izpuščene snovi 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 km × 25 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 4.4 in prikazane na sliki 4.4.

Tabela 4.4: Razredčitveni koeficienti (χ/Q)/(s/m³)^{*} v letu 2022 za naselja v okolici NEK, ki jih je izračunalo in posredovalo podjetje MEIS storitve za okolje z uporabo Lagrangeevega modela

20221	Sp. Stari Grad	Vrbina	Brežice	Vihre	Mrtvice	Brege	Žadovinek	Leskovec	Krško - Stara vas	Pesje	Dobova	Ograja NEK
	1,5 km	0,8 km	7,1 km	3,1 km	2,8 km	2,3 km	1,7 km	2,9 km	1,7 km	3,0 km	12,1 km	0,2 km
Januar	5,14E-07	2,41E-07	4,43E-08	5,55E-08	8,67E-08	1,92E-07	2,34E-07	1,99E-07	1,77E-07	4,59E-07	2,39E-08	6,30E-07
Februar	3,54E-07	1,69E-07	8,58E-08	6,10E-08	9,39E-08	1,61E-07	1,56E-07	1,16E-07	9,49E-08	4,01E-07	1,08E-08	4,68E-07
Marec	2,27E-07	1,98E-07	6,84E-08	6,85E-08	1,13E-07	2,37E-07	2,12E-07	1,46E-07	6,81E-08	2,10E-07	1,91E-08	4,08E-07
April	3,07E-07	2,40E-07	4,21E-08	5,13E-08	7,75E-08	1,98E-07	2,43E-07	1,80E-07	1,14E-07	2,55E-07	1,84E-08	5,00E-07
Maj	3,45E-07	3,51E-07	6,99E-08	6,44E-08	1,09E-07	2,29E-07	3,49E-07	1,63E-07	1,14E-07	2,79E-07	1,57E-08	5,44E-07
Junij	2,87E-07	6,18E-07	1,08E-07	6,97E-08	1,03E-07	2,17E-07	5,71E-07	1,95E-07	1,33E-07	2,52E-07	2,02E-08	1,11E-06
Julij	2,38E-07	5,25E-07	1,45E-07	9,10E-08	1,20E-07	2,34E-07	4,57E-07	1,48E-07	9,18E-08	1,76E-07	1,33E-08	1,20E-06
Avgust	4,52E-07	3,72E-07	8,62E-08	7,45E-08	1,07E-07	2,66E-07	3,85E-07	1,16E-07	9,26E-08	3,72E-07	1,41E-08	1,63E-06
September	3,92E-07	2,61E-07	9,12E-08	9,25E-08	1,08E-07	2,07E-07	3,49E-07	1,52E-07	1,04E-07	3,68E-07	2,86E-08	8,80E-07
Oktober	3,62E-07	4,39E-07	1,37E-07	4,00E-08	6,97E-08	1,81E-07	4,06E-07	2,81E-07	2,02E-07	4,90E-07	2,95E-08	7,96E-07
November	5,96E-07	3,69E-07	5,86E-08	4,64E-08	7,37E-08	1,78E-07	4,67E-07	3,23E-07	2,43E-07	3,78E-07	4,11E-08	6,03E-07
December	3,43E-07	2,82E-07	2,48E-08	2,41E-08	4,31E-08	1,32E-07	4,79E-07	4,19E-07	1,90E-07	2,40E-07	6,77E-08	4,61E-07

* Drsniiki 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.



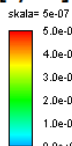
Slika 4.4: Načrt okolice NE Krško z vrisanimi okvirnimi lokacijami za bližnja naselja, v katerih so izračunani razredčitveni faktorji in naknadno izračunane doze

Na slikah 4.5a in 4.5b so predstavljeni povprečni letni razredčitveni koeficienti (χ/Q), na osnovi izračunanih mesečnih koeficientov χ/Q , tako za leto 2022 (slika 4.5a) in za primerjavo še iz prejšnjih let od 2013 do 2021 (slika 4.5b). Na slikah je vidno, da sta prevladujoči smeri, v katerih se v povprečju gibljejo izpusti NEK, jugozahod in jugovzhod.

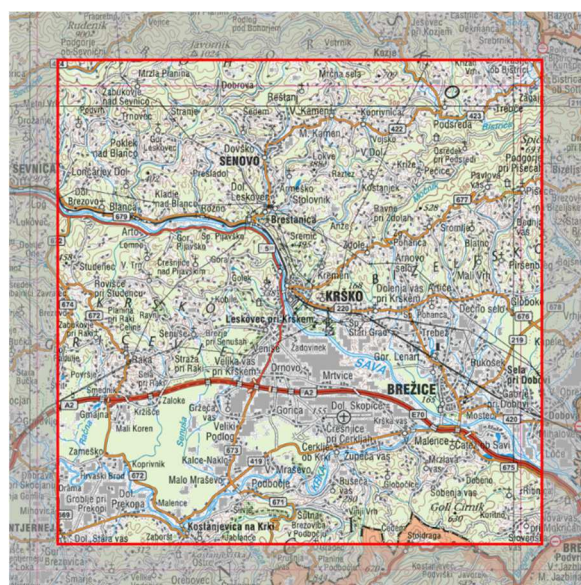
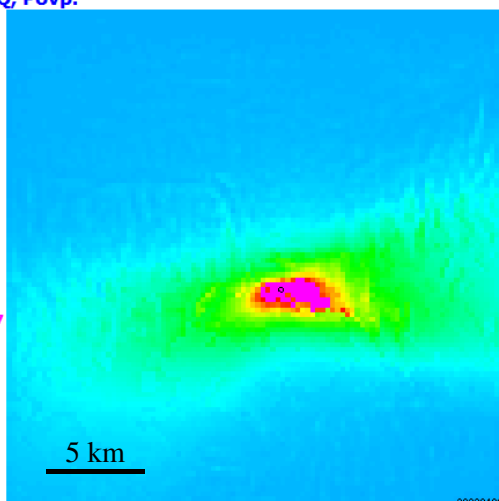
Modeli -> Slovenija -> Krško IJS -> NEK LGM
Letni, χ/Q , Povp.

01.01.
2022
00:00
UTC+01

Max=
7.676e-07
[s/m³]

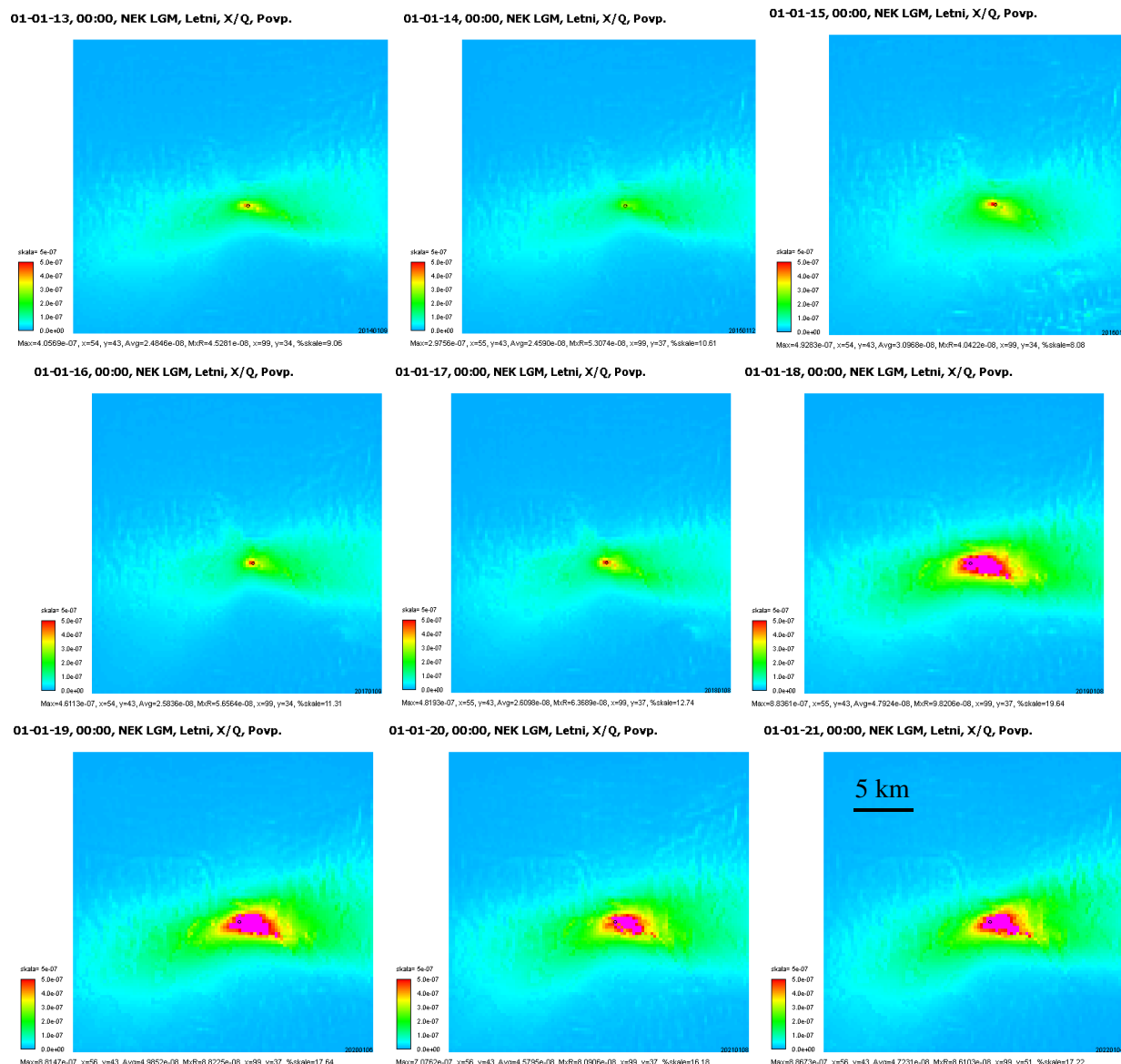


Max=7.6763e-07, x=56, y=43, Avg=4.5684e-08, MxR=7.7288e-08, x=99, y=37, %skale=15.46



a) Leto 2022

Slika 4.5a: Povprečni letni razredčitveni koeficienti (χ/Q) z enoto s/m³, izračunani po Lagrangeevem modelu za izpust z višine 60 m za okolico NEK za leto 2022 (območje modeliranja je v rdečem okviru, 25 km × 25 km) [89]. Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.



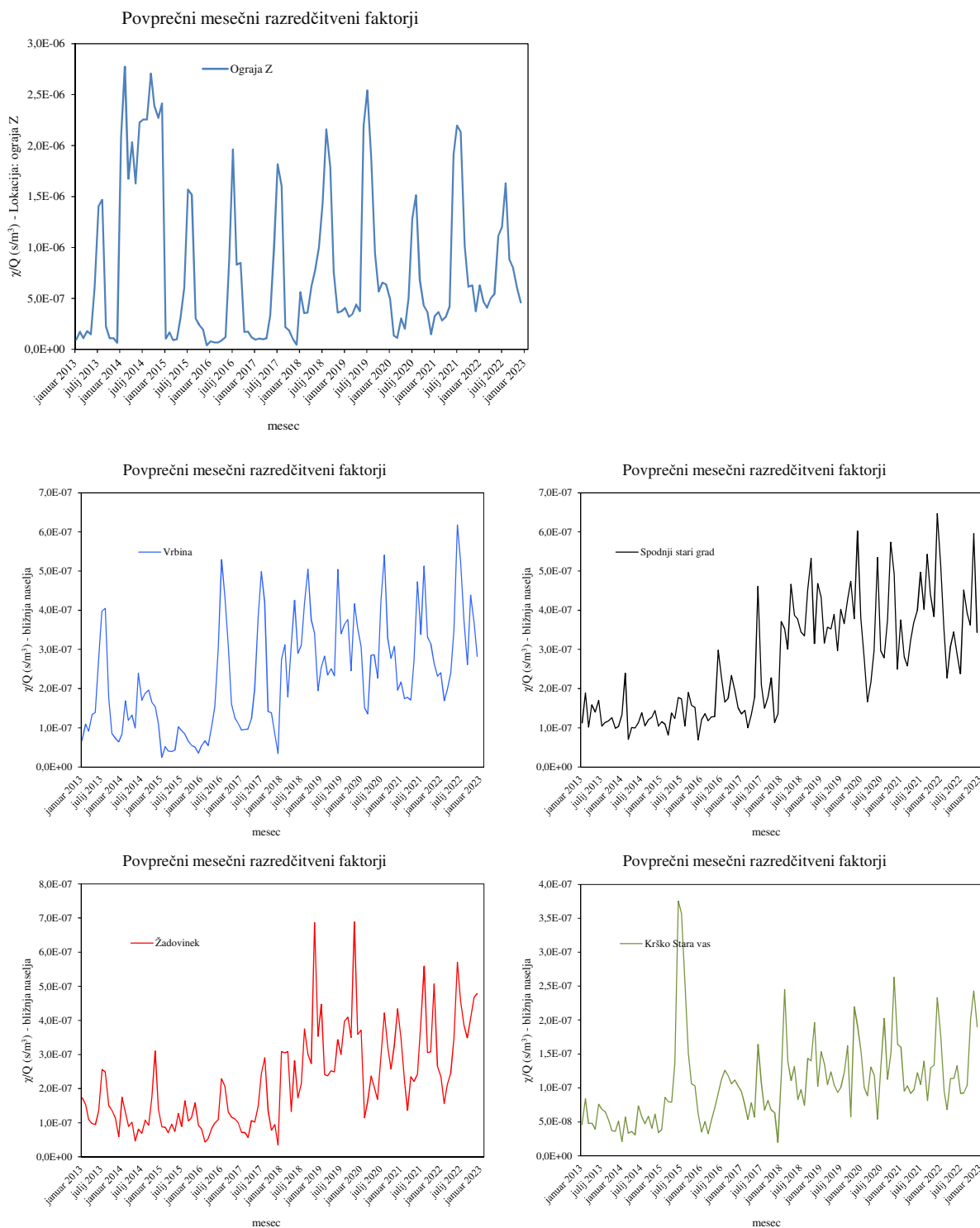
b) Leta od 2013 do 2021

Slika 4.5b: Povprečni letni razredčitveni koeficienti (X/Q) z enoto s/m^3 , izračunani po Lagrangeevem modelu za izpust z višine 60 m za okolico NEK za leta 2013–2021.

Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.

Na sliki 4.6 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 4.6 pa časovni potek za bližnja naselja Spodnji Stari Grad, Vrblina, Krško – Stara vas in Žadovinec. 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, Vrblina, Krško – Stara vas in Žadovinec, ki so bolj oddaljene od mesta izpusta.

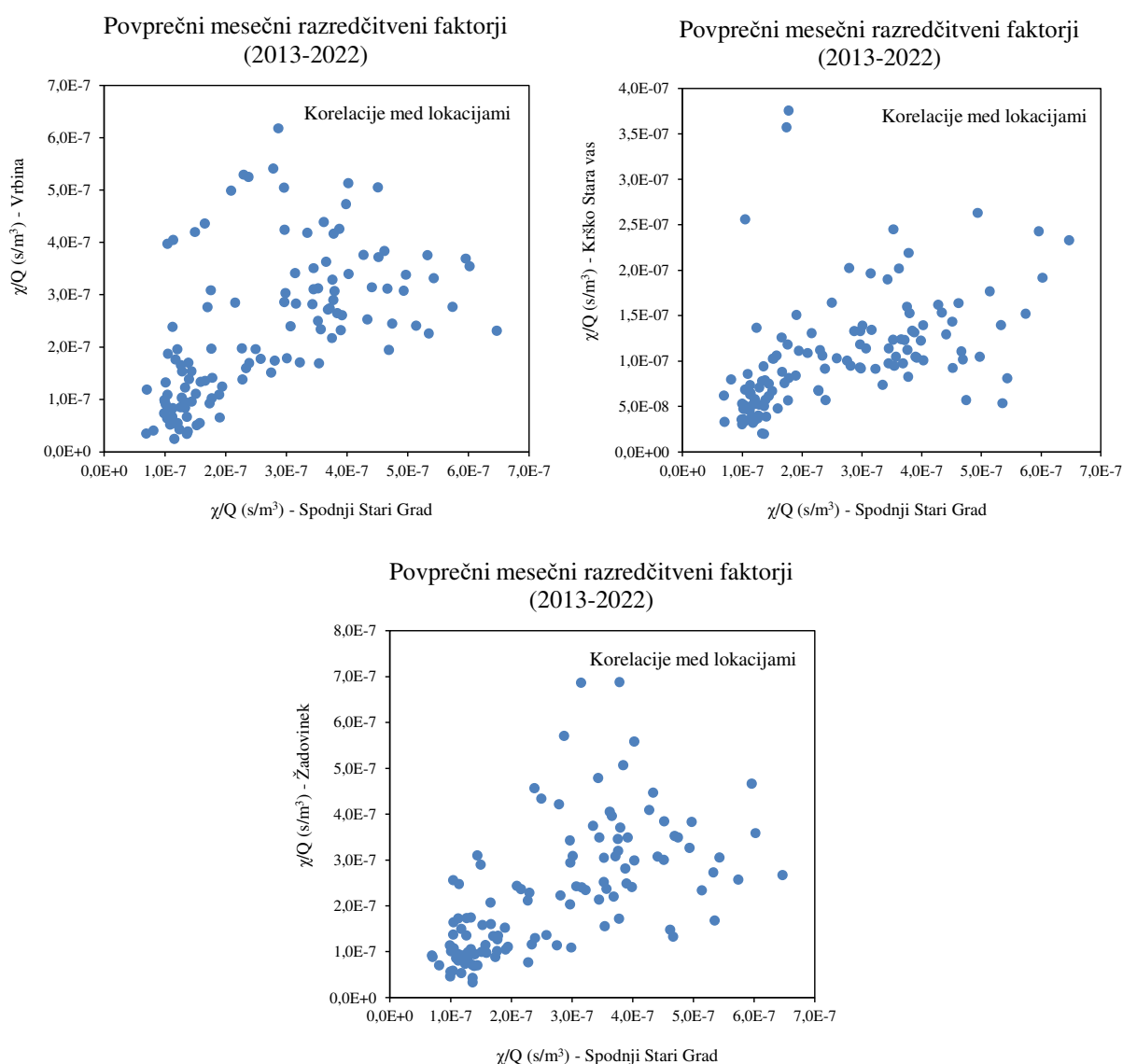
V časovnem poteku povprečnih mesečnih razredčitvenih faktorjev je opazen dvig faktorjev od vključno leta 2018 dalje na lokacijah Spodnji Stari Grad, Vrbina in Žadovinek. Kakšnih posebnih pojasnil nimamo, najverjetneje so bile meteorološke razmere takšne, da je bilo vreme v povprečju stabilnejše in posledično razredčitveni faktorji višji.



