

NADZOR RADIOAKTIVNOSTI V OKOLICI NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

Poročilo za leto 2020

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvaška

Nuklearna elektrarna Krško, Krško, Slovenija

Zavod za varstvo pri delu, Ljubljana, Slovenija

MEIS storitve za okolje, Mali Vrh pri Šmarju, Slovenija

VSEBINA

Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13463

Izvajalci meritev	P-3 / P-76
Letno poročilo	P-5 / P-76
Uvod in upravne podlage	P-7 / P-76
Povzetek / Short abstract	P-11 / P-76
Izvleček / Summary	P-19 / P-76
 Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev	 P-69/ P-76

POGLAVJE

AVTORJI

Poročilo

mag. Denis Glavič - Cindro
doc. dr. Benjamin Zorko
Klara Poiškruh, dipl. inž. fiz.

Povzetek in angleški prevod povzetka

doc. dr. Benjamin Zorko

Izvleček in angleški prevod izvlečka

doc. dr. Benjamin Zorko

Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev

mag. Denis Glavič – Cindro

Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji ISBN 978-961-264-211-2

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 rečni vodi, sedimentih in ribah

mag. Matjaž Stepšnik, 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

dr. Matjaž Korun, IJS

Radionuklidi v hrani

prof. dr. Katarina Vogel Mikuš, BF

Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462

Imisijske meritve (meritve v okolju jedrske elektrarne)

Obratovalni nadzor radioaktivnosti v okolici NEK

Tabele merskih rezultatov

M-1 / M-130

Obratovalni nadzor radioaktivnosti v okolici NEK zaradi HE Brežice

Tabele merskih rezultatov

M-89 / M-130

Tabele interkomparacijskih rezultatov

Mednarodne primerjalne meritve izvajalcev

M-101 / M-130

Poročilo Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462 je na priloženi zgoščenki.

Vzdrževanje pripravljenosti izrednega monitoringa radioaktivnosti

Redna letna obhoda okolice NEK v letu 2020 sta bila izvedena 24. 8.–26. 8. 2020 in 5. 10.–7. 10. 2020:

Poročilo o obhodu mobilnih enot ZVD in IJS v okolici NEK – vzdrževanje pripravljenosti za primer izrednega dogodka, LMSAR-62/2020-GO, revizija 1, september 2020

ROMENEK 2/20, Mobilni radiološki laboratorij, Poročilo o meritvah po programu vzdrževanja pripravljenosti za primer izrednega dogodka v NEK, IJS-DP-13349, izdaja 1, november 2020

Obe poročili o vzdrževanju pripravljenosti za primer izrednega dogodka sta na priloženi zgoščenki.

NADZOR RADIOAKTIVNOSTI V OKOLICI NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

Poročilo za leto 2020



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 2020

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 2020, IJS-DP-13462*, 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 uredila: mag. Denis Glavič - Cindro

Fotografije: mag. Denis Glavič – Cindro, arhiv IJS

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

Založil: Institut "Jožef Stefan"

Prva izdaja: april 2021

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

Pogodba št.: Pogodba št. 3200014 (Z-8191605), Obratovalni monitoring radioaktivnosti v okolici NEK
z dne 3. 2. 2020

Št. delovnega poročila: IJS-DP-13463

Redakcija je bila končana aprila 2021.

Vse pravice pridržane. Noben del poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020* ter obeh prilog k poročilu: *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji in Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462* 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: 55 izvodov



NASLOV:

Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško

IJS-DP-13463

april 2021

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 skupina 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 posameznika (referenčna oseba) zaradi emisij jedrske elektrarne dajejo v letu 2020 za atmosferske emisije *efektivno dozo* 5,8 E-5 mSv na leto, kar velja za ograjo NEK in okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja, ter 1,35 E-5 mSv na leto za tekočinske emisije za referenčno skupino prebivalstva. V letu 2020 so bili tako vsi sevalni učinki NEK na prebivalstvo v okolici ocenjeni na manj kot 7,14 E-5 mSv na leto, kar je 0,14 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in dlje (0,05 mSv; vsota prispevkov po vseh prenosnih poteh). Iz meritev so bile ocenjene tudi izpostavitve naravnemu sevanju in prispevki zaradi splošne radioaktivne onesnaženosti okolja, ki so jo povzročile poskusne jedrske eksplozije in jedrske nesreče. ***Ocenjena vrednost sevalnih učinkov (letne učinkovite doze) NEK na prebivalstvo ob ograji NEK je približno 0,003 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja. Ocena velja okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja.***

TITLE:

Off-site radiological monitoring of the Krško Nuclear Power Plant

IJS-DP-13463

April 2021

KEYWORDS:

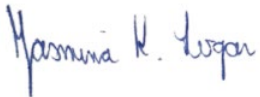
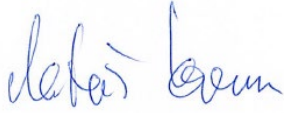
reported measurement results, radioactive contamination of the environment, airborne and liquid radioactive effluents, man-made and natural occurring radionuclides, specific activities, surface waters, underground water, tap water, rainwater, dry and ground deposition, airborne radionuclides, soil, foodstuffs,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

SHORT ABSTRACT:

Summarised results of radioactivity measurements of antropogenic and naturally occurring radionuclides by different contamination media and exposure pathways are presented in the form of assessed effective doses. The Conservatively estimated effective dose received by representative (reference) person as the result of Krško NPP emissions in the year 2020 gives a value of the *effective dose* of 5.8 E-5 mSv per year for atmospheric discharges at the Krško NPP fence (approximately applicable also at a distance of 500 m from the axis of the reactor), and 1.35 E-5 mSv per year for liquid discharges received by reference person. Thus, in 2020, the radiation effects of the Krško NPP on the population in the immediate surroundings were estimated at less than 7.14 E-5 mSv per year, representing 0.14 % of the authorized dose limit at the border of the Krško NPP exclusion area (0,05 mSv: the sum of the contributions from all exposure pathways). The exposure to the natural radiation and to the global radioactive contamination due to the nuclear test explosions and nuclear accidents were assessed from the measurements. ***The estimated sum of all radiation contributions (annual effective doses) from the Krško NPP to the representative (reference) person at the Krško NPP fence is 0.003 % 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.***



AVTORJI IN RECENZENTI POROČILA

	Ime in priimek	Datum in podpis
Povzetek in izvleček	doc. dr. Benjamin Zorko, IJS	
Neodvisni nadzor pooblaščenih izvajalcev	mag. Denis Glavič – Cindro, IJS	
Radioaktivnost v rečni vodi, sedimentih in ribah	mag. Matjaž Stepišnik, 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	dr. Matjaž Korun, IJS	
Radionuklidi v hrani	prof. dr. Katarina Vogel Mikuš, BF	
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 F2)

D. Brodnik, 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. M. Korun, dr. J. Kožar Logar, dr. R. Krištof, dr. M. Nečemer, P. Prem, prof. biol., dr. T. Petrovič, K. Poiškruh, dipl. inž. fiz., R. Roš Opaškar, mag. B. Vodenik, doc. dr. B. Zorko

Odsek za znanosti o okolju (Odsek O2)

B. Svetek, inž. kem. tehnol., dr. M. Štok, Z. Trkov, inž. kem. tehnol.

ZAVOD ZA VARSTVO PRI DELU (ZVD), LJUBLJANA

Koordinator projekta za ZVD: dr. Gregor Omahen

Izvajalci na ZVD:

dr. M. Giacomelli, A. Ivanc, P. Jovanovič, inž. fiz., D. Konda, M. Levstek, dr. G. Omahen, L. Peršin, M. Podvratnik, univ.dipl.fiz. in mag.med.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):

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 radioaktivosti – 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

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, DEPOZICIJSKIH TER KOEFICIENTOV SEVANJA IZ OBLAKA PO LAGRANGEVEM MODELU DELCEV, 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 št. 3200014 (Z-8191605) z dne 3. 2. 2020 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 *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji*, kjer so ocene doz in drugi parametri obravnavani podrobno. Za potrebe poročila pa v strnjeni obliki podajamo ugotovitve za leto 2020.

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 27/2018, 5. 5. 2018) [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) za leti 2020–2021 v Republiki Sloveniji*, NEK, TS št. TO.RZ, 16/2019, in dodatno v *Radiological Effluent Technical Specifications (RETS)*, NEK-RETS, Rev. 10, poglavje 3.12, strani 45–62.

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 evalvacijo merskih podatkov in oceno doznih obremenitev so bili kot dopolnilni ali vzporedni podatki uporabljeni tudi:

- NEK: letno in mesečna poročila o tekočinskih in zračnih emisijah v letu 2020;
- Agencija Republike Slovenije za okolje: meteorološki podatki za okolico NEK v letu 2020;
- MEIS storitve za okolje, d. o. o.: mesečni izračuni zračnih razredčitvenih in depozicijskih faktorjev ter koeficientov sevanja iz oblaka za okolico NEK v letu 2020;
- 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 prebivalstva v okolici objektov. Po drugi strani pa z neposrednimi meritvami ugotavljamo vnos radioaktivnih snovi v okolje, kar omogoča neposredno oceno izpostavljenosti prebivalstva. Slednje meritve omogočajo tudi oceno izpostavljenosti prebivalstva naravnemu sevanju in vplivom širšega okolja, kot so bile jedrske eksplozije in nesreče.

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 črpaljš. Vzorci hrane, ki so pridelani v okolici elektrarne in v katerih se meri vsebnost radionuklidov, so izbrani tako, da se lahko oceni celotni prispevek radioaktivnosti hrane k dozi. Poleg tega se določa še vsebnost radionuklidov v zemlji.

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



Institut "Jožef Stefan" (IJS) in Zavod za varstvo pri delu (ZVD) sta pooblaščenca za izvajanje merilnega nadzora radioaktivnosti na podlagi 159. člena Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-1, Ur. l. RS, št. 76/17 in 26/19) ter 8. in 10. člena Pravilnika o monitoringu radioaktivnosti (JV10, Ur. l. RS, št. 27/18) s pooblastiloma 35400-3/2019/8 z dne 28. 5. 2019 (IJS) in 35400-1/2019/4 z dne 15. 2. 2019 (ZVD), ki ju je izdala Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost (URSJV) 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 35400-12/2020/4 z dne 22. 5. 2020, 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) [11] zahteva, da morajo poročilo o ocenah doz za posamezne značilne in referenčne osebe izdelati pooblaščenca izvedenci varstva pred sevanji.

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

- dr. Marka Giacomellija z odločbo 1864-15/2019-3 z dne 16. 10. 2019;
- mag. Denis Glavič - Cindro z odločbo 1864-25/2017-3 z dne 4. 12. 2017;
- mag. Matjaža Koželja z odločbo 1864-5/2018-4 z dne 16. 4. 2018;
- prof. dr. Mateja Lipoglavška z odločbo 1864-9/2016-3 z dne 20. 7. 2016;
- dr. Gregorja Omahna z odločbo 1864-17/2011-3 z dne 10. 8. 2011 in 1864-11/2016-3 z dne 20. 7. 2016;
- mag. Matjaža Stepišnika z odločbo 1864-16/2017-3 z dne 2. 8. 2017 ter
- doc. dr. Benjamina Zorka z odločbo 1864-9/2018-5 z dne 1. 2. 2019.

Institut "Jožef Stefan" (IJS), Ljubljana, je z odločbo URSVS št. 1864-2/2017-5 z dne 30. 3. 2017 na podlagi 30. člena Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Ur. l. RS, št. 102/04 – ZVISJV-UPB2, Ur. l. RS št. 70/08 – ZVO-1B in Ur. l. RS št. 60/11 – ZVISJV-C) ter 11. člena Pravilnika o pooblašcanju izvajalcev strokovnih nalog s področja ionizirajočih sevanj (Ur. l. RS, št. 18/04) pooblaščen kot izvajalec dozimetrije za ugotavljanje izpostavljenosti zunanjemu obsevanju in podajanje strokovnih mnenj, ki temeljijo na meritvah in/ali izračunih na podlagi termoluminiscenčne dozimetrije sevanja gama, sevanja beta in rentgenske svetlobe.

Institut "Jožef Stefan" (IJS), Ljubljana, je s pooblastilom št. 1864-7/2017-3 z dne 21. 9. 2017, ki ga je izdala URSVS na podlagi 27. člena Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Ur. l. RS, št. 102/04 – ZVISJV-UPB2, Ur. l. RS št. 70/08 – ZVO-1B in Ur. l. RS št. 60/11 – ZVISJV-C) ter 6. člena Pravilnika o pooblašcanju izvajalcev strokovnih nalog s področja ionizirajočih sevanj (Ur. l. RS, št. 18/04), pooblaščen kot izvedenec varstva pred sevanji za podajanje strokovnih mnenj, ki temeljijo na meritvah in/ali izračunih, in za izvajanje nadzornih meritev na nadzorovanih in opazovanih območjih, pregledov virov sevanja in osebne varovalne opreme.

Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost je z odločbo št. 3571-3/2017/2 z dne 6. 3. 2017 pooblastila Institut "Jožef Stefan" za izvajanje del pooblaščenega izvedenca za sevalno in jedrsko varnost na področju izdelave varnostnih poročil in druge dokumentacije v zvezi s sevalno in jedrsko varnostjo za ocenjevanje vplivov jedrskih in sevalnih objektov na okolje.

Institut "Jožef Stefan" ima izdelan sistem zagotovitve kakovosti. Sistem 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 poslovník sklicuje. Laboratorij za meritve radioaktivnosti je akreditiran pri Slovenski akreditaciji za meritve sevalcev gama v trdnih in tekočih vzorcih, Laboratorij za termoluminiscenčno 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 in za neposredne meritve površinske kontaminacije s sevalci alfa, beta in z nizkoenergijskimi sevalci gama. Laboratorij za tekočinsko-scintilacijsko spektrometrijo je akreditiran za določanje tritija v vzorcih vode po direktni metodi in po metodi z elektrolitsko obogatitvijo ter za določevanje 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 o okolju, v okviru katerega deluje Laboratorij za radiokemijo, ima ravno tako izdelan sistem kakovosti, 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 17025:2007 pod zaporedno številko 1162 za določanje vsebnosti radionuklidov z visokoločljivostno spektrometrijo gama in za določanje vsebnosti Sr-90 po radiokemijski metodi v vzorcih iz okolja in proizvodih, vključno s hrano in pitno vodo, ter za določanje vsebnosti Fe-55 v vodnih vzorcih.

Zavod za varstvo pri delu ima delujoč sistem zagotovitve 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.





POVZETEK

To poročilo podaja rezultate nadzora radioaktivnosti, ki so ga NEK kot zavezanec in pooblaščen izvajalec nadzora radioaktivnosti (Institut »Jožef Stefan«, Zavod za varstvo pri delu, Institut Ruđer Bošković in MEIS, d.o.o.) opravili v letu 2020. Sumarni rezultati meritev radioaktivnosti umetnih in naravnih radionuklidov v različnih nadzorovanih medijih in ekspozicijskih prenosnih poteh so podani z ocenami efektivnih doz, ki so predstavljene v izvlečku v poglavju "OCENA UČINKOV" (tabeli D in E). Ocena letnih efektivnih doz sledi metodologiji ICRP in IAEA [25], [26], [27] in je izdelana v skladu s slovensko zakonodajo. Ko seštejemo vrednosti za atmosferske in tekočinske izpuste, ugotovimo, da je učinek nadzorovanih izpustov iz NEK na prebivalstvo znatno pod avtorizirano mejo 0,05 mSv (po vseh prenosnih poteh).

Če povzamemo izsledke poglavij v monografiji *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji* (ISBN 978-961-264-211-2), 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. Prebivalstvo v okolici NEK je, tako kot drugod po Sloveniji, izpostavljeno naravnim virom ionizirajočega sevanja, kontaminaciji okolja z umetnimi radioaktivnimi snovmi (globalno onesnaženje), potencialno pa še ionizirajočemu sevanju, ki je posledica nadzorovanih zračnih in tekočinskih izpustov iz elektrarne ter neposrednemu sevanju iz objektov znotraj ograje.

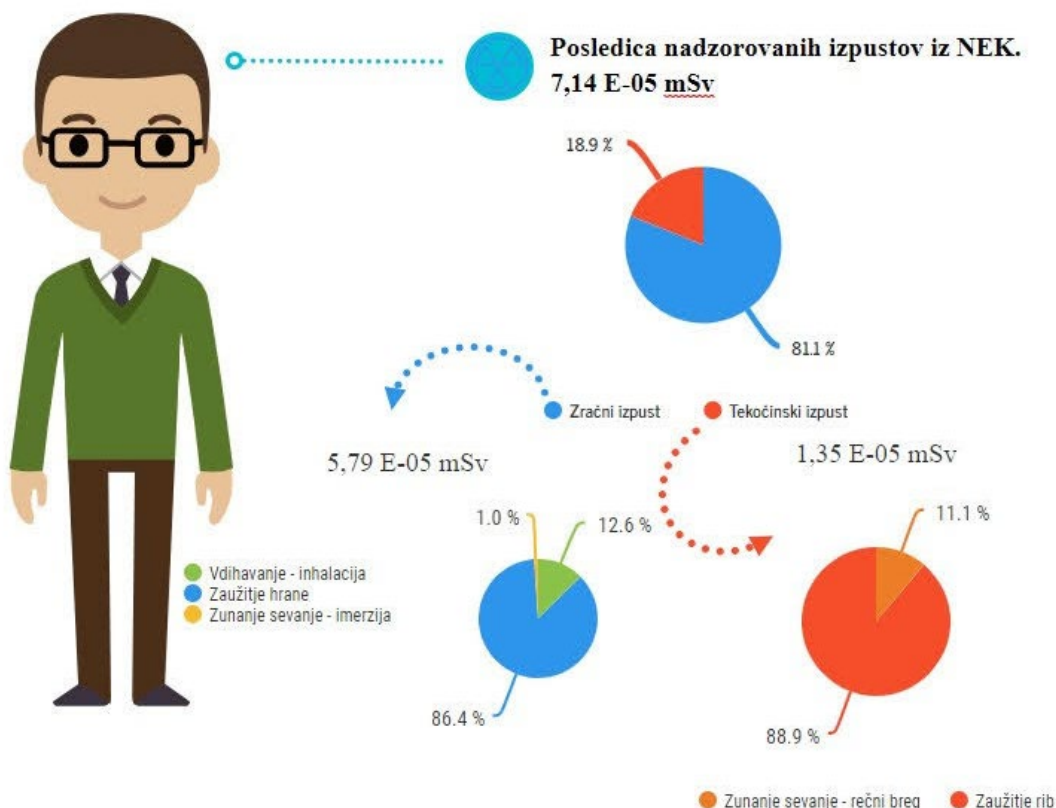
Vsi sevalni učinki NEK na prebivalstvo so tako v okolici ocenjeni na manj kot $7,14 \text{ E-5 mSv}$ na leto, kar je 0,14 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in navzven. Pri tem je treba poudariti, da gre za različne skupine prebivalstva in je zato seštevek učinkov zračnih in tekočinskih izpustov iz NEK samo groba ocena letne efektivne doze. Seštevek vseh prispevkov sevalnih učinkov je drugi najnižji v zadnjih 31-ih letih. Nizke vrednosti lahko pripišemo majhnim nadzorovanim izpustom iz NEK (kvalitetno gorivo) in dejstvu, da v letu 2020 ni bilo rednega remonta. Zasluge za nizke učinke jedrske elektrarne grede tudi zaposlenim v NEK, ki zgleđno skrbijo za nadzor in omejevanje izpustov.