Slika 4.6: 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 2013–2022.

Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.

Kot je bilo ugotovljeno in je lepo vidno na slikah 4.5a in 4.5b, 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 4.7 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 4.7 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 4.7 to ni opazno. Zato lahko privzamemo, da se vreme oziroma smer razširjanja v okolici NEK spreminja z urno ali dnevno periodo.



Slika 4.7: Korelacija povprečnih mesečnih razredčitvenih koeficientov (χ/Q) z enoto s/m^3 , na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad in v bližnjih naseljih za leta 2013–2022.

Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.



Meritve emisij na izpuhu NEK opravlja NEK in IJS. V tabeli 4.3 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 4.4) lahko izračunamo inhalacijski in imerzijski prispevek k letni učinkoviti dozi zaradi zračnih emisij NEK.

Pri tem je treba povedati, da se pri poročanju o merskih rezultatih v bližini meje detekcije uporablja priporočilo Evropske komisije [60], 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 [58].

Metodologija izračuna učinkovite doze za referenčne osebe zaradi radioaktivnosti v zraku

Iz tabele 4.3 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 doze¹⁶ 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 4.3) ter iz izračunanih mesečnih razredčitvenih koeficientov (χ/Q) (tabela 4.4), 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 $A_{jl, \text{inh}, \text{mes}}$ posamezni mesečni vnos j -tega radionuklida z vdihavanjem, izražen v Bq. V našem primeru mesečni vnos j -tega radionuklida $A_{jl, \text{inh}, \text{mes}}$ izračunamo kot:

$$A_{jl, \text{inh}, \text{mes}} = a_{jl, \text{mes}} \frac{1}{12} V(g) \quad (4.3)$$

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 pretvorbenih faktorjev $h(g)_{j, \text{inh}}$ ([10], [38]) za posamezne

¹⁶ 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.



radionuklide in posamezno starostno skupino dobimo oceno za mesečni prispevek posameznega radionuklida k letni dozi. Letna efektivna doza zaradi vdihavanja za posamezno starostno skupino referenčne osebe je potem vsota mesečnih efektivnih doz, ki jih izračunamo iz enačbe (4.2).

Efektivno dozo zaradi imerzije (zunanjšega 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 $((Sv/d)/(Bq/m^3))$ j -tega radionuklida, prejeta v enem dnevu na enoto koncentracije aktivnosti v zraku ([10], [38]). 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 $\mu Bq/m^3$, 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 2022 je bil tako med izpusti NEK radionuklid Cs-137 prisoten v majhni količini 19 kBq, 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 4.6 so izračunane inhalacijske in imerzijske doze v okolici NEK. Najvišje izračunane doze so bile v letu 2022 v Žadovinku in nato v Spodnjem Starem Gradu.

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 [38] in hitrosti dihanja 17 L/min ($9\,000\,m^3$ na leto) za odraslega posameznika, 10,6 L/min za otroka ($5\,585\,m^3$ na leto) in 2,0 L/min ($1\,044\,m^3$ na leto) za dojenčka. Metodologija sledi priporočilom ICRP 101 [38] in daje konservativnejšo oceno doze kot določbe uredbe UV2 [10].



Tabela 4.5: Ocenjene letne efektivne doze zaradi inhalacije (vdihavanja) in imerzije (zunanje sevanje) 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 2022.

	Radionuklid	Letna efektivna doza (μSv)	
		Spodnji Stari Grad	Ograja NEK (okvirno velja tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja)
Pare, plini (inhalacija - vdihavanje)	I-131	4,3E-07	9,6E-07
	I-132	2,0E-08	4,5E-08
	I-133		
	I-135		
	HTO	8,2E-03	1,8E-02
	HT + CHT	8,9E-06	2,3E-05
	C-14 v CO_2	5,6E-05	1,1E-04
	C-14 v CH_4	4,0E-04	9,3E-04
Aerosoli (inhalacija - vdihavanje)	Na-22	8,1E-10	1,7E-09
	Mn-54		
	Co-57		
	Co-58	4,8E-09	9,3E-09
	Co-60	3,2E-08	7,1E-08
	Zr-95	1,0E-08	2,3E-08
	Nb-95	3,3E-09	7,4E-09
	Ru-103		
	Ag-110m	1,8E-08	3,9E-08
	Sb-125		
	Te-123m		
	Te-125m		
	Te-127m	1,7E-08	3,6E-08
	Cs-137	7,5E-08	1,2E-07
	Fe-55		
	Sr-89/90	1,8E-08	4,0E-08
	Se-75	5,1E-08	1,4E-07
Žlahtni plini (imerzija - zunanje sevanje)	Xe-131m	5,1E-05	1,2E-04
	Xe-133	4,9E-09	1,3E-08
	Xe-133m		
	Xe-135		
	Xe-135m		
	Ar-41	1,2E-04	2,8E-04
	Kr-85		
	Kr-85m		
Inhalacijska doza		8,7E-03	1,9E-02
Imerzijska doza		1,7E-04	4,1E-04
DOZA – SKUPAJ		8,9E-03	1,9E-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

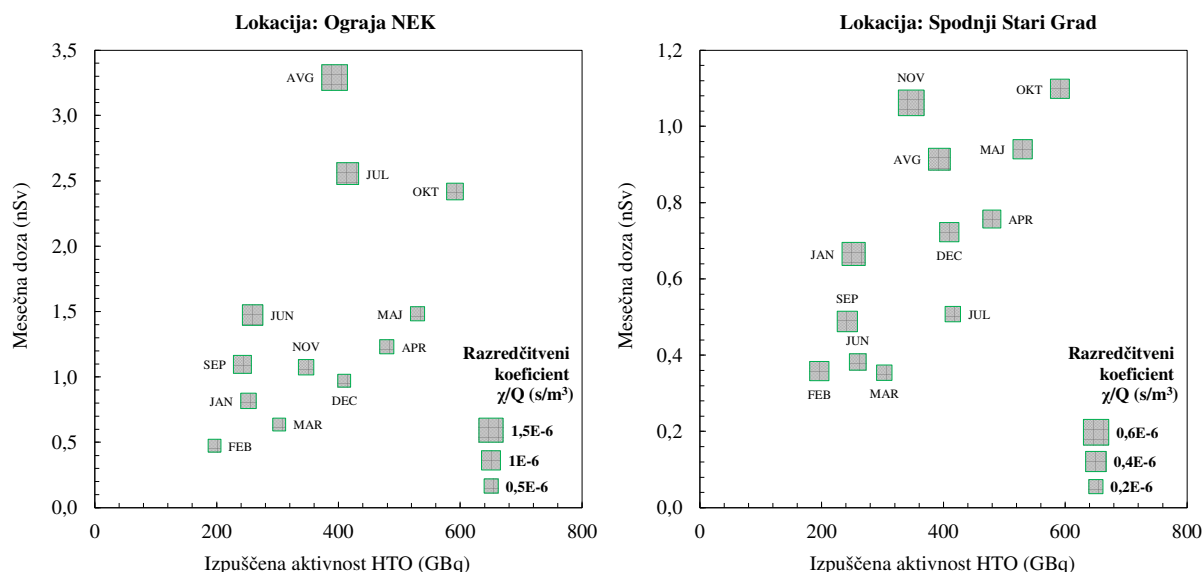
Leto	Spodnji Stari grad				Ograja NEK (okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja)			
	H-3	C-14	Letna inhalacijska doza (nSv)	Celotna letna doza (nSv)	H-3	C-14	Letna inhalacijska doza (nSv)	Celotna letna doza (nSv)
	Prispevek k celotni dozi (nSv)				Prispevek k celotni dozi (nSv)			
2011	3,5	0,01	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

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 2022 posledica zračnih emisij tritija (94%), 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 2022 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 2022 so bili izpusti tritija na srednje nizki ravni v primerjavi z izpusti v času remonta. Mesečne odvisnosti izpustov HTO (z največjim prispevkom k inhalacijski dozi) in izračunanih inhalacijskih doz so medsebojno prikazane na sliki 4.8 na lokacijah na ograji NEK in na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad, kjer je točka na sliki izrisana tako, da velikost točke (okvirna površina) približno predstavlja mesečni razredčitveni faktor. Na tak način hitro pojasnimo, zakaj je pri nekaterih nižjih izpustih aktivnosti HTO lahko doza višja. Med remontom v letu 2022 so bile relativno ugodne vremenske razmere, zato inhalacijske doze v tem času izrazito ne 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) [66]. V letu 2022 so bili kljub remontu izpusti C-14 v obliki CH₄ manjši (podobno tudi v letih 2011, 2012, 2015 in 2020), ugodnejše so bile tudi vremenske razmere v času remonta.

Prispevki obeh radionuklidov k letni inhalacijski dozi in celotni letni dozi v letih od 2011 do 2022 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 4.8: Medsebojna odvisnost izračunane mesečne doze v enotah nSv in izpuščene aktivnosti HTO v enotah GBq na ograji NEK in na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad v letu 2022. Površina posamezne točke v danem mesecu približno kaže tudi povprečni mesečni razredčitveni koeficient (χ/Q) z enoto s/m³.

V letu 2022 je bil v izpustih izmerjen relativno majhen prispevek joda (2,5 MBq), kar kaže, da je bila integriteta goriva v 32. gorivnem ciklu (2021–2022) 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 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 2022 predvsem posledica izpustov žlahtnih plinov različnih izotopov ksenona in Ar-41. Celotna letna imerzijska doza za Spodnji Stari Grad za leto 2022 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 velikostni red razlike). Mesečne variacije imerzijskih doz so enake kot pri inhalacijskih dozah, visoke v poletnih mesecih, povišane v času med 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 0,6 nSv (Dobova) do 19 nSv (ograja NEK, okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja) (tabela 4.7). Razlike med lokacijami so posledica razredčitve, kar upoštevamo s povprečnimi mesečnimi razredčitvenimi koeficienti χ/Q [54]–[57].



Tabela 4.7: Ocene inhalacijskih in imerzijskih doz zaradi atmosferskih izpustov v okolici NEK v letu 2022 z uporabo Lagrangeevega modela – imisijske doze NEK. Uporabljeni so podatki za dozne pretvorbene faktorje iz referenc [10] in [38] 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
Spodnji Stari Grad	1,5	8,7E-03	6,9E-03	2,7E-03	1,7E-04	8,9E-03	6,9E-03	2,7E-03
Vrbina	0,8	8,4E-03	6,7E-03	2,6E-03	1,7E-04	8,6E-03	6,7E-03	2,6E-03
Brežice	7,1	2,0E-03	1,6E-03	6,1E-04	4,0E-05	2,0E-03	1,6E-03	6,1E-04
Vihre	3,1	1,4E-03	1,1E-03	4,4E-04	3,3E-05	1,5E-03	1,1E-03	4,4E-04
Mrtvice	2,8	2,2E-03	1,7E-03	6,6E-04	4,9E-05	2,2E-03	1,7E-03	6,6E-04
Brege	2,3	4,9E-03	3,9E-03	1,5E-03	1,1E-04	5,0E-03	3,9E-03	1,5E-03
Zadovinec	1,7	8,8E-03	7,0E-03	2,7E-03	1,8E-04	9,0E-03	7,0E-03	2,7E-03
Leskovec	2,9	5,1E-03	4,0E-03	1,6E-03	9,2E-05	5,2E-03	4,0E-03	1,6E-03
Krško - Stara vas	1,7	3,4E-03	2,7E-03	1,0E-03	6,0E-05	3,4E-03	2,7E-03	1,0E-03
Pesje	3,0	7,8E-03	6,2E-03	2,4E-03	1,5E-04	7,9E-03	6,2E-03	2,4E-03
Dobova	12,1	6,2E-04	4,9E-04	1,9E-04	1,2E-05	6,3E-04	4,9E-04	1,9E-04
Ograja NEK (zahod)	0,2	1,9E-02	1,5E-02	5,7E-03	4,1E-04	1,9E-02	1,5E-02	5,7E-03

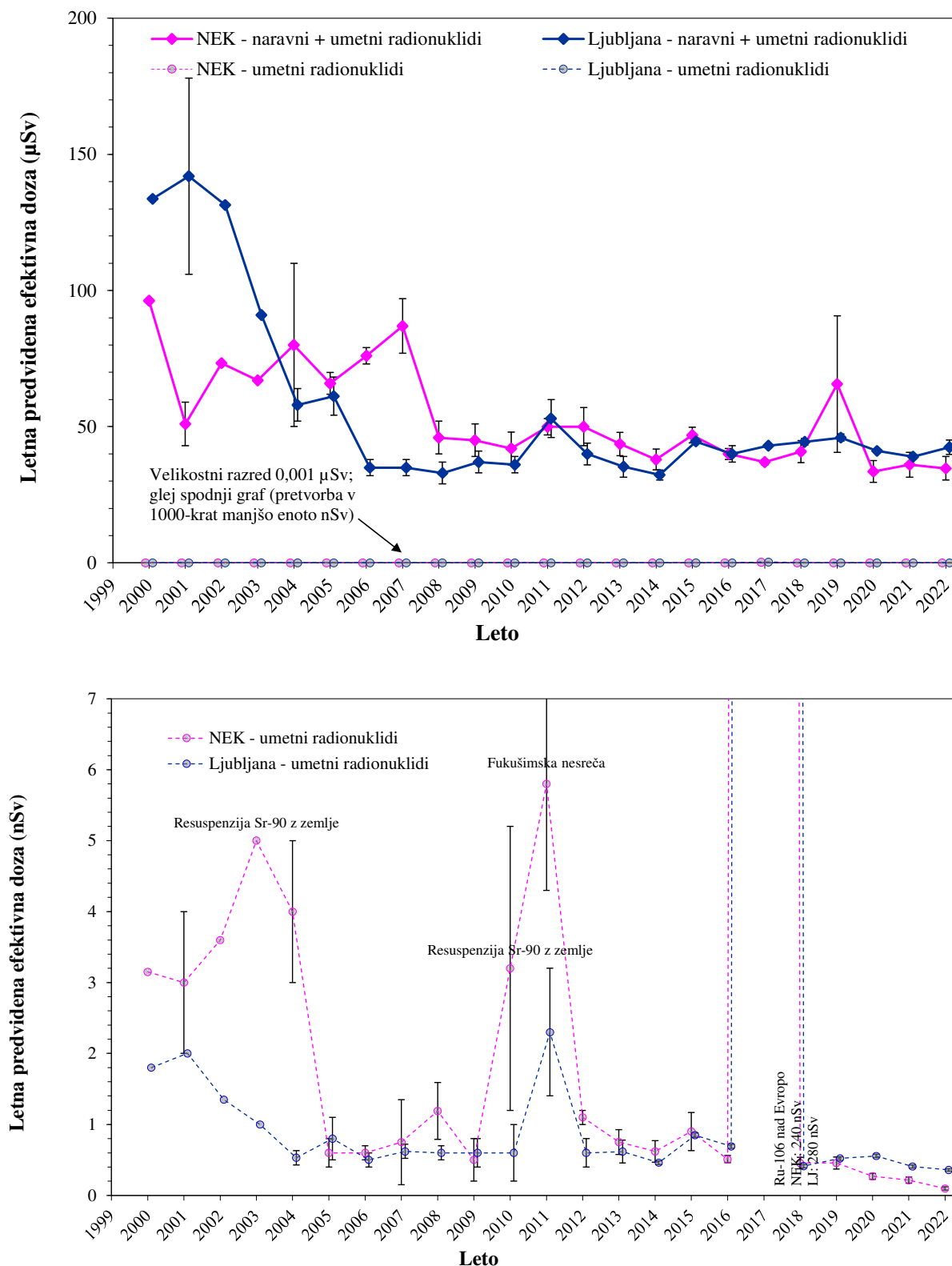
* dolžina sivega drsnika za posamezno starostno skupino sorazmerno izraža skupno dozo.

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 4.1) ob upoštevanju pretvorbene faktorje in značilnosti referenčne osebe. S seštevanjem predvidenih efektivnih doz posameznih radionuklidov dobimo predvideno efektivno 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 4.9 so predstavljene letne predvidene efektivne 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 efektivna 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 [65]). Povprečna izračunana efektivna doza za odraslo osebo v okolici NEK zaradi umetnih radionuklidov je bila v obdobju 2007–2022 ($1,1 \pm 0,4$) nSv (brez osamelca 2017). V letu 2022 je bil prispevek Cs-137 k letni dozi ($0,10 \pm 0,02$) nSv, prispevka Sr-90 ni bilo, ker ni bil izmerjen na lokaciji vzorčenja v Stari vasi (od sredine leta 2021 dalje namesto lokacije v Dobovi).