Za atmosferske emisije je bila ocenjena efektivna doza $5,8 \text{ E-5 mSv}$ na leto, kar velja za ograjo NEK in okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja. Za tekočinske emisije za referenčno skupino prebivalstva je bila ocenjena efektivna doza $1,35 \text{ E-5 mSv}$ na leto.

V nadzoru radioaktivnosti v okolju smo med radionuklidi zaznali H-3 in C-14, ki sta med izpusti iz NEK, prav tako pa sta tudi del vodnega kroga in globalnega onesnaženja z jedrskimi poskusi v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Tako smo H-3 zaznali v reki Savi, padavinah in vodi iz črpališč, ki ga lahko pripišemo tudi izpustom iz NEK. Radionuklid C-14 smo zaznali v hrani in manjši del (0,33 %) celotne vsebnosti v hrani pripisujemo zračnim izpustom iz NEK. K celotni efektivni dozi največ prispeva zaužitje hrane (86,9 %), k čemur največ prispeva C-14. Efektivna doza zaradi vdihavanja prispeva k celotni efektivni dozi 10,2 %, med radionuklidi je največ prispeval H-3. Efektivna doza zunanega sevanja k celotni efektivni dozi prispeva 2,9 %. Med radionuklidi največ prispeval Co-60 iz tekočinskih izpustov. Na sliki P1 so prikazani prispevki k letni efektivni dozi za leto 2020 po medijih za vse umetne radionuklide, ki jo prejme prebivalstvo (odrasli) iz najbližjih naselij, oziroma referenčnih lokacij.

Sevalnim učinkom NEK tako največ prispeva zaužitje hrane zaradi C-14, 5 E-5 mSv na leto. 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. Pri izračunu doze, prejete zaradi C-14 v okolici NEK, smo konzervativno privzeli, da prebivalci uživajo hrano iz neposredne bližine NEK (blizu roba 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 Bq na kilogram ogljika) v raznih vrstah živil ne razlikujejo.

Drugi največji prispevek k celotni letni efektivni dozi za odraslo osebo je posledica tekočinskih izpustov v reko Savo. Izračunana efektivna doza za odraslo referenčno osebo 350 m nizvodno od jezua NEK je $1,35 \text{ E-5 mSv}$ (zadrževanje na obrežju in uživanje rib). Tako nizke ocenjene vrednosti potrjujejo tudi rezultati meritev C-14 v ribah, kjer prispevka NEK statistično ni bilo mogoče ločiti od naravnega ozadja. Pregled ocenjenih doz zaradi tekočinskih izpustov iz NEK na lokacijah nizvodno od jezua NEK so na sliki P2.



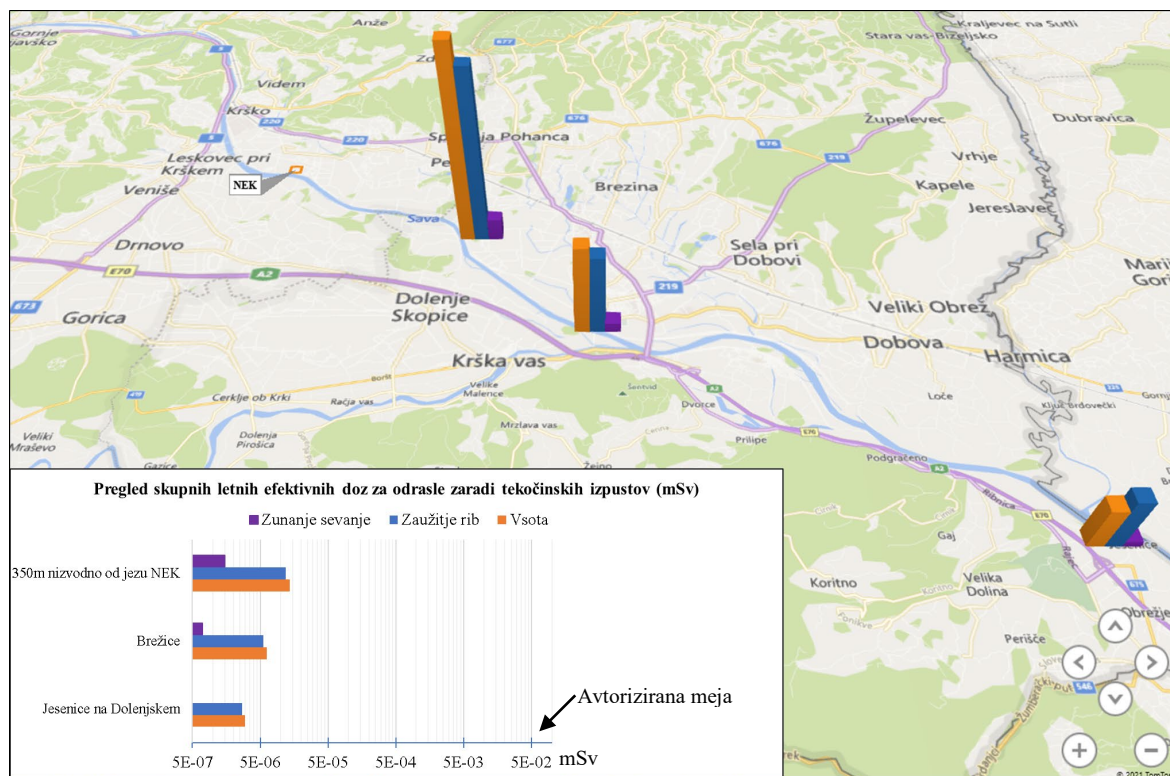
Slika P1: pregled ocenjenih letnih efektivnih doz za umetne radionuklide v okviru nadzora radioaktivnosti v okolju v okolici NEK v letu 2020

Prispevek vdihavanja plinov in aerosolov, ki so posledica zračnih izpustov iz NEK, je tretji najpomembnejši prispevek, ki je $7,3 \text{ E-}6 \text{ mSv}$. K tej oceni največ prispevajo izpusti tritija v obliki vodne molekule (HTO). Pregled ocenjenih doz zaradi zračnih izpustov iz NEK na lokacijah v bližini NEK so na sliki P3. Kot smo že omenili, je učinek nadzorovanih izpustov iz NEK po vseh prenosnih poteh na prebivalstvo znatno pod avtorizirano mejo $0,05 \text{ mSv}$.