Slika 4.9: Primerjava letnih predvidenih efektivnih okoljskih doz za leta 2000–2022 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 2022 v T-44 do T-55 ter doznih pretvorbenih faktorjev iz referenc [10] in [38].

STAROSTNA SKUPINA	VSOTA PRISPEVKOV PO VRSTAH RADIONUKLIDOV	LETNA EFEKTIVNA OKOLJSKA DOZA IZ KONCENTRACIJ AKTIVNOSTI NA AEROSOLNIH FILTRIHI	
		OKOLICA NEK	LJUBLJANA
ODRASLI	umetni radionuklidi	$0,10 \pm 0,02$ nSv	$0,36 \pm 0,02$ nSv
	umetni in naravni radionuklidi	35 ± 4 μ Sv	42 ± 3 μ Sv
OTROCI	umetni radionuklidi	$0,07 \pm 0,02$ nSv	$0,27 \pm 0,01$ nSv
	umetni in naravni radionuklidi	27 ± 3 μ Sv	34 ± 2 μ Sv
DOJENČKI	umetni radionuklidi	$0,03 \pm 0,01$ nSv	$0,12 \pm 0,01$ nSv
	umetni in naravni radionuklidi	13 ± 2 μ Sv	16 ± 1 μ Sv

Na sliki 4.9 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 pretvorbenega 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 2022 (27 ± 4) μ Sv, kar je zelo podobno dozam iz preteklih let: ($21\text{--}49$ μ Sv na leto v obdobju 2005–2021). Druga dva naravna radionuklida po prispevku k efektivni dozi v letu 2022 sta Th-228 ($2,3 \pm 0,2$) μ Sv in Th-230 ($3,4 \pm 2,0$) μ Sv. Iz meritev koncentracij aktivnosti na aerosolnih filtrih v letu 2022 v Ljubljani so prispevki k dozi v okviru variacij v preteklih letih podobni prispevkom v okolici NEK in sicer (41 ± 2) μ Sv na leto zaradi Pb-210 in ($0,51 \pm 0,05$) μ Sv na leto zaradi Th-228 oziroma ($0,8 \pm 2,0$) μ Sv na leto zaradi Th-230. 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 [12], [14].

Izračunana predvidena letna efektivna okoljska doza zaradi inhalacije (vdihavanja) za referenčno osebo v okolici NEK za leto 2022 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 (8,9 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 (35 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 2022 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) 8,2 nSv oziroma 0,5 nSv na leto, ob ograji NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja), pa 18,0 nSv oziroma 1,0 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 2022 za odraslega posameznika iz prebivalstva, ki je posledica inhalacije (vdihavanja) in imerzije (zunanjega sevanja) **zaradi izpustov NEK**, je v Spodnjem Starem Gradu 8,9 nSv, ob ograji NEK pa 19,4 nSv.

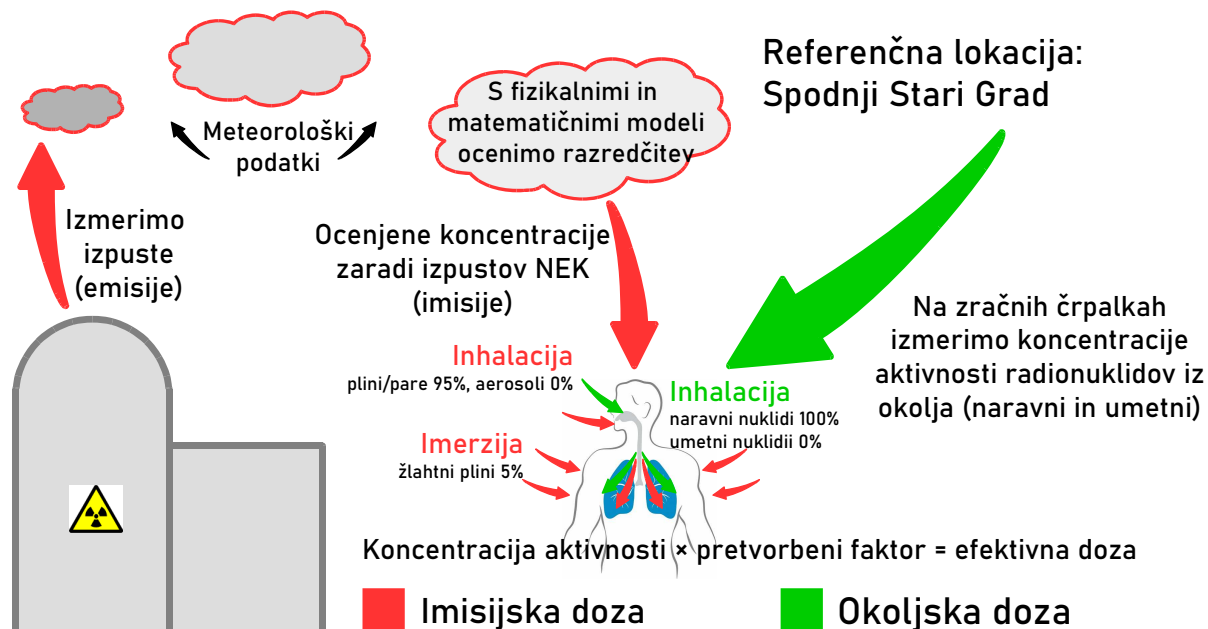
Predvidena **učinkovita okoljska doza zaradi inhalacije** (vdihavanja) aerosolov v okolici NEK je predvsem posledica inhalacije **dolgoživih naravnih radionuklidov** in je za odraslega posameznika $(35 \pm 4) \mu$ Sv na leto; doza je v okviru pričakovanj in na ravni povprečne vrednosti zadnjih let. Predvidena **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 $(0,10 \pm 0,02) \text{ nSv}$ 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 [67], 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 0,0194 μ Sv in 0,0086 μ Sv na leto, na večjih razdaljah 3 000 m (Pesje) oziroma 7 100 m (Brežice) od NEK (ekvivalent 5 000 m) pa 0,0079 μ Sv in 0,0020 μ Sv na leto.



GRAFIČNI PRIKAZ PRISPEVKOV ZA OCENO EFEKTIVNE DOZE PO ZRAČNI PRENOSNI POTI

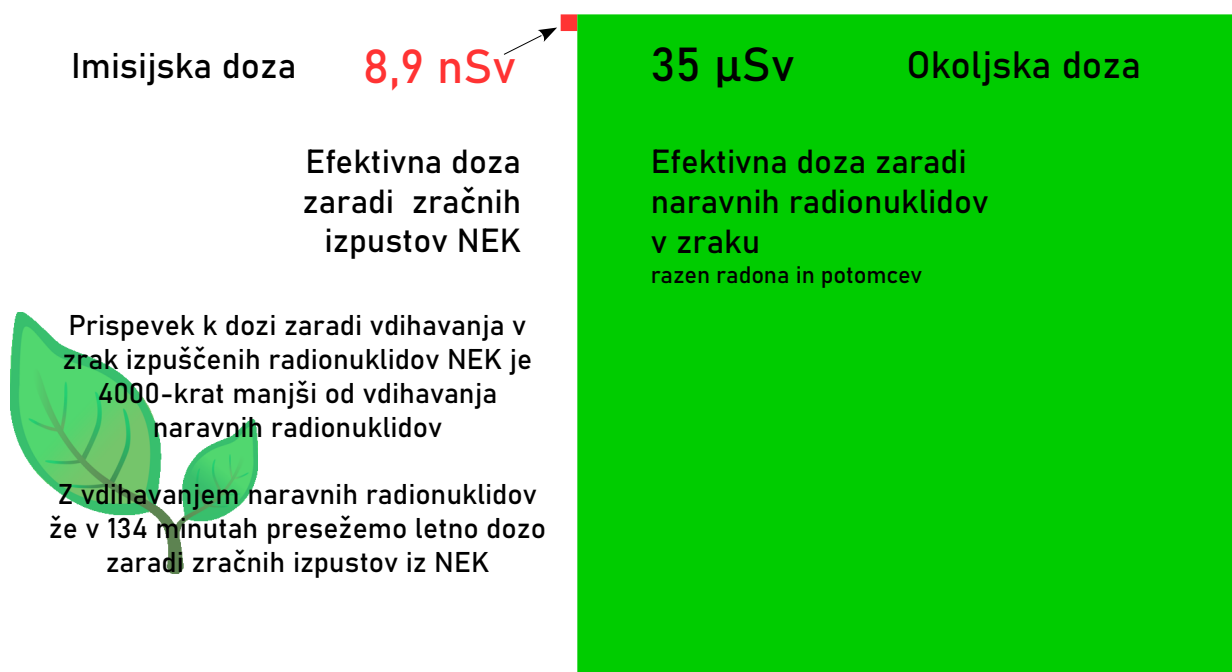
Kako ocenimo doze zaradi zračnih izpustov?



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!





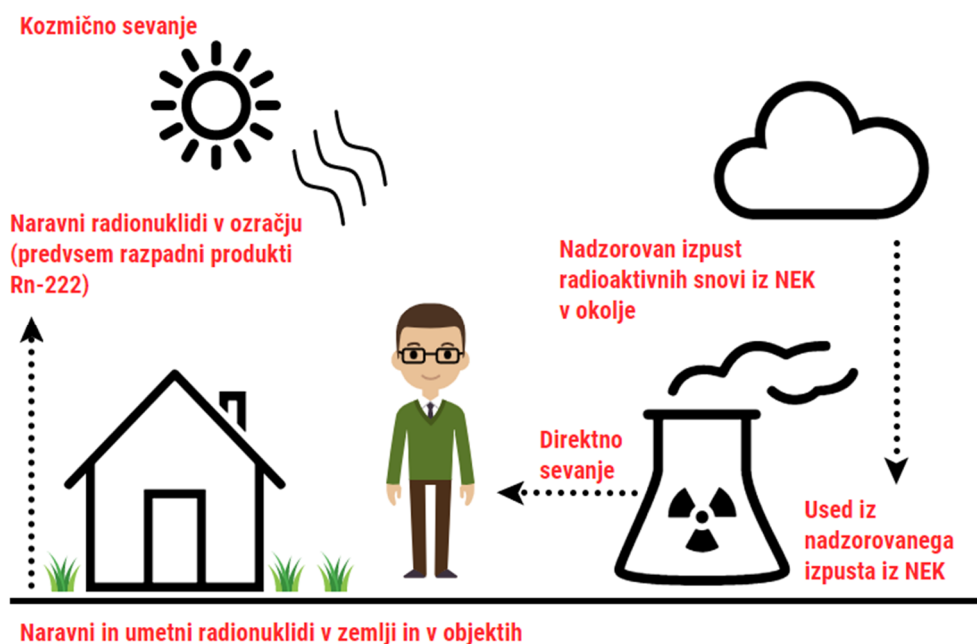
5 ZUNANJE SEVANJE

POVZETEK

Zunanje sevanje, ki mu je izpostavljeno prebivalstvo, vključuje kozmično sevanje, sevanje naravnih radionuklidov (predvsem razpadnih produktov 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 dozni obremenitvi prebivalstva zaradi sevanja naravnih in umetnih radionuklidov v zemlji je v letu 2022 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 poplavljen. Vrednosti $H^*(10)$ zaradi radioaktivnosti v zemlji pri predpostavki enakomerne porazdelitve za naravne radionuklide in realne porazdelitve za Cs-137 so v letu 2022 v okolici NEK med $(0,52 \pm 0,02)$ mSv za zemljo v Kusovi Vrbini in $(0,65 \pm 0,03)$ mSv za zemljo na Gmajnicah in v Ameriki. Iz meritev globinske odvisnosti specifične aktivnosti Cs-137 na posameznih lokacijah lahko sklepamo na kompleksnost delovanja površinske in podtalne vode.

V letu 2022 so bile v teku obratovalnega nadzora radioaktivnosti NEK opravljene neodvisne meritve doze zunanjega sevanja s termoluminiscenčnimi dozimetri (TLD) in kontinuirnimi merilniki hitrosti doze (MFM). Meritve s TLD in MFM 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 $(0,79 \pm 0,10)$ mSv, na ograji NEK $(0,53 \pm 0,04)$ mSv, v okolici Zagreba na Hrvaškem pa $(0,76 \pm 0,10)$ 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 2022 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 [68].

Naravno sevanje iz zemlje izvira iz 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. Razpadni produkti 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 jedske 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 MFM, ki so porazdeljeni v okolici jedske elektrarne, in sistem merilnikov zunanjega sevanja, ki so razporejeni po Sloveniji. 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*).

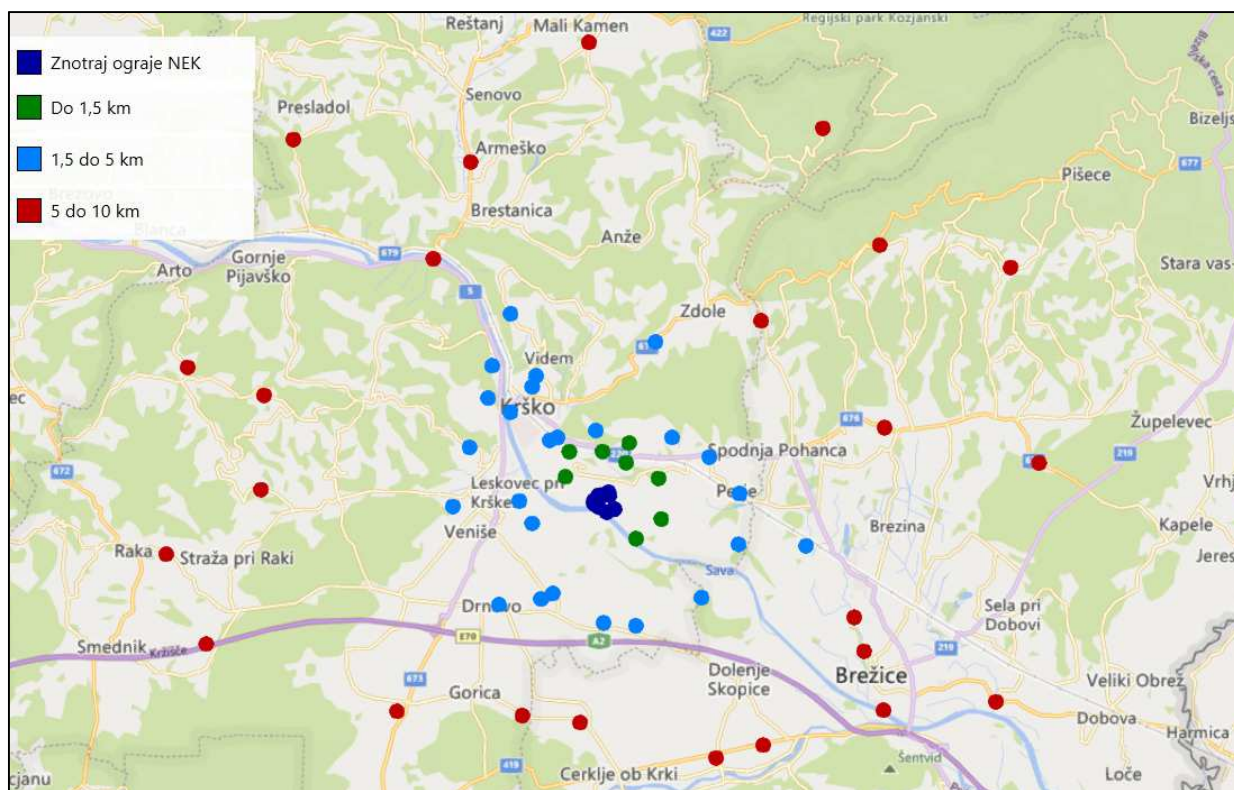
Meritve TLD

Rezultati meritev doze zunanjega sevanja (sevanja gama in ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja) za leto 2022 so v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320* v tabelah T-53/b in T-53/c za dozimetre v okolici NEK, za dozimetre na ograji NEK in v 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 2022. V okviru merske negotovosti so letni okoljski dozni ekvivalenti v različnih oddaljenostih od NEK primerljivi s tistimi v preteklih letih.