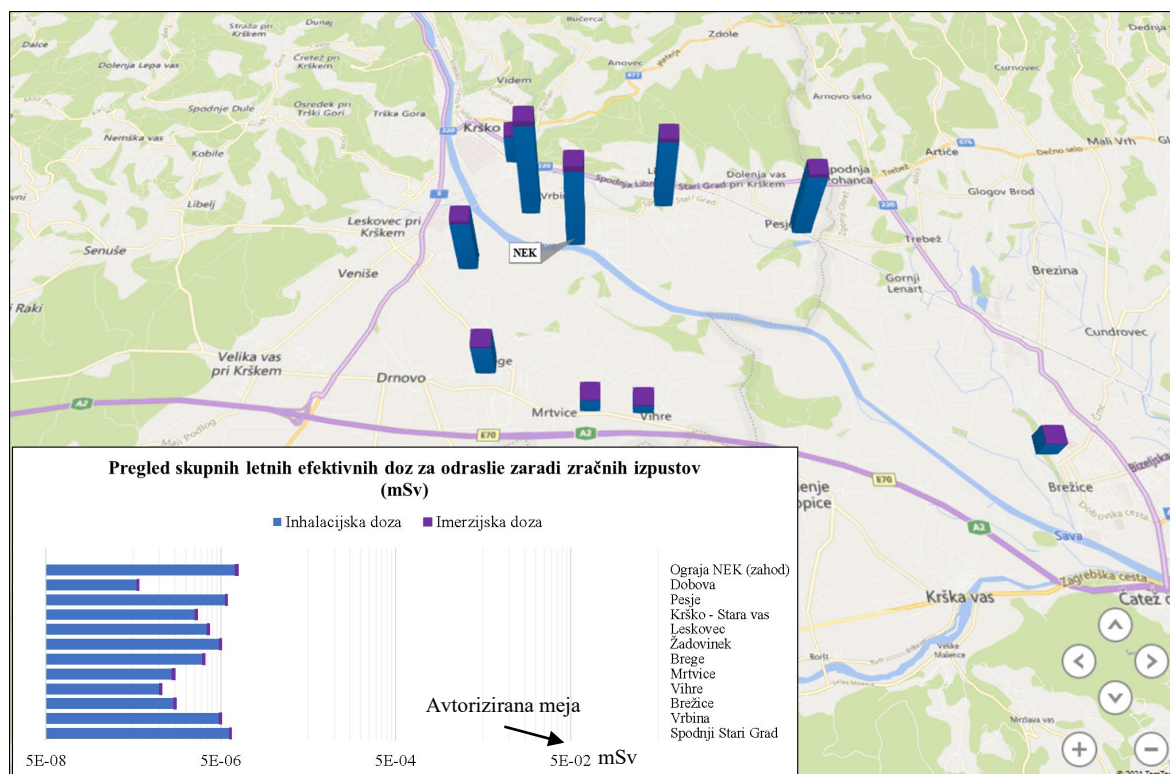
Zunanje sevanje iz objektov je nedoločljivo iz meritev s termoluminiscenčnimi dozimetri. Za zunanje sevanje izpustov smo konzervativno ocenili, da le ti prispevajo celotno efektivno dozo $1 \text{ E-}14 \text{ mSv}$.

Poleg radioaktivnih izotopov vodika in ogljika smo v vzorcih iz okolja (rečna voda, padavine, zrak, hrana, zunanje sevanje) zaznali še Sr-90 in Cs-137, ki izvirata iz globalnega onesnaženja zaradi nesreče v jedrskem reaktorju v Černobilu. Čeprav sta oba radionuklida v izpustih iz NEK, sta prispevka v okolju zanemarljiva in neločljiva od globalnega onesnaženja.

Občutljive spektrometerske naprave zaznavajo tudi naravne radionuklide, na podlagi česar lahko ugotavljamo naravno sevanje, ki je značilno za Slovenijo. V letu 2020 je to bilo $2,39 \text{ mSv}$.



Slika P2: Pregled ocenjenih letnih efektivnih doz za umetne radionuklide za tekočinske izpuste iz NEK v letu 2020



Slika P3: Pregled ocenjenih letnih efektivnih doz za umetne radionuklide za zračne izpuste v okolici NEK v letu 2020





SHORT ABSTRACT

This report contains the results of radioactivity monitoring performed by the Krško NPP as a liable party and authorized providers of radioactivity monitoring (Jožef Stefan Institute, Institute for Occupational Safety, Ruđer Bošković Institute and MEIS, doo) in 2020. Summary results of radioactivity measurements of artificial and natural radionuclides in various media and exposure pathways are given by estimates of effective doses, which are presented in the Summary in the chapter "DOSE ESTIMATE" (Tables D and E). Estimation of annual effective doses follows the ICRP and IAEA methodology [25], [26], [27]. From the results of measurements and dose estimates in 2020, we can conclude that the reference adult at the edge of the exclusion zone (500 m from the reactor axis) and beyond received an annual effective dose lower than 0.05 mSv (authorized annual effective dose of contributions of all exposure pathways).

The population in the vicinity of the Krško NPP, like people elsewhere in Slovenia, is exposed to natural sources of ionizing radiation, global contamination with antropogenic radioactivity, and potentially ionizing radiation resulting from atmospheric and liquid discharges from power plants and direct radiation from buildings. inside the fence perimeter. All radiation effects of the Krško NPP on the population are estimated at less than 7.14 E-5 mSv per year in the vicinity, which is 0.14 % of the authorized annual limit dose at the edge of the exclusion zone and beyond.

It should be emphasized that the total effective dose estimate is a sum of contributions from different reference populations, therefore the sum of the effects of air and liquid discharges from the Krško NPP is only a rough estimate of the annual effective dose. The sum of all contributions of radiation effects is the second lowest in the last 31 years. The low values can be attributed to small discharges from the Krško NPP (fuel quality) and the fact that in 2020 there were no regular refuelling outage. The credit for low discharges from the NPP also goes to the Krško NPP employees, who take exemplary care of controlling and limiting the emissions from the facility.

For atmospheric emissions, the effective dose of 5.8 E-5 mSv per year was estimated, which applies to the Krško NPP fence and approximately also to the distance of 500 m from the reactor axis. For liquid discharges, it was estimated that the reference adult received the dose of 1.35 E-5 mSv per year.

In the scope of environmental radioactivity monitoring programme in the vicinity of the Krško NPP, we detected H-3 and C-14 among radionuclides, which are found in the discharges from the nuclear power plant. Both radionuclides are also part of the water cycle and global contamination from nuclear tests in the 1960s. Thus, H-3 was detected in the Sava River, precipitation and water from waterworks, which can also be attributed to discharges from the Krško NPP. The radionuclide C-14 was detected in food and a smaller part (0.33 %) of the total content in food is attributed to air discharges from the Krško NPP. Food intake (86.9 %) contributes the most to the total effective dose, with C-14 contributing the most. The effective dose due to inhalation contributes to the total effective dose of 10.2 %, with H-3 contributing the most among radionuclides. The effective dose of external radiation contributes 2.9 % to the total effective dose. Among radionuclides, Co-60 contributed the most from liquid discharges. Figure P1 shows the contributions to the annual effective dose for 2020 by the media for all artificial radionuclides received by the population (adults) from the nearest settlements or reference locations.

Food consumption due to C-14 contributes 5 E-5 mSv per year to the total annual effective dose, which is the major contribution from the radiation effects of the Krško NPP. These are atmospheric discharges from the Krško NPP, which contaminate plants. The results of the measurements show the expected slight increase in the specific activity of C-14 in the samples at a distance of up to 1 km from the reactor axis compared to the samples taken at the reference point in Dobova. When calculating the dose received due to C-14 in the vicinity of the Krško NPP, we conservatively assumed that residents consume food from the immediate vicinity of the Krško NPP (near the edge of the exclusion zone) two months a year and food from elsewhere (for instance reference point: Dobova) ten months a year. The effective dose resulting C-14 refers to the food and not to the individual type of food, as the specific activities of C-14 (in Bq per kilogram of carbon) do not differ in different types of food.

The second-largest contribution to the total annual effective dose for an adult is liquid discharges into the Sava River. The calculated effective dose for an adult reference person 350 m downstream under the Krško NPP dam is 1.35 E-5 mSv (the main exposure patwas: staying on the shore of the river, fish consumption).



Such low estimated values are also substantiated by measurement results of C-14 in fish, where the contribution of the Krško NPP could not be statistically separated from the natural background. An overview of the estimated effective doses due to liquid discharges from the Krško NPP at the locations downstream of the Krško NPP dam is shown in Figure P2.

The contribution of inhalation of gases and aerosols resulting from air emissions from the Krško NPP is the third most important contribution, which is $7,3 \text{ E-6 mSv}$. Tritium emissions in the form of a water molecule (HTO) contribute the most to this estimate. An overview of the estimated effective doses due to atmospheric discharges from the Krško NPP at locations in the vicinity of the Krško NPP is shown in Figure P3. As already mentioned, the radiation effect of the discharges from the Krško NPP by all exposure pathways on the population is significantly below the authorized limit of 0.05 mSv .

External radiation from buildings on-site is indeterminate from measurements with thermoluminescent dosimeters. For external radiation of emissions, we conservatively estimated that they contribute to the total effective dose of 1E-14 mSv .

Besides radioactive isotopes of hydrogen and carbon, we detected Sr-90 and Cs-137 in environmental samples (river water, precipitation, air, food, external radiation), which originate from global contamination due to the accident at the Chernobyl nuclear reactor. Although they are measured at small quantities in atmospheric and liquid effluents from the Krško NPP, their contributions to the annual effective dose are negligible and inseparable from global contamination.

Thus, the estimated value of radiation effects (annual effective doses) of the Krško NPP on the population at the Krško NPP fence and approximately at a distance of 500 m from the reactor axis is approximately 0.003% of the typical unavoidable natural background (2.39 mSv). The report does not address the exposure of the population to ionizing radiation due to medical diagnostic tests, which are the second most important source of exposure in the developed world and also in Slovenia.

Review of estimated annual effective doses for all artificial radionuclides

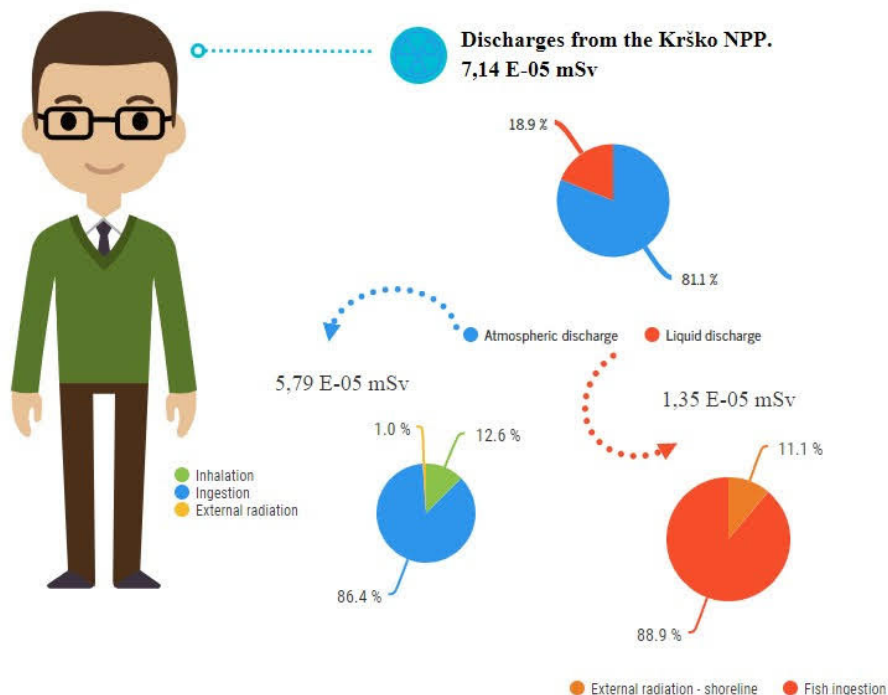


Figure P1: Review of estimated annual effective doses for artificial radionuclides in the framework of environmental radioactivity monitoring in the vicinity of the Krško NPP in 2020