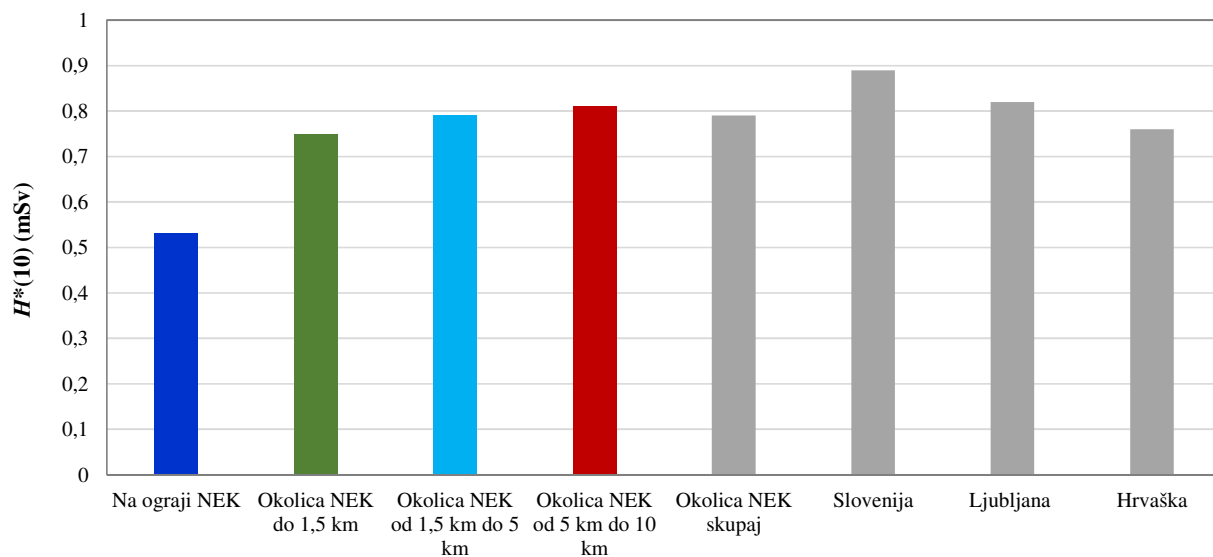
Tabela 5.1: Letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ na ograji NEK, v okolici NEK, v Sloveniji, Ljubljani in na Hrvaškem v letu 2022

Lokacija	Št. TLD	$H^*(10)$ (mSv)	Razpon $H^*(10)$ (mSv)
Na ograji NEK	9	$0,53 \pm 0,04$	0,46–0,57
Okolica NEK skupaj	57	$0,79 \pm 0,10$	0,46–1,01
Okolica NEK do 1,5 km	8	$0,75 \pm 0,12$	0,62–0,97
Okolica NEK od 1,5 km do 5 km	25	$0,79 \pm 0,11$	0,64–1,01
Okolica NEK od 5 km do 10 km	24	$0,81 \pm 0,09$	0,64–0,97
Slovenija	50	$0,89 \pm 0,16$	0,66–1,51
Ljubljana – referenčna lokacija	1	$0,82 \pm 0,12$	–
Hrvaška	10	$0,76 \pm 0,10$	0,64–0,96

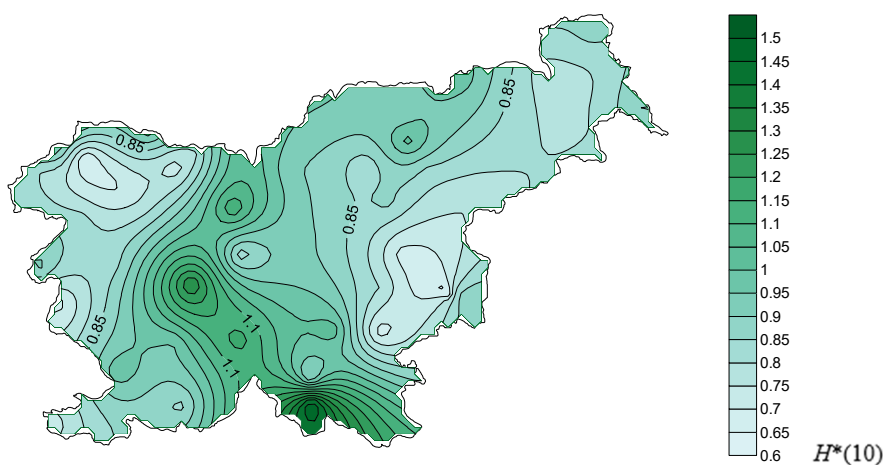
Meritve v Sloveniji v letu 2022 (slika 5.4) kažejo, da je povprečni letni okoljski dozni ekvivalent v okolici NEK sistematično nekoliko nižji kot v življenjskem okolju v Sloveniji. Iz tabele 5.1 in slike 5.3 je razvidno, da so letne doze na ograji NEK za približno 30 % nižje kot sicer doze v okolju. 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. 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 2022.



Slika 5.2: Prikaz razporeditve TLD meritev zunanjega sevanja s 57 dozimetri v okolici NEK in z 9 dozimetri na ograji NEK

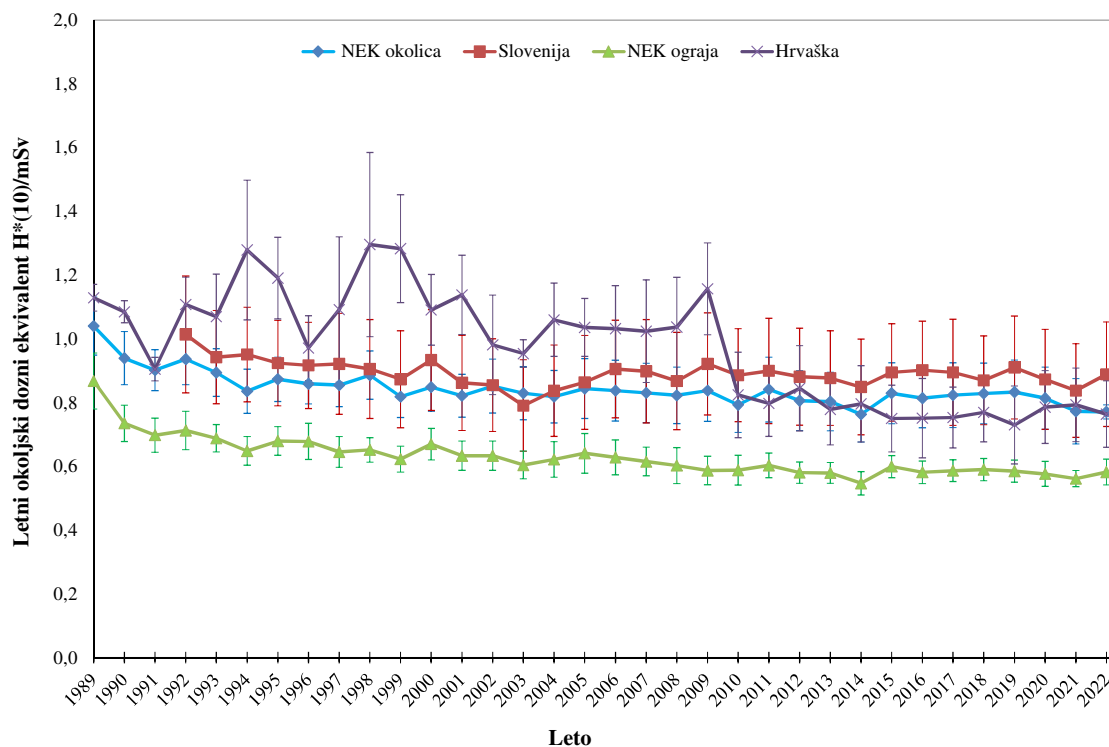


Slika 5.3: Primerjava med povprečnimi okoljskimi doznimi ekvivalenti $H^*(10)$, izmerjenimi v okolici NEK, na referenčni lokaciji v Ljubljani, povprečnimi ekvivalenti, izmerjenimi na Hrvaškem v okviru programa nadzora radioaktivnosti v okolici NEK, ter povprečnimi ekvivalenti, izmerjenimi v okviru meritev radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v letu 2022.

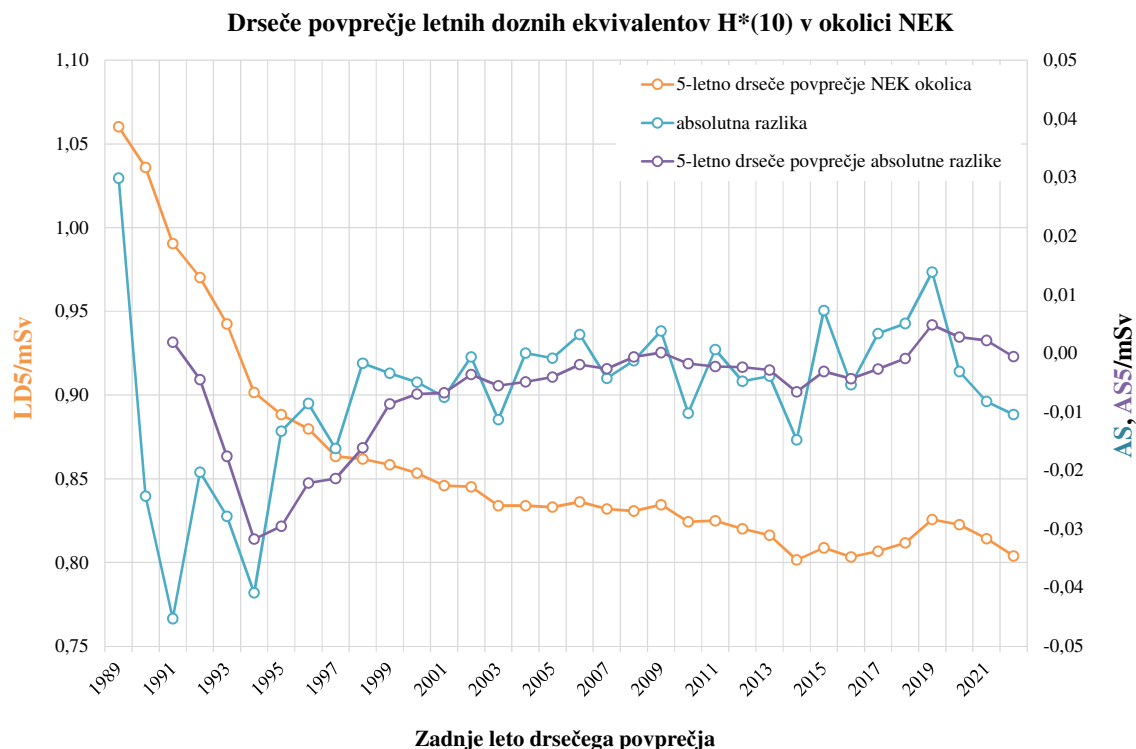


Slika 5.4: Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ po Sloveniji v letu 2022

Za meritve, narejene na območju Slovenije, je značilno izrazito zmanjševanje letne doze, predvsem v prvih letih po črnobilski 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 1990 do 2022



Slika 5.6: Petletno drseče povprečje letnih doznih ekvivalentov $H^*(10)$ ($LD5$), absolutna sprememba 5-letnega drsečega povprečja (AS) in 5-letno drseče povprečje absolutne spremembe ($AS5$) v okolici NEK od 1986 do 2022. 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 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$. 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* [6] 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 ($\text{CaF}_2\text{:Mn}$) 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 termoluminiscenčno dozimetrijo (TLD)* na IJS. S tem sistemom lahko merimo okoljske doze (okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$) v intervalu od 7,5 μSv do 5 Sv [71]. V okviru nadzornega programa NEK so na Hrvaškem postavljeni merilniki TLD LiF:Mg,Cu,P (MCP-N, Poljska), CaF_2 (IJS, Slovenija), OSL $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ (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 [71], [72].

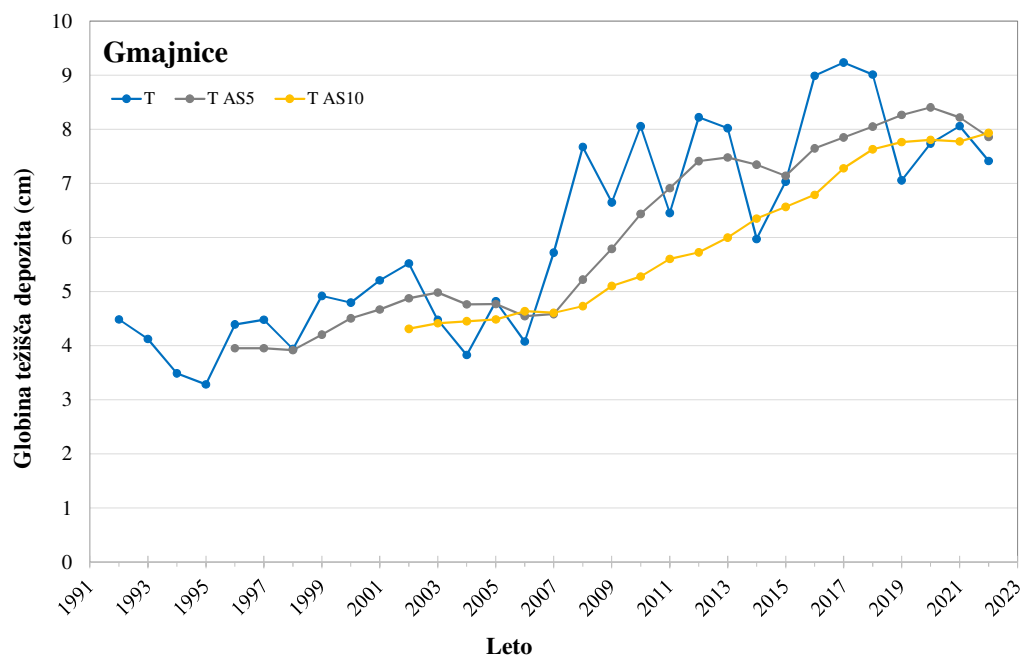
V okolici NEK je postavljenih 14 kontinuirnih merilnikov hitrosti doze MFM-203, od tega jih 13 nadzira NEK, eden pa deluje v sklopu mreže URSJV. Ta mreža je del mreže URSJV – MOP za zgodnje zaznavanje sprememb zunanjega sevanja, v kateri deluje 67 merilnikov MFM-203. Podatki o teh meritvah so sprotno dostopni na spletnem naslovu <http://www.radioaktivnost.si>.

REZULTATI MERITEV IN ZNAČILNI ČASOVNI POTEKI

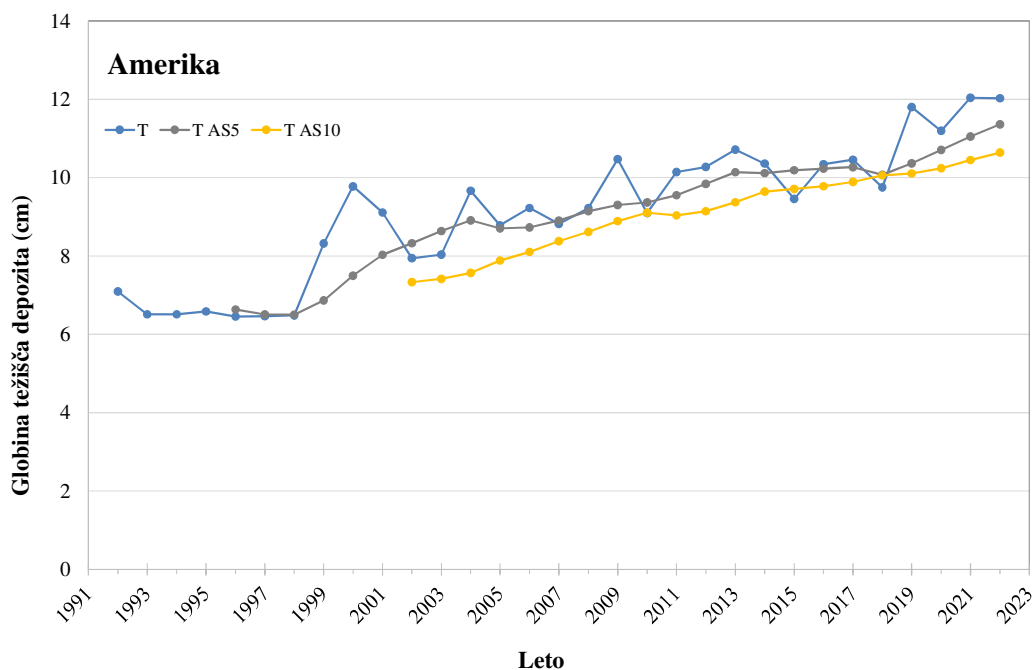
Cs-137 v zemlji

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 zgoščenki v poročilu *Merski rezultati - nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022*, IJS-DP-14320, marec 2022. 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 [40] za države južne Evrope.

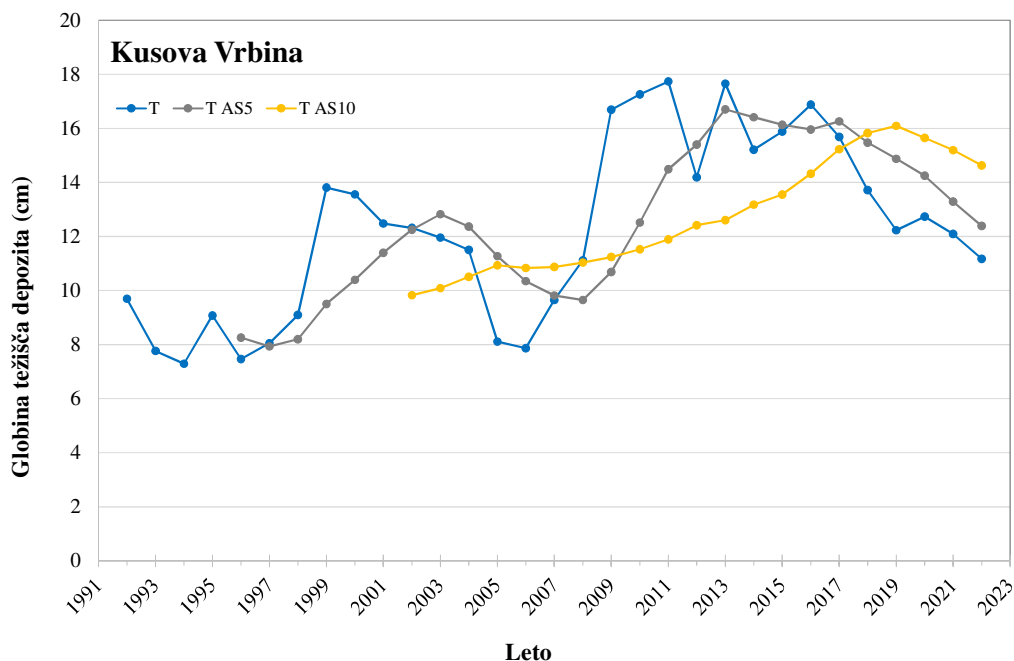
Na slikah 5.7a–5.7c (skale na ordinatnih oseh so različne) je prikazana časovna odvisnost globine težišča nanosa (depozita) na podlagi meritev od leta 1992 dalje za lokacije Gmajnice, Amerika in Kusova Vrbina.