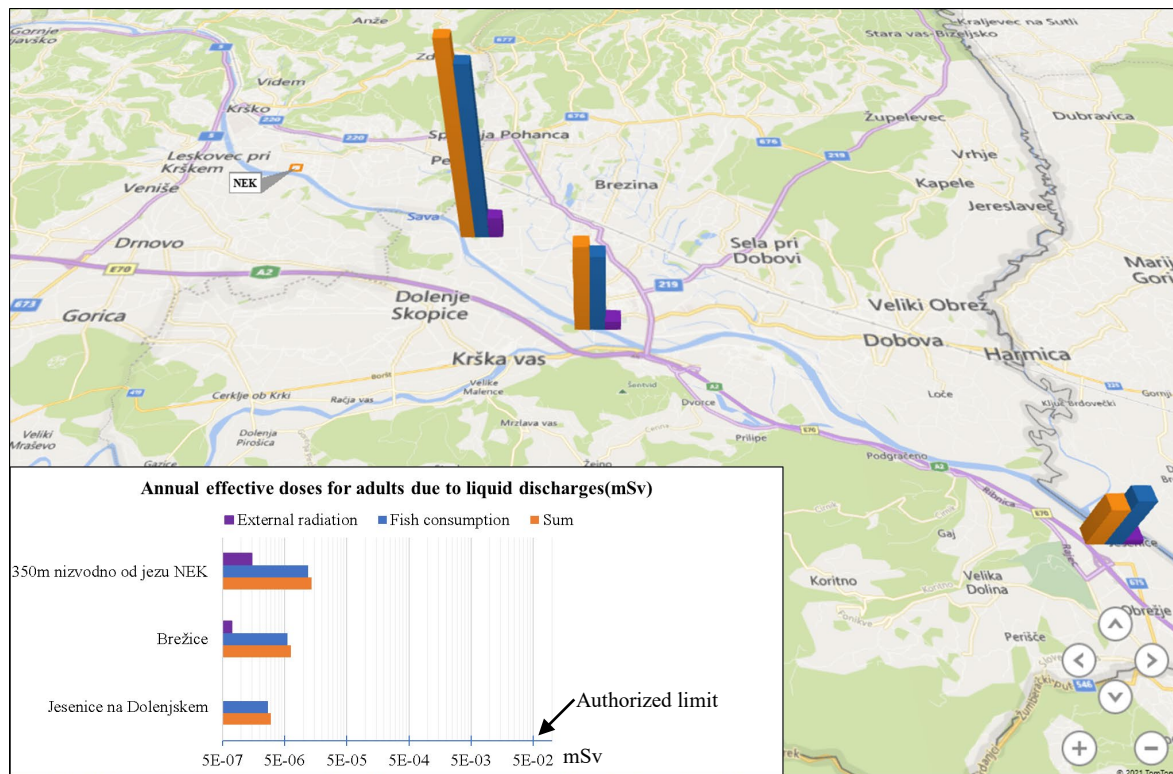


Figure P2: Review of estimated annual effective doses for artificial radionuclides for liquid discharges from the Krško NPP in 2020.

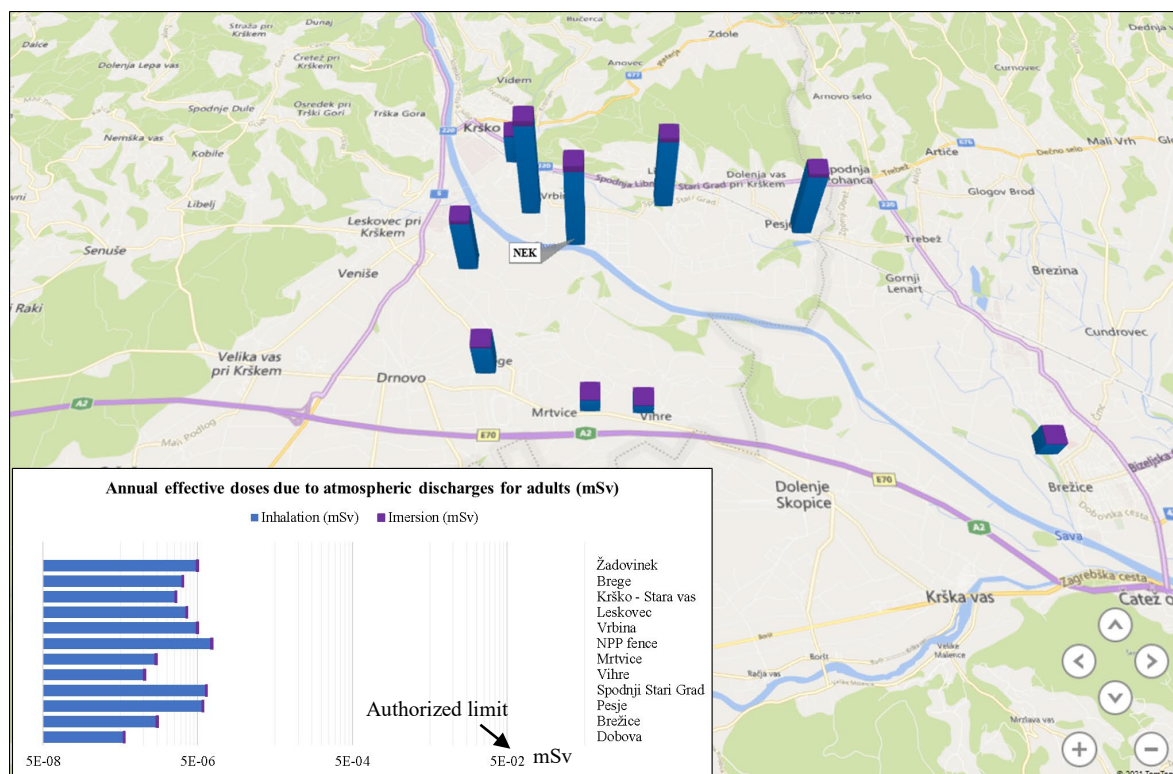


Figure P3: Review of estimated annual effective doses for artificial radionuclides for air emissions in the vicinity of the Krško NPP in 2020