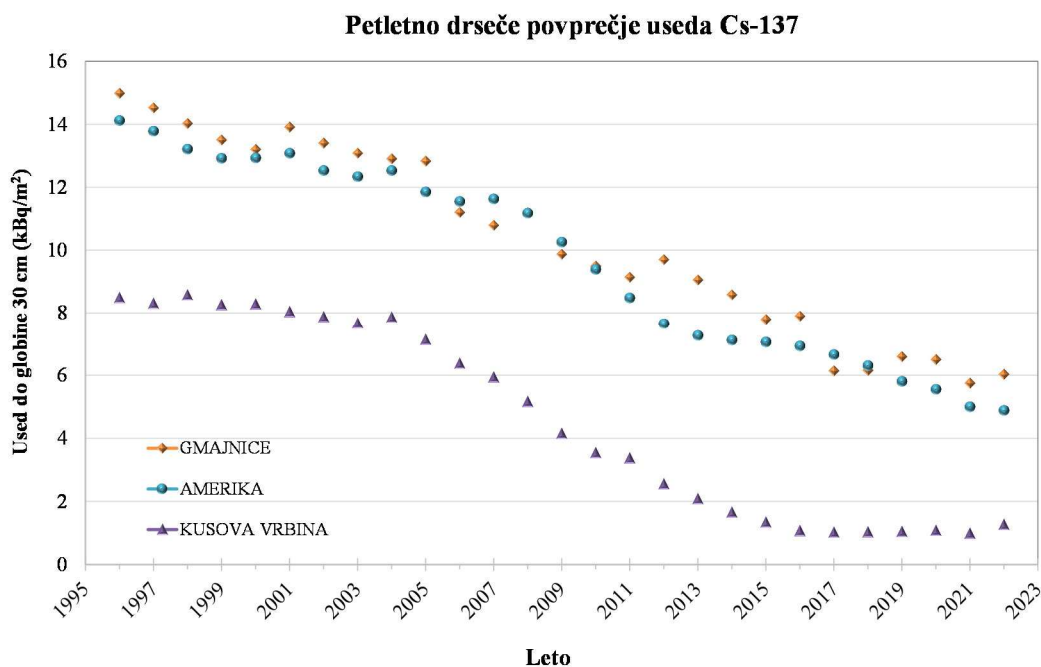
Slika 5.7a: Globina težišča nanosa Cs-137, izračunanega na podlagi letnih vzorčenj za lokacijo Gmajnice. Prikazano je tudi 5-letno (T AS5) in 10-letno (T AS10) drseče povprečje globine težišča depozita.



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

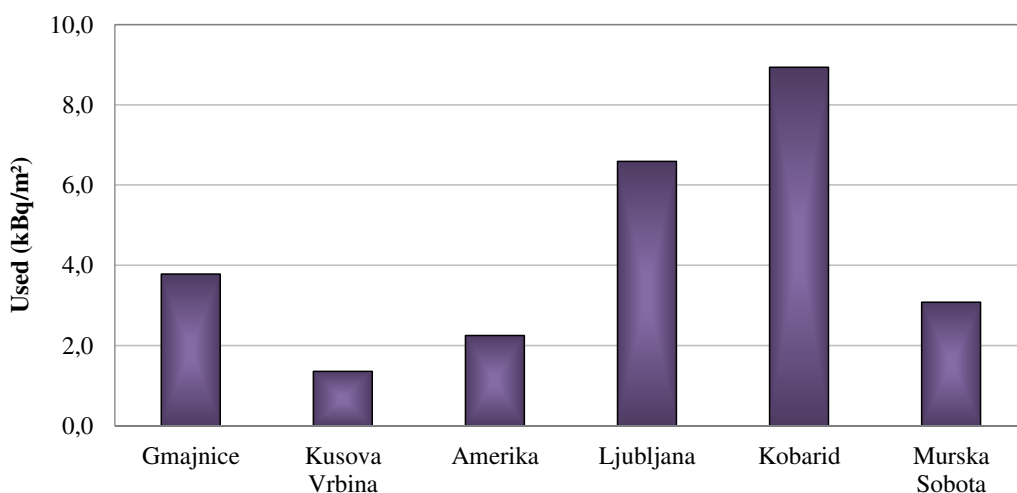


Opazno je precejšnje razsutje vrednosti, izračunanih iz rezultatov meritev specifičnih aktivnosti v posameznih letih. Vzroka sta lahko dva. Prvi je nehomogenost svežega nanosa po černobilski nesreči in vpliv prednostnih smeri toka vode v zemeljski ruši, ki lahko bistveno spremeni pričakovano porazdelitev radionuklidov v zemlji tudi na bližnjih lokacijah [40]. Drugi in bolj vpliven vzrok je prerazporeditev useda na mikrolokaciji. Prerazporeditev je posledica hidrogeoloških procesov, ki vplivajo na prodiranje Cs-137 v zemljino. Vpliv teh procesov je še posebej opazen na sliki 5.7c, ki prikazuje globino težišča nanosa na lokaciji Kusova Vrbina, ki je pogosto poplavljen. 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, kot ga kaže 10-letno drseče povprečje na sliki 5.7c, navidezno hitrejša kot na drugih dveh lokacijah. Začetna globina težišča nanosa na lokaciji Kusova Vrbina, če upoštevamo podatke od leta 1992, je ustrezno večja. S sliko 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.

Na sliki 5.8 je prikazano 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 najpogostejše poplavljen, 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.

V izpuhu NEK se, razen žlahtnih plinov, radionuklidov joda, Cr-51, Mn-54, Co-58, Co-60, Se-75, Sr-90, Sb-125 in Cs-137 v letu 2022 niso pojavili drugi sevalci gama. Tekočinski izpusti NEK so vsebovali aktivacijske in fisijske produkte, sevalce gama, Cr-51, Co-60, Zr-95, Nb-95, Ag-110m, Sb-124, 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.



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 2022 so bili na teh lokacijah izmerjeni povprečni usedi Cs-137 ($6,6 \pm 0,1$) kBq/m², ($8,9 \pm 0,1$) kBq/m² in ($3,1 \pm 0,1$) kBq/m². Te vrednosti so v povprečju višje ali primerljive z vrednostmi ($3,8 \pm 0,1$) kBq/m², ($1,4 \pm 1,1$) kBq/m² in ($2,3 \pm 0,1$) 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 dozemu ekvivalentu iz plasti 15–30 cm največ 5 % prispevka iz plasti 0–15 cm.

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 zgoščenki v poročilu *Merski rezultati - nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022*, IJS-DP-14320, marec 2022.

Na lokacijah Gmajnice in Amerika se vzorči neobdelana zemlja, ki je podobna kot podlaga pri večini merilnih postaj 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 [40]. 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 pojasnjujemo s tem, da se lokacije vzorčenja zemlje ne ujemajo povsem z lokacijo, kjer je postavljen dozimeter TLD.

Z uporabo programa EXPACS ([73], [74], [75]) izračunamo, da je letni okoljski dozni ekvivalent kozmičnih žarkov v Krškem (nadmorska višina 155 m) 0,40 mSv, od tega odpade 0,09 mSv na dozo zaradi nevtronov, na katere dozimetri TLD niso občutljivi. V Velikem Trnu (nadmorska višina 434 m) pa je letni okoljski dozni ekvivalent 0,46 mSv, od česar odpade 0,11 mSv na nevtrone, kar pomeni, da je doza zaradi 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 2022 za tri lokacije vzorčenja zemlje v okolici NEK. Ionizirajoča komponenta kozmičnega sevanja 0,31 mSv je izračunana s pomočjo programa EXPACS ([73], [74], [75]).

Radionuklid	Povprečna specifična aktivnost (0–15 cm) (Bq/kg)	Letni okoljski dozni ekvivalent, <i>H</i> *(10)		Letni okoljski dozni ekvivalent, <i>H</i> *(10) (TLD) (mSv)
		Sevanje tal	Sevanje tal in ionizirajoča kozmična komponenta	
		(mSv)		
	Gmajnice			št. dozimetra 59
U-238	35,2 ± 2,2	0,66 ± 0,02	0,97 ± 0,02	0,70 ± 0,11
Ra-226	44,0 ± 2,5			
Ra-228	32,7 ± 0,6			
Th-228	33,2 ± 0,6			
K-40	388 ± 8			
Cs-137	29,9 ± 0,8			
	Kusova Vrbina			št. dozimetra 21
U-238	25,7 ± 2,2	0,52 ± 0,02	0,83 ± 0,02	0,70 ± 0,12
Ra-226	37,6 ± 2,1			
Ra-228	26,5 ± 0,5			
Th-228	26,2 ± 0,5			
K-40	324 ± 7			
Cs-137	8,4 ± 0,3			
	Amerika			št. dozimetra 63
U-238	29,5 ± 1,9	0,64 ± 0,02	0,95 ± 0,02	0,75 ± 0,12
Ra-226	42,3 ± 2,4			
Ra-228	33,1 ± 0,7			
Th-228	33,2 ± 0,6			
K-40	418 ± 9			
Cs-137	14,3 ± 0,5			

Iz tabele 5.2 lahko ocenimo, da je prispevek zemeljskega sevanja k letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu v okolici NEK v razponu od 0,52 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 MFM. Rezultati so v tabeli T-56/a na priloženi zgoščenki v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2022, IJS-DP-14320*. Pri rezultatih meritev s temi merilniki je lastno ozadje merilnikov upoštevano in odšteto od izmerkov. V letu 2022 je bil izmerjen povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ ($0,82 \pm 0,14$) mSv v območju od 0,57 mSv do 1,04 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 52 kontinuirnih merilnikih v Sloveniji, ki so pod nadzorom URSJV, je bil v letu 2022 ($0,88 \pm 0,15$) mSv v območju od 0,60 mSv do 1,29 mSv. Ta vrednost je 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 z MFM, 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 2022, IJS-DP-14320*), je mogoče ugotoviti, da se na posameznih lokacijah vrednosti, izmerjene z MFM in TLD, lahko razlikujejo



tudi za 30 %, kar je posledica različne podlage na mestih, kjer sta postavljena merilnika MFM in TLD na določeni lokaciji. Na IJS, kjer sta oba merilnika postavljena v neposredni bližini, se vrednost ($0,82 \pm 0,02$) mSv, določena z MFM, v okviru negotovosti ujema z vrednostjo ($0,82 \pm 0,12$) 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 [69]. Okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ je bil izračunan iz zveze $H^*(10) = w \cdot D$ po standardu ISO 4037-3:2019 [42], 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 0,008 mSv in 0,025 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 0,022 mSv do 0,064 mSv.

Tabela 5.3: Ocenjena letna vrednost $H^*(10)$ zaradi globalne kontaminacije s Cs-137 do globine 30 cm v letu 2022

LOKACIJA	$H^*(10)$ (mSv)	LOKACIJA	$H^*(10)$ (mSv)
Gmajnice	$0,025 \pm 0,005$	Ljubljana	$0,032 \pm 0,006$
Kusova Vrbina	$0,008 \pm 0,002$	Kobarid	$0,064 \pm 0,013$
Amerika	$0,013 \pm 0,003$	Murska Sobota	$0,022 \pm 0,004$

Kot je bilo ugotovljeno, prispevkov NEK k dozi zunanjega sevanja ni mogoče neposredno meriti z merilniki TLD in MFM. Mreža TLD meri skupno dozo sevanja gama naravnih radionuklidov v okolju, ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja ter prispevka globalne kontaminacije s Cs-137. Povprečni izmerjeni letni okoljski dozni ekvivalent v okolici NEK je bil v letu 2022 ($0,79 \pm 0,10$) mSv, kar se ujema z vrednostjo ($0,77 \pm 0,09$) mSv v letu 2021.

Ker okoljski TLD ne merijo doze nevtronske komponente kozmičnega sevanja, je bila le-ta izračunana z uporabo programa EXPACS ([73], [74], [75]). Program omogoča izračun doze, ki je posledica posameznih komponent kozmičnega sevanja vključno z nevtronsko komponento za poljubno geografsko dolžino in širino. Za leto 2022 je prispevek nevtronov k letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu 0,09 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 [70]. Torej lahko za vse vrste sevanj sklenemo, da je prispevek iz objektov znotraj ograje NEK k zunanji dozi zunaj ograje zanemarljiv.

Letne efektivne doze zunanjega 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 2022 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 km × 25 km × 3 km in je razdeljena na 100 × 100 celic v horizontalni smeri in 20 celic po vertikali. Celica je velika 250 m × 250 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 2022, IJS-DP-14320*, marec 2022.

Depozicijski faktor (imenovan tudi *koeficient relativne depozicije*) D/Q za določeno lokacijo z enoto s/m^2 se izračuna po enačbi:

$$D/Q = k_T \cdot (\chi/Q)_1 \cdot h_1 + k_{WDD} \cdot \sum_{i=1}^N (\chi/Q)_i \cdot h_i \quad (5.2)$$

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 2022

Lokacija			Ograja NEK	Vrbina	Spodnji Stari Grad	Žadovinec	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	5,50E+05	9,40E-11	5,63E-13	3,25E-14	3,97E-14	4,18E-14	5,28E-15	4,59E-15
I-132	1,79E+06	6,59E-12	1,08E-11	6,22E-13	7,59E-13	7,99E-13	1,01E-13	8,79E-14
H-3	4,95E+12	–	–	–	–	–	–	–
C-14	8,69E+10	1,27E-13	–	–	–	–	–	–
Cr-51	–	2,66E-11	3,81E-12	2,20E-13	2,68E-13	2,83E-13	3,57E-14	3,11E-14
Mn-54	–	4,39E-09	–	–	–	–	–	–
Co-58	1,98E+04	2,04E-09	–	–	–	–	–	–
Co-60	9,89E+03	1,74E-08	5,14E-14	2,96E-15	3,62E-15	3,81E-15	4,82E-16	4,19E-16
Zr-95	1,67E+04	1,41E-09	6,34E-14	3,65E-15	4,46E-15	4,70E-15	5,94E-16	5,17E-16
Nb-95	1,76E+04	8,15E-10	3,29E-14	1,90E-15	2,31E-15	2,44E-15	3,08E-16	2,68E-16
Ag-110m	1,41E+04	–	3,58E-14	2,07E-15	2,52E-15	2,66E-15	3,36E-16	2,92E-16
Sb-124	–	3,16E-09	1,02E-13	5,86E-15	7,16E-15	7,54E-15	9,53E-16	8,29E-16
Te-125m	–	6,38E-11	–	–	–	–	–	–
Te-127m	1,70E+04	3,46E-11	–	–	–	–	–	–
Cs-137	1,85E+04	4,45E-09	5,23E-16	3,02E-17	3,68E-17	3,88E-17	4,90E-18	4,26E-18
Sr-90	1,23E+03	2,21E-12	2,88E-14	1,66E-15	2,03E-15	2,14E-15	2,70E-16	2,35E-16
VSOTA			1,58E-11	9,13E-13	1,11E-12	1,17E-12	1,48E-13	1,29E-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 pretvorbenega koeficienta DCF [76]. 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 2022 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 zunanjega 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 2021, 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 prebivalstvo¹⁷ 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 zunanjega sevanja v letu 2022 za prebivalstvo v okolici NEK

Vir	Podatki	$H^*(10)$ (mSv)
sevanje gama + ionizirajoča komponenta kozmičnega sevanja	TLD	0,79 (90 %)
kozmični nevtroni	[40], [73], [74], [75]	0,09 (10 %)
naravno sevanje – skupaj		0,88 (100 %)
kontaminacija zaradi černobilske nesreče in poskusnih jedrskih eksplozij	Cs-137 v zemlji	0,014 (1,6 %)*
NEK – atmosferski izpusti	used (model)	1,6E–11
SKUPAJ		0,88

* 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 konservativno 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 [69].

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.



SKLEPI

Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v vzorcih zemlje v letu 2022 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 0,52 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 2022 ni bilo mogoče zaznati. Prispevek Cs-137 k letni dozi $H^*(10)$ je od 0,9 % do 3 % 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 0,008 mSv in 0,025 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 MFM. Povprečji, izmerjeni z merilniki TLD in MFM, sta 0,79 mSv in 0,82 mSv. 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 2022 je bila za prebivalstvo v okolici NEK 0,88 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 0,5 μ Sv, kar je le 0,6 % 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 0,3 μ Sv, kar je 0,7% 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 2022 k dozi splošnih kontaminantov Cs-137 in Sr-90 v okolici NEK največ prispeva specifična aktivnost Sr-90 v podzemni in listni zelenjavi, pri oceni efektivne doze drugod po Sloveniji pa specifična aktivnost Sr-90 v sadju. Specifična aktivnost Cs-137 v divjačini (zajec) je bila v 2022 4,2 Bq/kg. V gozdnih ekosistemih po Sloveniji občasno še vedno ugotavljamo visoke vsebnosti Cs-137 kot posledico nesreče v Černobilu in preteklih jedrskih poskusov. V borovnicah iz Ljubljane smo namreč namerili 14,6 Bq/kg.

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 – $(16,8 \pm 0,1) \mu$ Sv, v krajih, kjer vpliva NEK v letu 2022 ni bilo mogoče zaznati (Dobova), pa $(16,3 \pm 0,1) \mu$ Sv. Med obema vrednostnima ni statistično značilne razlike (ob veliki negotovosti ocenjene vrednosti), doza 0,08 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 [76], [77]. 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 [78]. 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 [78], 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 [78].

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 efektivno 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 odvajajo vedno na istem mestu, če je le mogoče. V Vrbini, Bregah in Spodnjem Starem Gradu se hrana na primer prideluje le za potrebe radiološkega nadzora. Odvzemna mesta vzorcev hrane v letu 2022, ki so označena na priloženem zemljevidu na koncu poročila, so bila: sadovnjak ob NEK (sadje), Pesje (mleko, zelenjava, sadje), Brege (mleko, meso, zelenjava), Vihre (zelenjava), Vrbina (žito, zelenjava, sadje), Spodnji Stari Grad (meso, jajca), Žadovinec (zelenjava), Trnje (zelenjava), Leskovec (meso, sadje), Dolenje Skopice (mleko, zelenjava), Gornji Lenart (jajca), Libna (meso), Dolenja vas (zelenjava). V letu 2022 je bilo v okolici NEK skupno vzorčenih 31 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 2022 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, jabolkah 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 2022, IJS-DP-14320*, marec 2023.

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, šipek in bezeg), T-69 do T-73 (podzemna zelenjava: krompir, korenje, rdeča pesa, čebula, por; listna zelenjava – zelena solata, zelje, peteršilj, blitva; plodovke – fižol v zrnju,



stročji fižol, paprika, paradižnik, feferoni, kumare, bučke, melancani; 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 – češnje, marelice, slive, borovnice, grozdje; podzemna zelenjava – krompir, česen, čebula; listna zelenjava – radič, zelje; plodovke – paradižnik, kumare, fižol; žita – pšenična moka, koruza; jajca in meso (kokošja jajca, kokošje, svinjsko in goveje meso ter divjačina – divja svinja), skupno 21 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 [80], kažejo povečane vsebnosti tritija v rastlinju neposredno ob NEK v primerjavi z rastlinjem na kontrolni točki. V letu 2022 je bil v rastlinju analiziran tudi organsko vezan tritij (OBT). Meritve so opravili na IRB [22]. Koncentracije aktivnosti v vseh merjenih vzorcih rastlinja (koruza, jabolka) so od $(0,8 \pm 0,6)$ Bq/L na kontrolni lokaciji v Dobovi do $(28,5 \pm 0,6)$ 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 prebivalstva zaradi vsebnosti OBT v hrani je z biološkega stališča zanemarljiva (manj kot $1 \text{ E}^{-4} \mu\text{Sv}$).

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 [79]. 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.

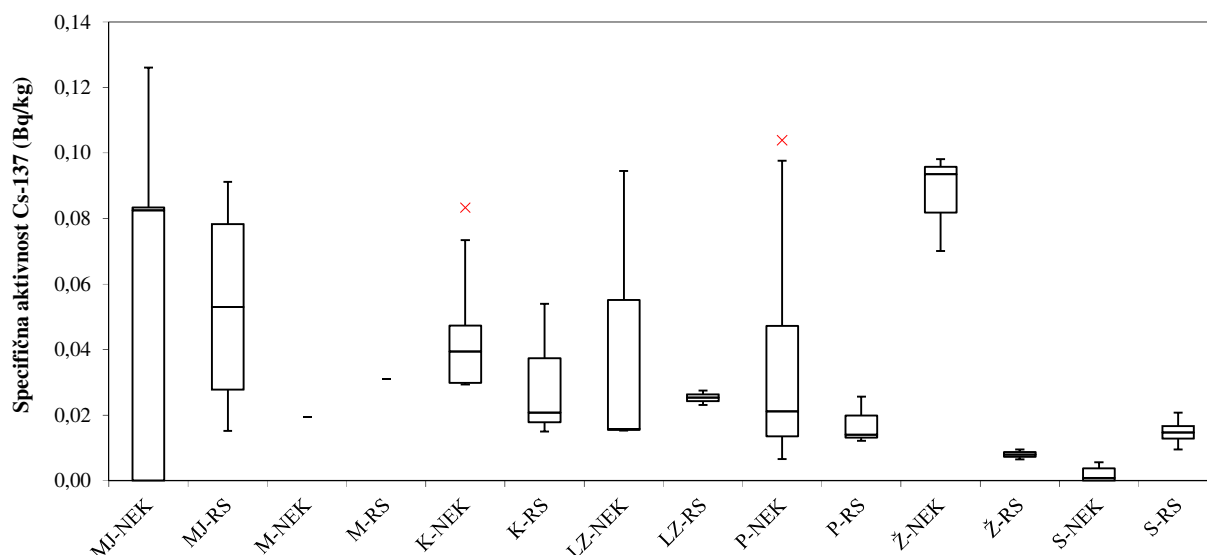
Jedrski objekti, še posebej jedrske elektrarne, lahko vplivajo na povišanje radioaktivnosti tako v atmosferi v svoji neposredni okolici kot tudi v rastlinju, ki tam uspeva. C-14 je merljiv tudi v izpustih NEK. Učinek jedrske elektrarne na povišanje aktivnosti C-14 v rastlinstvu oziroma hrani se ugotavlja 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.

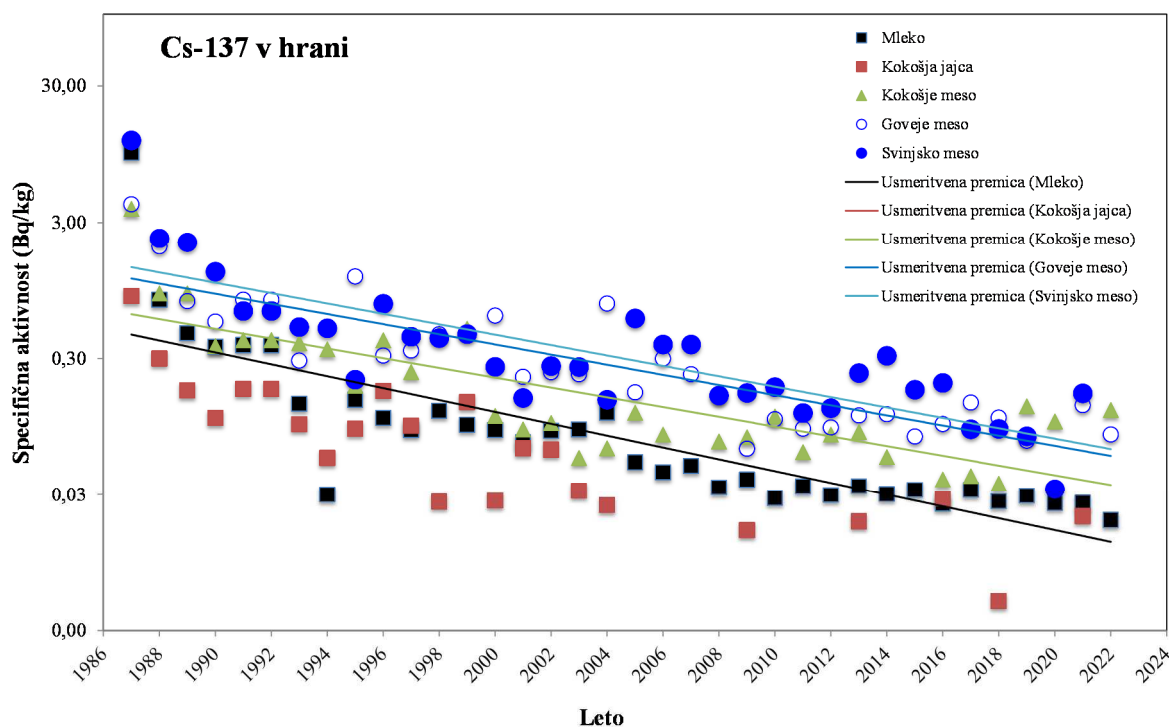
Specifična aktivnost C-14 je bila v bližnji okolici NEK v letu 2022 izmerjena v koruzi in pšenici in sicer v juliju in septembru. Vrednosti so zbrane v tabeli 6.1. Med povprečnimi vsebnostmi C-14 v hrani in rastlinju, merjenih v juliju in septembru na istih lokacijah, ni statistično značilnih razlik. Najvišja izmerjena specifična aktivnost C-14, (307 ± 1) Bq na kilogram ogljika, je bila izmerjena v jabolkah (lokacija J) v juliju. Lokacije so označene na sliki 1 v poročilu [20].


Tabela 6.1: Specifične aktivnosti C-14 v rastlinju v okolici NEK v letu 2022 (povprečje $\pm$ standardna deviacija)

Območje v okolici NEK	Julij 2022	September 2022
	Bq na kilogram ogljika	
Ograja NEK (notranji krog)	(274 ± 18)	(269 ± 18)
Rob izključitvenega območja – 500 m od osi reaktorja (zunanji krog)	(259 ± 1)	(260 ± 3)
Dobova	(257 ± 1)	(257 ± 1)



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 2022 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 2022. Iz predstavitev so izvzeti vzorci divjačine ($4,2 \pm 0,4$ Bq/kg) in borovnic ($14,6 \pm 0,4$ Bq/kg), vzorčeni drugod po Sloveniji. 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*).



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 2022. 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.

Cezij (Cs-137)

Radionuklid Cs-137 je bil v letu 2022 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 0,13 Bq/kg in je primerljiva s specifično aktivnostjo Cs-137 v živilih, vzorčenih drugod po Sloveniji, to je od 0 Bq/kg do 0,09 Bq/kg ([12], [14]). Podatki so prikazani na sliki 6.1. V divjačini (zajec in divja svinja; Leskovec, Slovenske Konjice) je bila specifična aktivnost Cs-137 ($0,08 \pm 0,03$) Bq/kg in ($4,18 \pm 0,146$) Bq/kg, kar je primerljivo z ostalimi živilami.

V posameznih živilih v okolici NEK je bila najvišja specifična aktivnost Cs-137 izmerjena v kokošjem mesu ($0,13 \pm 0,03$) 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 svinjskem mesu ($0,09 \pm 0,01$) Bq/kg. V borovnicah iz Ljubljane je bila specifična aktivnost ($14,6 \pm 0,37$) Bq/kg.

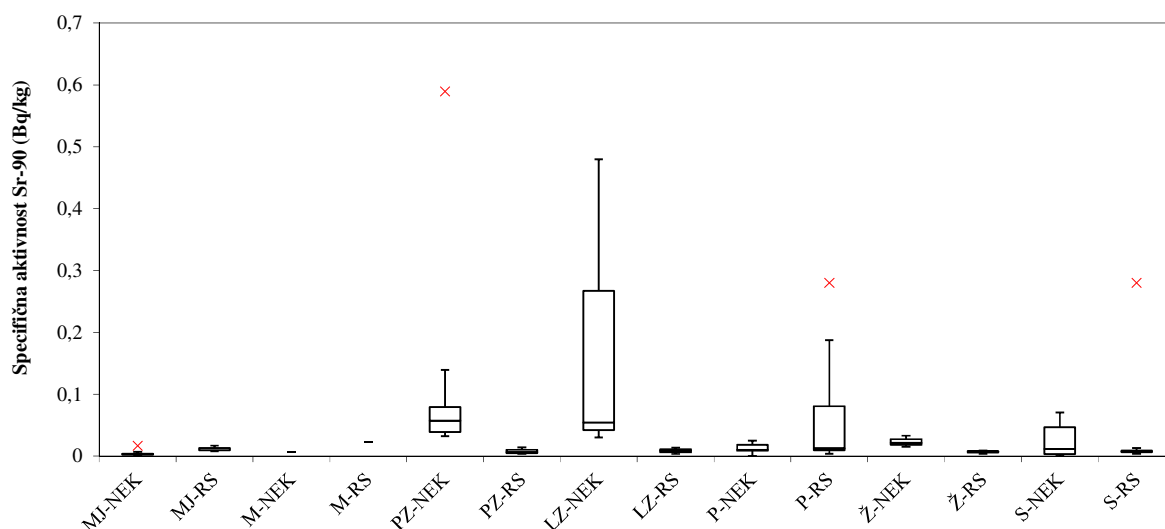
S slike 6.1 je razvidno, da največjo vsebnost Cs-137 v letu 2022 v okolici NEK in drugod po Sloveniji najdemo v žitih in mesu, najmanj pa v sadju.

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 črnobilske 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 črnobilskega obdobja (1984, 1985), specifična aktivnost Sr-90 pa je tudi za faktor 2 nižja kot pred črnobilsko nesrečo. Tudi za druga živila živalskega izvora je opazna težnja zmanjševanja specifičnih aktivnosti Cs-137 in Sr-90 po črnobilski nesreči (sliki 6.2 in 6.4). S pobiranjem pridelka iz agrarnih



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 [78]. 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 premice¹⁸. 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.

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 živili, vzorčenimi v agrikulturnih ekosistemih.



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 2022 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 2022. 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*).

¹⁸ Podatkom smo prilagajali eksponentne krivulje ($\sim e^{-\frac{t}{\tau}}$). Ker so vrednosti na ordinatni osi v logaritemski skali, na sliki vidimo premice, katerih naklon je obratno sorazmeren z efektivnim razpolovnim časom τ .



Stroncij (Sr-90)

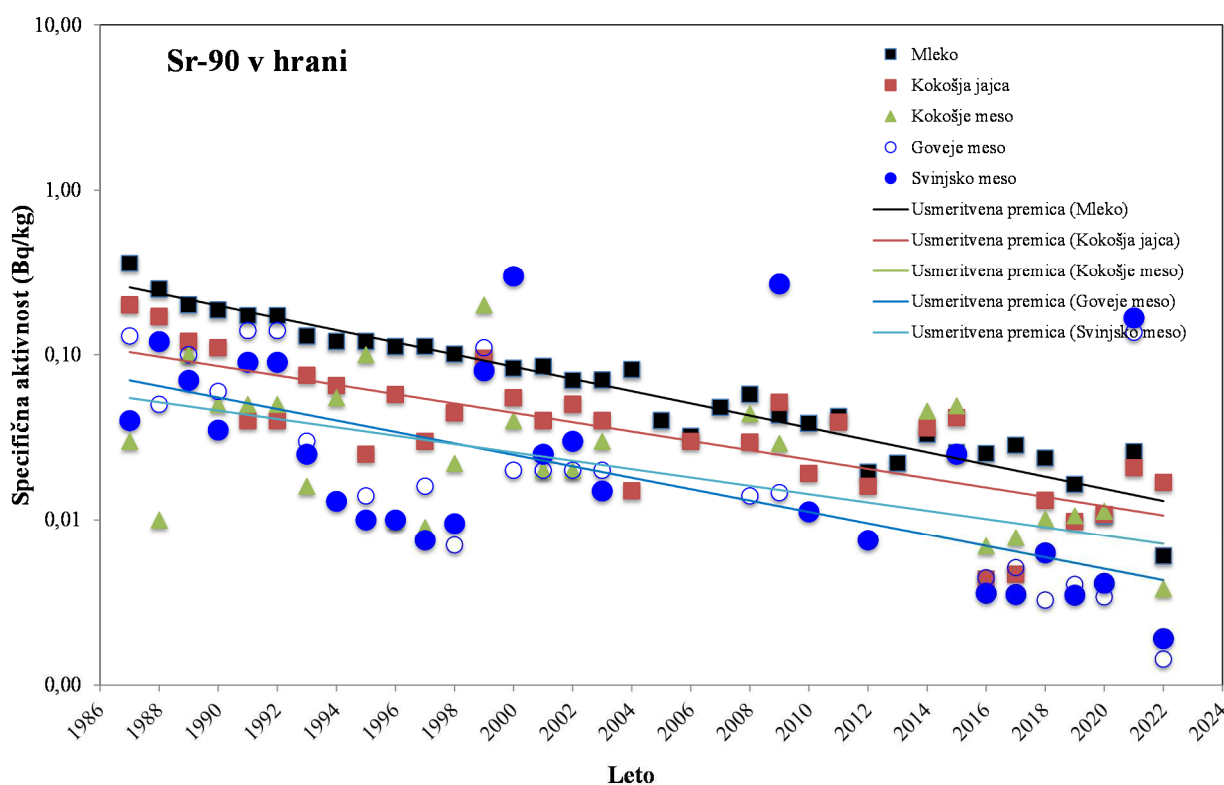
Radionuklid Sr-90 je bil v okolici NEK v letu 2022 detektiran v vseh skupinah živil (slika 6.3). Specifična aktivnost Sr-90 v živilih v okolici NEK je od 0 Bq/kg do 0,59 Bq/kg, specifična aktivnost Sr-90 v živilih, vzorčenih drugod po Sloveniji, pa od 0 Bq/kg do 0,28 Bq/kg.

V okolici NEK v skupino živil z večjo vsebnostjo Sr-90 spada hrana rastlinskega izvora, predvsem listna in podzemna zelenjava. Povprečna specifična aktivnost Sr-90 je najnižja v mesu in mleku. Pri vzorčenju drugod po Sloveniji smo največje vsebnosti Sr-90 detektirali v sadju.

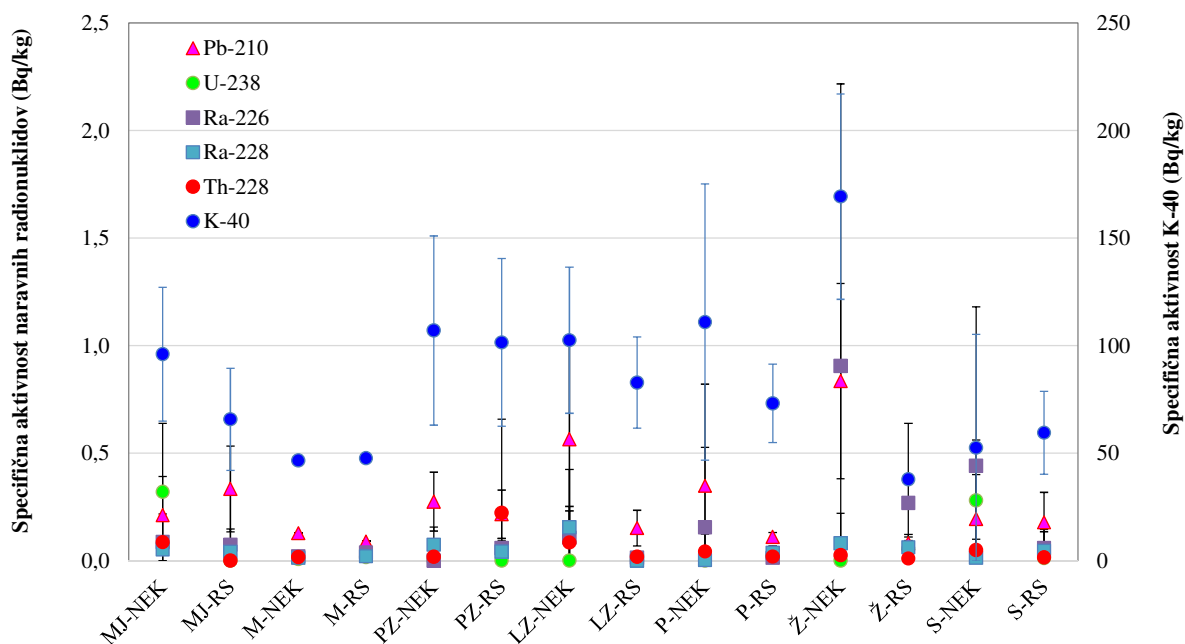
V okolici NEK so bile najvišje vrednosti detektirane v korenju ($0,59 \pm 0,05$) Bq/kg, drugod po Sloveniji pa v borovnicah ($0,28 \pm 0,03$) Bq/kg.

Jod (I-131)

Jod I-131 v letu 2022 v vzorcih hrane ni bil detektiran.



Slika 6.4: Izmerjene specifične aktivnosti Sr-90 od leta 1987 do 2022 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.



Slika 6.5: Izmerjene povprečne specifične aktivnosti naravnih radionuklidov (Bq/kg) v vzorčenih skupinah živilih v letu 2022 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 2022 je bila specifična aktivnost K-40 v hrani, pridelani na krško-brežiškem polju, od 34 Bq/kg (jagode) do 232 Bq/kg (fižol), v hrani, vzorčeni drugod po Sloveniji, pa od 30 Bq/kg (borovnice) do 141 Bq/kg (fižol). V okolici NEK v skupino z večjo specifično aktivnostjo K-40 spadata listna zelenjava in žito, med živila z manjšo aktivnostjo K-40 pa mleko in sadje.

Od naravnih radionuklidov (brez K-40) k letni efektivni dozi zaradi zaužitja hrane v okolici NEK in drugod po Sloveniji največ prispeva Pb-210 (78 % in 79 %). V letu 2022 je bilo v okolici NEK in drugod po Sloveniji največ Pb-210 v žitu (okolica NEK) in mesu (drugod po Sloveniji). Najmanjše specifične aktivnosti so bile izmerjene v mleku (okolica NEK) in žitu (drugod po Sloveniji). V posameznih živilih v okolici NEK je bila najvišja specifična aktivnost Pb-210 izmerjena v bezgu ($1,5 \pm 0,6$) Bq/kg, v živilih, vzorčenih po Sloveniji, pa v divjačini ($0,63 \pm 0,3$) Bq/kg. Razpon specifičnih aktivnosti drugih naravnih radionuklidov v hrani v okolici NEK in po Sloveniji prikazujemo v tabeli 6.2.

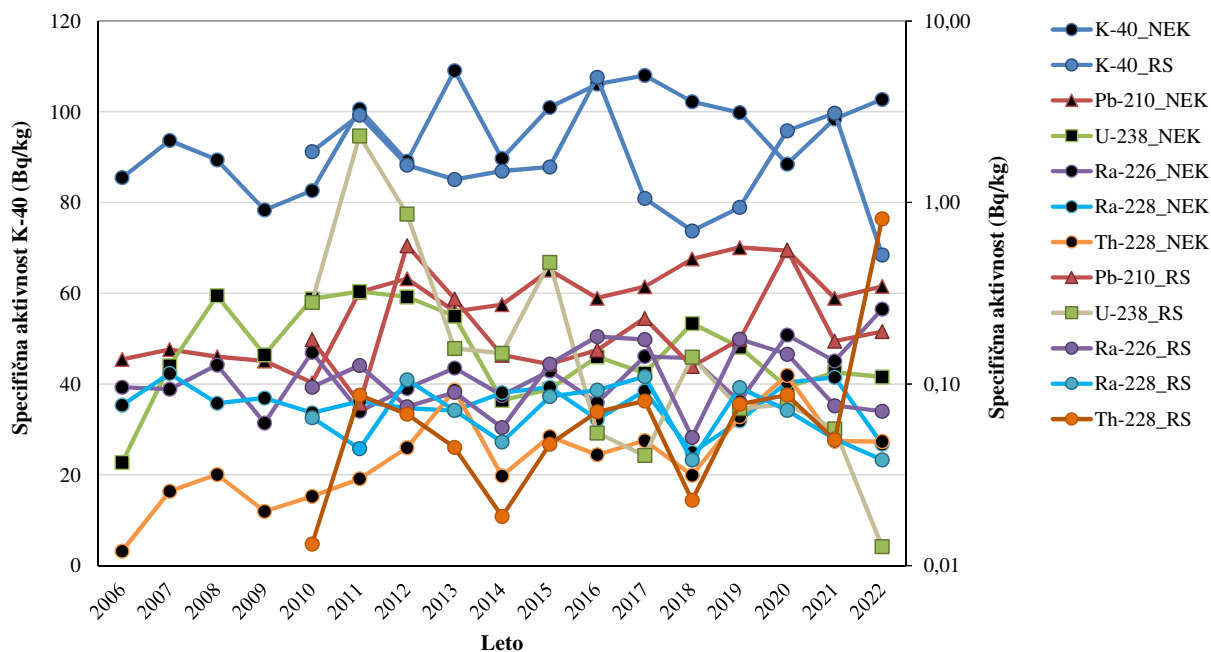


Tabela 6.2: Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v okolici NEK in po Sloveniji

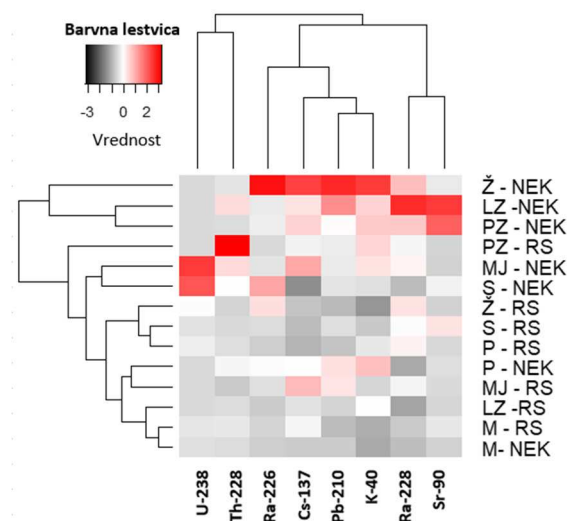
Radionuklid	NEK	Slovenija
	Specifična aktivnost (Bq/kg)	
U-238	do 1,4 (šipek)	do 0,11 (koruza)
Ra-226	do 2,4 (pšenica)	do 0,53 (koruza)
Ra-228	do 0,47 (peteršilj)	do 0,23 (borovnice)
Th-228	do 0,25 (peteršilj)	do 0,87 (česen)

Vsebnosti naravnih in umetnih radionuklidov v hrani z leti nihajo. V letu 2022 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 2022 drugod po Sloveniji (slika 6.6).

S programsko opremo »R« [86] smo statistično obdelali podatke specifičnih aktivnosti merjenih radionuklidov v 2022 za živila, vzorčena v okolici NEK in drugod po Sloveniji (RS). Z analizo gruč na podlagi evklidskih razdalj ([86]) 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 (NEK) (Cs-137, K-40, Pb-210, Ra-226) in listna zelenjava (NEK) (Ra-228 in Sr-90), najmanj pa mleko (NEK in RS) in listna zelenjava (RS). 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 2022, ter drugod po Sloveniji v letih od 2010 do 2022 (specifične aktivnosti K-40 so na levi ordinati, specifične aktivnosti drugih radionuklidov pa na desni).



Slika 6.7: Barvni diagram z dvodimenzionalno analizo gruĉ na podlagi z-transformiranih povpreĉnih specifiĉnih aktivnosti radionuklidov v skupinah Źivil, vzorĉenih v 2022 v okolici NEK in drugod po Sloveniji (MJ – meso in jajca, M – mleko, PZ – podzemna zelenjava, Ź – zelenjava, LZ – listnata zelenjava, P – plodovke, S – sadje in vino). Ćrna barva pomeni vrednosti pod povpreĉjem, bela povpreĉne vrednosti, rdeĉa pa nad povpreĉjem za posamezni radionuklid.

Tabela 6.3: Okvirna poraba Źivil po skupinah na ĉlana gospodinjstva glede na podatke NIJZ ([83], [84])

Źivilo	SI.Menu 2017/2018 Populacijske skupine			
	Dojenĉki (Malĉki)	Mladostniki	Odrasli	StarejŹi odrasli (nad 65 let)
	Povpreĉje (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
Źito (vsi izdelki)	59	102	88	83
Sadje	72	75	70	83



OCENA UČINKOV

Oceno doznih obremenitev prebivalstva¹⁹ 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)*):

$$E_{50-70, i} = a_i h(g)_i m_i \text{ (}\mu\text{Sv)} \quad (6.1)$$

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.

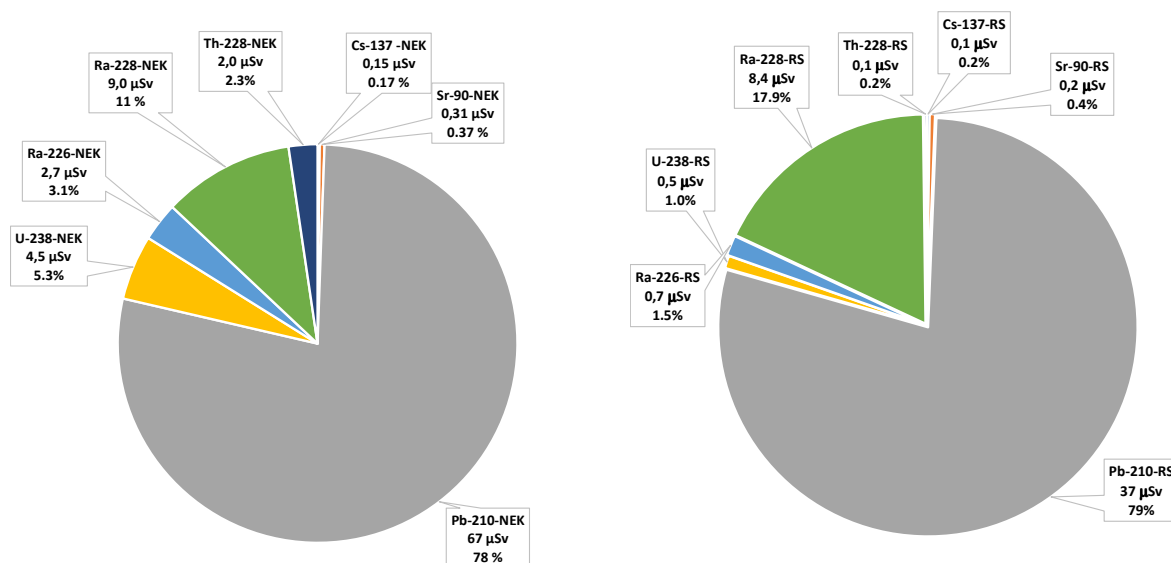
Republiški program nadzora radionuklidov v hrani predvideva vzorčenje hrane, pridelane v Sloveniji, medtem ko hrana, ki prihaja iz uvoza, ni natančneje kontrolirana, tako da podatki o vsebnosti radionuklidov niso znani in je zato težko oceniti dejanske doze, ki jih prebivalci prejmejo zaradi zaužitja 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 2022 v okolici NEK (85 ± 42) μSv , skupaj s K-40 pa (261 ± 75) 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 (49 ± 20) μSv , s K-40 pa (159 ± 35) μSv . V nadaljevanju obravnavamo doze za odrasle referenčne osebe, izračunane po skupinah živil.

Prispevki posameznih radionuklidov k efektivni dozi za odraslo osebo v letu 2022 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 (78 %), najmanj pa Sr-90 (0,37 %) in Cs-137 (0,17 %). Drugod po Sloveniji (slika 6.8 desno) je k skupni efektivni dozi brez K-40 največ prispeval Pb-210 (79 %), in najmanj Sr-90 (0,43 %) in Cs-137 (0,22 %). Deleži radionuklidov so primerljivi z vzorčenji iz preteklih let.

¹⁹ 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 2022; *desno:* drugod po Sloveniji v letu 2022. 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 2022 85 μSv , drugod po Sloveniji pa 49 μSv .

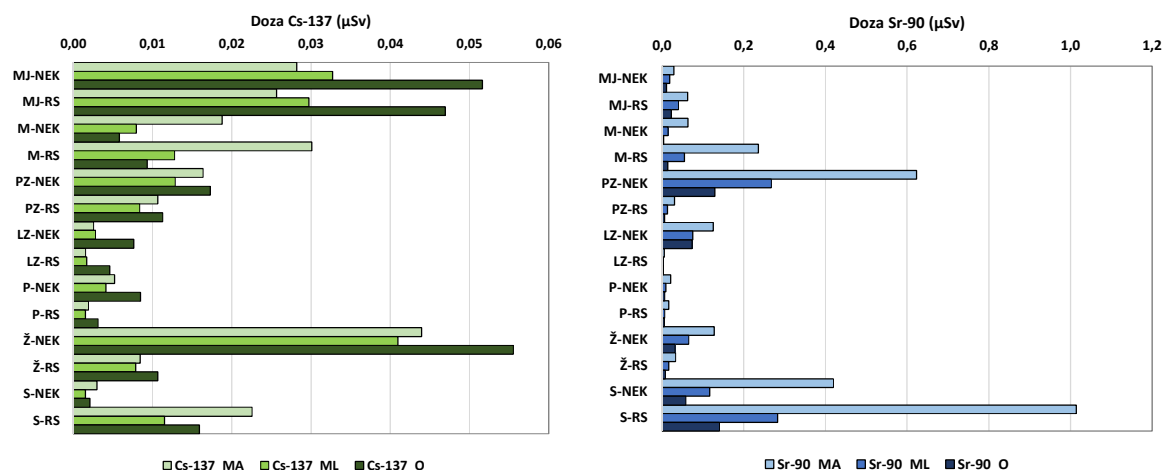
Umetni radionuklidi

Skupna letna efektivna doza za odraslo referenčno osebo, malčke in mladostnike zaradi vsebnosti Cs-137 v hrani je bila v letu 2022 v okolici NEK in drugod po Sloveniji 0,1 μSv . Skupna efektivna doza za odraslo referenčno osebo zaradi vsebnosti Sr-90 v hrani pa je bila v letu 2022 v okolici NEK 0,3 μSv in drugod po Sloveniji 0,3 μSv , za malčke 1,5 μSv in 1,4 μSv , za mladostnike pa 0,6 μSv in 0,4 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 % (0,1 % od Cs-137 in 0,4 % od Sr-90) od celotne prejete efektivne doze (85 μSv brez K-40). Drugod po Sloveniji je bil delež letne efektivne doze zaradi umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 pri uživanju hrane 0,6 % (0,2 % od Cs-137 in 0,4 % od Sr-90) glede na celotno prejeto efektivno dozo (47 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 (0,5 μSv in drugod po Sloveniji 0,6 μSv), je največ prispevalo prehranjevanje z žitom in mesom (Cs-137) in sadjem ter podzemno zelenjavo (Sr-90) (slika 6.9).

V zračnih izpustih, ki jih v okolje spušča NEK, sta bili v letu 2022 aktivnosti Cs-137 in Sr-90 zelo majhni (19 kBq, 1,2 kBq). V vzorcih jabolk in hrušk iz neposredne bližine NEK (sadovnjak ob ograji) je bila vsebnost Cs-137 v letu 2022 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 2022 zaznali tudi naslednje umetne radionuklide, ki niso del globalne kontaminacije: Mn-54, Co-58, Co-60, Nb-95, Ag-110m, S-125, Te-125m in I-131. Vendar so bile koncentracije aktivnosti teh radionuklidov v okolju tako nizke, da tudi v letu 2022 ti radionuklidi v živilih niso bili detektirani.



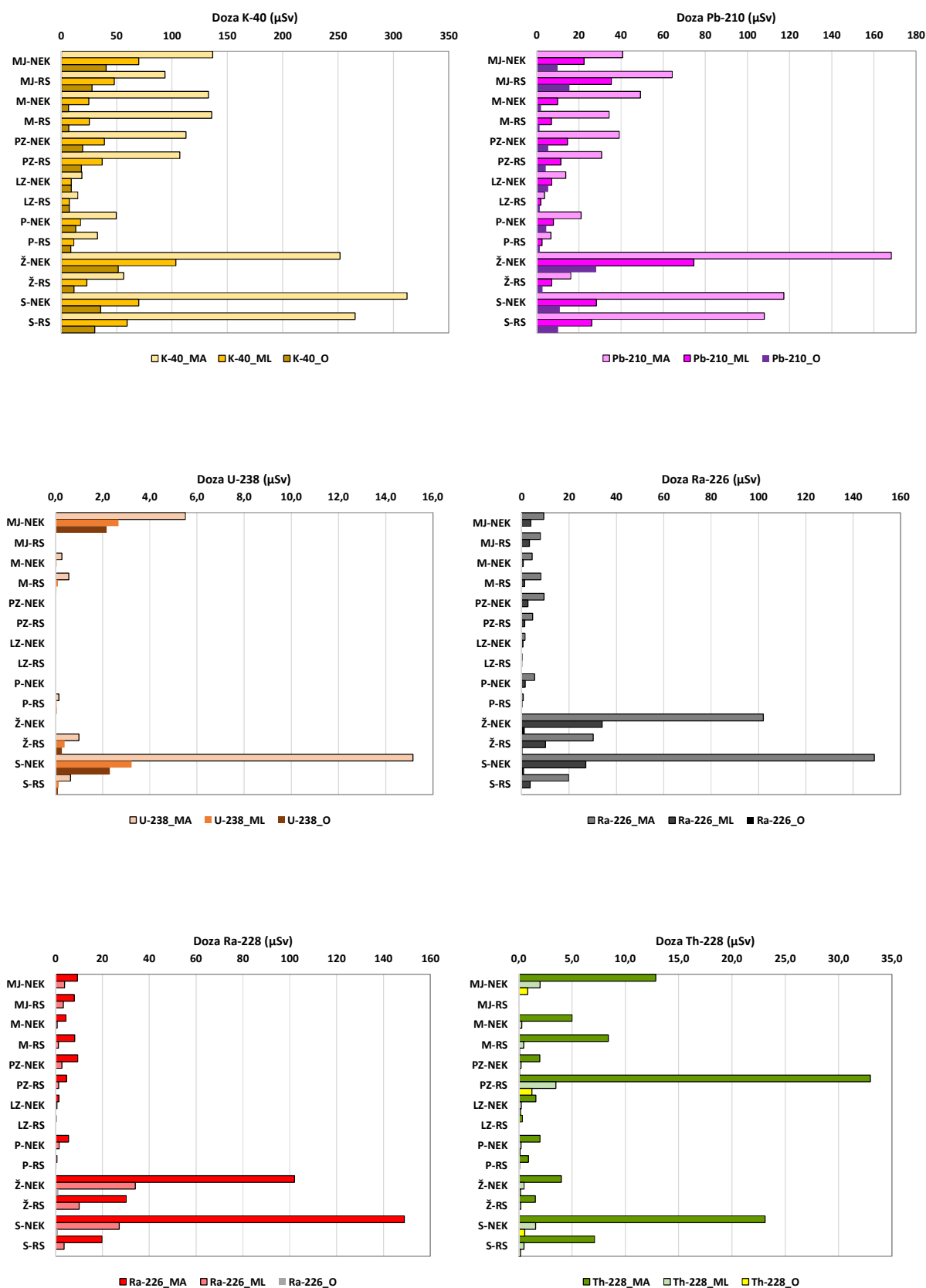
Slika 6.9: Izračunane efektivne doze (μSv) za malčke (MA), mladostnike (ML) in odraslo osebo (O) zaradi Cs-137 in Sr-90 v različnih skupinah živil, vzorčenih v okolici NEK in drugod po Sloveniji. Skupna efektivna doza zaradi Cs-137 in Sr-90 v hrani je bila v okolici NEK v letu 2022 za odraslo referenčno osebo 0,5 μSv (Cs-137: 0,2 μSv , Sr-90: 0,3 μSv), drugod po Sloveniji pa 0,3 μSv (Cs-137: 0,1 μSv , Sr-90: 0,2 μSv). Za malčke v okolici NEK 1,6 μSv (Cs-137: 0,1 μSv , Sr-90: 1,5 μSv) in drugod po Sloveniji 1,5 μSv (Cs-137: 0,1 μSv , Sr-90: 1,4 μSv), za mladostnike v okolici NEK 0,7 μSv (Cs-137: 0,1 μSv , Sr-90: 0,6 μSv) in drugod po Sloveniji 0,5 μSv (Cs-137: 0,1 μSv , Sr-90: 0,4 μSv).

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 2022 v okolici NEK 175 μSv in drugod po Sloveniji 110 μSv , za malčke 1015 μSv in 706 μSv , za mladostnike pa 333 μSv in 211 μSv . 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 μSv na leto na Bq/kg je po podatkih UNSCEAR letna doza, ki jo prejmejo odrasli zaradi K-40 165 μSv , letna doza, ki jo prejmejo otroci, pa 185 μSv . K vnosu K-40 v telo je v letu 2022 največ prispevalo prehranjevanje z žiti in sadjem, najmanj K-40 pa je bilo v listni zelenjavi (slika 6.10).

Skupna letna efektivna doza zaradi Pb-210 v hrani je bila za referenčno odraslo osebo v letu 2022 v okolici NEK 67 μSv in drugod po Sloveniji 37 μSv , za malčke 450 μSv in 264 μSv in za mladostnike 165 μSv in 92 μSv , kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo z referenčno vrednostjo UNSCEAR [40] in meritvami iz preteklih let. Prejeta efektivna doza v okolici NEK zaradi Pb-210 se z leti močno spreminja, od 6,8 μSv v letu 2006 do 67 μSv v letu 2022. 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 [82]. 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 2022 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 2022



Efektivna doza zaradi vsebnosti U-238 v hrani je bila za referenčno odraslo osebo v letu 2022 v okolici NEK 4,5 μSv , drugod po Sloveniji pa 0,5 μSv , za malčke 21 μSv in 2 μSv , za mladostnike pa 6 μSv in 0,7 μSv . K tej dozi je največ prispevalo prehranjevanje z mesom in sadjem (slika 6.10). Efektivna doza zaradi vsebnosti Ra-226 v hrani je bila za referenčno odraslo osebo v okolici NEK 2,7 μSv , drugod po Sloveniji 0,7 μSv , za malčke 281 μSv in 72 μSv , za mladostnike pa 70 μSv in 19 μSv . Zaradi vsebnosti Ra-228 je bila v okolici NEK 9 μSv in drugod po Sloveniji 8,4 μSv , za malčke 190 μSv in 230 μSv , za mladostnike pa 44 μSv in 43 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-232 v hrani v okolici NEK je bila za referenčno odraslo osebo 2 μSv , drugod po Sloveniji pa 1,7 μSv , za malčke 51 μSv (okolica NEK in drugod po Sloveniji), za mladostnike pa 5 μSv (okolica NEK in drugod po Sloveniji), vendar je prispevek Th-232 k skupni efektivni dozi zaradi kratkega razpolovnega časa in izjemno nizkih vsebnosti z biološkega vidika zanemarljiv. K letni dozi, prejeti zaradi Th-232, je največ prispevalo prehranjevanje z mesom in sadjem (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 2022 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 $(17,3 \pm 0,3) \mu\text{Sv}$, v okolici NEK (na razdalji do 1 km od osi reaktorja) $(16,5 \pm 0,9) \mu\text{Sv}$. Ocenjena efektivna doza za okolico NEK je $(16,4 \pm 0,6) \mu\text{Sv}$, 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 $(16,3 \pm 0,1) \mu\text{Sv}$, kar je primerljivo v okviru relativne merske negotovosti (3,4 %) in naravne variabilnosti. Ocenjena doza $(16,3 \mu\text{Sv})$ je prispevek naravnega C-14 in C-14 zaradi jedrskih poskusov v preteklosti, v razmerju 40 % proti 60 % [87]. Ocenjena letna efektivna doza zaradi C-14 iz NEK je $(0,08 \pm 0,06) \mu\text{Sv}$.

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. Iz tega izhaja, da je absolutna vrednost doze zaradi zaužitja C-14 nižja. 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 2022 je bilo opravljenih 31 meritev različnih vrst hrane iz okolice NEK. Zelenjavo, žita in sadje smo vzorčili od junija do oktobra, odvzem mesa in jajc je bil v januarju, marcu in juliju, 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 2022, kjer je bilo opravljenih 21 meritev različnih vrst hrane [14].

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 2022, brez upoštevanja K-40, $85 \mu\text{Sv}$, z upoštevanjem K-40 pa $261 \mu\text{Sv}$. Največji delež k skupni efektivni dozi zaradi zaužitja hrane, brez upoštevanja K-40, prispevajo naravni radionuklidi (99,5 %): Pb-210 (78%), Ra-228 (10,6 %), U-238 (5,2 %), Ra-226 (3,2 %) in Th-228 (2,3 %). Največji delež k celotni dozi $85 \mu\text{Sv}$ je prispevalo prehranjevanje z žiti, sadjem in mesom. Glavni vir vnosa Cs-137 in Sr-90 je bilo v letu 2022 žito, meso in sadje.

Deleža letnih efektivnih doz glede na celotno prejeta efektivno dozo zaradi umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 pri uživanju hrane sta bila 0,2 % in 0,4 % (0,6 % skupne doze), kar je z biološkega vidika zanemarljivo [90]. 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 [81], manj izrazito v gozdnih ekosistemih.

Med detektiranimi radionuklidi v zračnih izpustih NEK so tudi drugi umetni radionuklidi, ki pa jih v hrani v letu 2022 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 2022 v okolici NEK zaradi umetnih radionuklidov glede na celotno efektivno dozo zaradi vseh radionuklidov v hrani 0,5-odstoten, po Sloveniji pa 0,6-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 2022 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 2022 je pokazala, da so koncentracije aktivnosti organsko vezanega tritija v rastlinju (koruza, jabolka) od $(0,8 \pm 0,6) \text{ Bq/L}$ na kontrolni lokaciji v Dobovi do $(28,5 \pm 0,6) \text{ Bq/L}$ 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 2021, interna oznaka 7/2022, Ljubljana, april 2022
- [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, 2016–2022
- [6] Poročilo o meritvah plinastih efluentov v letu 2022, št. poročila 91/2022, 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 2022, URSJV, št. 430-9/2020/2 z dne 16. 3. 2022
- [14] Poročilo o izpostavljenosti prebivalcev Slovenije umetni radioaktivnosti v letu 2022, ZVD, Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20230004-MG, marec 2023
- [15] Poročilo o izvajanju monitoringa radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v obdobju oktober–december 2022, ZVD Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20220018-D-MG, januar 2023
- [16] Poročilo o izvajanju monitoringa radioaktivnosti živil v Republiki Sloveniji v obdobju januar–december 2022 – 3. faza (sklop 1), ZVD Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20220020-3-MP, januar 2023
- [17] Letno poročilo o opravljenih meritvah aktivnosti sevalcev gama in beta, Monitoring radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji za leto 2022, IJS, 2/2023, januar 2023
- [18] Ovrednotenje merskih podatkov o radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v letu 2022, IJS-DP-14269, januar 2023
- [19] Poročilo o meritvah radioaktivnosti pitne vode v letu 2022, št. poročila 67/2022, IJS, oktober 2022
- [20] 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
- [21] I. Krajcar Bronić, Izvješće o mjerjenjima aktivnosti ^{14}C u Savi i ribi tijekom 2022. godine, LNA-4/2023, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 8. 2. 2023



- [22] I. Krajcar Bronić, Izvještaj o mjerenjima aktivnosti ^{14}C u vodi – WMT2 kvartalni uzorci 2022, LNA-7/2023, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 8. 2. 2023
- [23] I. Krajcar Bronić, Ispitni izvještaj o koncentraciji aktivnosti tricija ^3H (OBT) – 2022, št. poročila 017-251/1/2023, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 12. 1. 2023
- [24] 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
- [25] Izpostavitve prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NE Krško v reko Savo, IJS-DP-8801 (2003)
- [26] Izpostavitve referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo – Nova referenčna lokacija, IJS-DP-10114 (2009)
- [27] Samo Škrlec, Hidroelektrarne na Spodnji Savi, d.o.o., sporočilo po elektronski pošti, 9. 4. 2020
- [28] *Dose calculation and dilution modelling of run-of-river Brežice hydro plant accumulation* št. TO.RZ-5/2020
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 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
- [32] 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
- [33] M. Mihalina, *Vpliv tekočinskih izpustov NE Krško na najbolj izpostavljeno skupino*, Poročilo številka NEK ESD-TR-05/08, Rev. 0, maj 2008
- [34] 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
- [35] PARTNER, d.o.o., Poročilo o izvedenih batimetričnih meritvah pretočne akumulacije HE Brežice, april 2021
- [36] R. Rajar, Verifikacija numeričnega modela PCFLOW3D, julij 2021
- [37] ICRP Publication 124, Protection of the Environment under Different Exposure Situations, Ann. ICRP 43(1), 2014
- [38] 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
- [39] IAEA Safety Guide 427, Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities, Draft safety guide DS427, 2016
- [40] 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
- [41] 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
- [42] ISO/IEC Guide 98-3 2008 - Uncertainty of measurement -- Part 3, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM, 1995)



- [43] 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
- [44] C. Kunz, Carbon-14 discharges at three light-water reactors, *Health Physics*, 49 (1985), 25–35
- [45] Delavnica z naslovom C-4 u okolišu (C-14 v okolju), organizirana na IJS dne 9. 12. 2015, predavateljici: I. Krajcar Bronić in J. Barešić
- [46] T. Petrovič, Določitev referenčnih aktivnosti radionuklida K-40 v različnih vzorcih, magistrsko delo, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana, avgust 2010
- [47] A. Kovačič et al., Strokovne podlage za razglasitev ogroženosti podzemne vode v Republiki Sloveniji, 2002
- [48] <https://www.kostak.si/images/1-2022/voda2021.pdf>
- [49] <https://www.komunala-brezice.si/datoteke/navigacija/zu7qah12-porocilo-o-kakovosti-2021.pdf>
- [50] https://www.vokasnaga.si/sites/www.jhl.si/files/dokumenti/voka_snaga_letno_porocilo_2021_s_pdpisi_010422.pdf
- [51] R. Jamnik, Matematična statistika, Državna založba Slovenije, 1980
- [52] M. Yoshimori, Production and behavior of beryllium 7 radionuclide in the upper atmosphere, *Advances in Space Research*, 36 (2005), 922–926
- [53] 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
- [54] 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
- [55] 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
- [56] 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
- [57] 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
- [58] 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 threshold for radioactivity measurements in the environment, *Journal of Environmental Radioactivity*, 158–159 (2016), 119–128
- [59] S. Širca, *Verjetnost v fiziki*, DMFA – založništvo, Ljubljana 2016
- [60] 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
- [61] 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



- [62] Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom)
- [63] 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
- [64] Povprečna mesečna koncentracija delcev PM₁₀ v letu 2013, ARSO, januar 2014, http://www.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/podatki/PM10_dec013_slo.pdf
- [65] 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.
- [66] A. Volčanšek, komunikacija po elektronski pošti dne 3. 4. 2018
- [67] 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
- [68] 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
- [69] A. Likar, T. Vidmar, B. Pucelj, Monte Carlo Determination of Gamma-ray Dose Rate with the GEANT System, *Health Physics*, 75 (1998), 165–169
- [70] Matjaž Korun, osebno sporočilo, 2003
- [71] 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
- [72] 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
- [73] T. Sato, Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes, *PLOS ONE*, 11(8): e0160390 (2016)
- [74] 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)
- [75] Program EXPACS, <http://phits.jaea.go.jp/expacs/>
- [76] FRMAC, Assessment manual Tables, Charts, Worksheets, Glossary, references, Volume 2, SAND2003-1072P, Table 3.5
- [77] 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
- [78] F. W. Whicker, Radionuclide transport processes in terrestrial ecosystems. *Radiation research*, 94 (1983), 135–150
- [79] 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
- [80] 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
- [81] P. Zakrajšek, Vsebnost kovin in radionuklidov v gobah na izbranih področjih v Sloveniji, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta, Biotehniška fakulteta, 2014
- [82] 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



- [83] M. Gregorič, U. Blaznik, N. Delfar, M. Zaletel, D. Lavtar, B. Koroušić Seljak, P. Golja, K. Zdešar Kotnik, I. Pravst, N. Fidler Mis, S. Kostanjevec, M. Pajnkihar, T. Poklar Vatovec, A. Hočevvar 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
- [84] U. Blaznik, M. Gregorič, N. Delfar, M. Zaletel, D. Lavtar, B. Koroušić Seljak, N. Fidler Mis, P. Golja, K. Zdešar Kotnik, I. Pravst, A. Hočevvar 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
- [85] 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
- [86] <https://www.r-project.org/>
- [87] <https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-14>
- [88] ARSO podatki, <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>, 2022
- [89] Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, Državna pregledna karta Republike Slovenije DPK250 1: 250000 – 2005
- [90] J. F. Diehl, Radioactivity in food, *Encycl. Food Sci. Nutr.*, Academic Press, 2003, 4903–4911, doi:10.1016/b0-12-227055-x/00997-4
- [91] Program za računanje efektivnih doz zaradi tekočinskih izpustov iz NEK, verzija 3.0, IJS 9/2023
- [92] ICRP Publication 108, Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants, *Ann. ICRP* 38 (4-6), 2008