IZVLEČEK

UVOD

Podobno kot v svetu je prebivalstvo v Sloveniji izpostavljeno naravnemu ionizirajočemu sevanju in nekaterim antropogenim virom ionizirajočega sevanja, predvsem tem od uporabe ionizirajočega sevanja v medicini in učinka preostale černobilske kontaminacije in atmosferskih jedrskih poskusov. Pri prebivalstvu v okolici Nuklearne elektrarne Krško (NEK) so dodatno možne 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 efektivna 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 [5], [10]. Ta omejitev je bila po začetku obratovanja dopolnjena še z omejitvijo letne efektivne doze zunanjega sevanja objektov na ograji (0,2 mSv na leto) ter 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. Obseg nadzora radioaktivnosti določa priloga 4 omenjenega pravilnika (Zasnova programa obratovalnega monitoringa radioaktivnosti jedrske elektrarne). Pravilnik določa tudi zahteve, ki jih morajo izpolnjevati izvajalci nadzora radioaktivnosti, tehnične zahteve za merilno in analizno 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 različni *pooblaščenji izvajalci nadzora*.

To poročilo podaja rezultate nadzora radioaktivnosti, ki so ga NEK kot zavezanec in pooblaščenji izvajalci nadzora radioaktivnosti opravili v letu 2020. Sumarni rezultati meritev radioaktivnosti umetnih in naravnih radionuklidov v različnih nadzorovanih medijih in ekspozicijskih prenosnih poteh so podani z ocenami efektivnih doz, ki so predstavljene v poglavju "*OCENA UČINKOV*" (tabela D). Ocena doz sledi metodologiji ICRP in IAEA [25], [26], [27]. V letu 2020 so bili vsi sevalni učinki NEK na prebivalstvo v okolici ocenjeni na manj kot 7,14 E-5 mSv na leto, kar je 0,14 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in navzven. Za atmosferske emisije je bila ocenjena efektivna doza 5,8E-5 mSv na leto, kar velja za ograjo NEK in okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja. Za tekočinske emisije za referenčno skupino prebivalstva je bila ocenjena efektivna doza 1,35 E-5 mSv na leto. Sevalnim učinkom največ prispeva zaužitje C-14 v hrani, 5 E-5 mSv na leto.

Ugotovimo lahko, da so sevalni učinki NEK v primerjavi s tistimi iz globalnega onesnaženja in od 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 tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja je približno 0,003 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja. Izvleček povzema monografijo *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji*, ki je samostojna priloga poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2020*, interna oznaka 9/2021, Ljubljana, april 2021.

V poročilu niso obravnavane izpostavitve prebivalstva ionizirajočemu sevanju zaradi medicinskih diagnostičnih preiskav, ki so v razvitem svetu in tudi pri nas drugi najpomembnejši vir izpostavitve za naravnim sevanjem.

ZNAČILNOSTI VZORČENJA IN MERITEV VZORCEV IZ OKOLJA

Vzorčenje in meritve so v letu 2020 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, levem in desnem bregu akumulacijskega jezera, v razlivnem območju ("nadomestni habitat", nad jezo HE Brežice, 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) 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);
- č) vzorci rib: Krško, akumulacijsko jezero Brežice, Brežice, Jesenice na Dolenjskem, Podsused (HR) in Otok (HR).

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.

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 v Bregah, Rorah, Brežicah ter vodovodov Spodnji Stari Grad in Brežice;
- č) vzorčenje podtalnice v neposredni okolici elektrarne (četrletni posamični vzorci iz vrtine E1 znotraj ograje NEK in mesečni posamični vzorci iz vrtine VOP-4, Vrbinja) in 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 tekočinsko-scintilacijsko 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 v Bregah, Krškem in na referenčni lokaciji v Dobovi ter v Ljubljani (kontrolna lokacija; v okviru nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji);
- b) mesečna menjava vazelinskih zbiralnikov suhega useda na osmih lokacijah v ožji in širši okolici NEK ter v Ljubljani (referenčna lokacija).

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

4) Zrak

- a) vzorčenje aerosolov se opravlja z neprekinjenim prečrpavanjem zraka skozi aerosolne filtre, ki se menjajo vsakih 15 dni; črpalke so postavljene na osmih lokacijah v okolici NEK (Spodnji Stari Grad, Krško – Stara vas, Leskovec, Brege, Vihre, Gornji Lenart, Spodnja Libna in referenčna



lokacija Dobova) ter na kontrolni lokaciji v Ljubljani (nadzor radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji);

- b) vzorčenje joda I-131 se opravlja s posebnimi črpalkami in filtri na istih lokacijah, kjer poteka vzorčenje aerosolov (razen v Dobovi);
- c) vzorčenje za specifično meritev Sr-90/Sr-89 se opravlja s posebno črpalko le v Dobovi;
- č) 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;
- d) zbiranje vzorcev zračnega ogljika C-14 v CO₂ je neprekinjeno potekalo na dveh mestih na ograji NEK, ki je v izključitvenem območju, v letu 2020 je bilo skupno zbranih dvanajst vzorcev. Kontrolne meritve so potekale v Zagrebu, R Hrvaška.

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

5) Zunanja izpostavljenost sevanju

Zunanje sevanje

- a) 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;
- b) doza zunanjega sevanja se meri s sedmimi TL-dozimetri na zahodni ograji NEK v bližini skladišča za suho skladiščenje – predobratovalni monitoring;
- c) vzporedno potekajo meritve s TL-dozimetri na 50 lokacijah po državi;
- d) v sklopu mreže zgodnjega obveščanja je v okolici NEK postavljenih 14 merilnikov sevanja MFM-203, ki delujejo neprekinjeno; poleg teh je v mrežo zgodnjega obveščanja v Sloveniji vključenih še dodatnih 60 merilnikov.

Vsi TL-dozimetri v Sloveniji se odčitavajo na sistemu IJS MR 200 (C), dozimetri na Hrvaškem pa na sistemu, ki je v uporabi na Institutu Ruđer Bošković v Zagrebu. Podatke iz merilnikov mreže zgodnjega obveščanja zbira in posreduje URSJV.

Zemlja

- a) vzorce zemlje zbiramo na treh lokacijah neobdelane zemlje nizvodno od NEK na poplavnih območjih (Amerika – 3,5 km 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) Odvzemna mesta vzorcev hrane v letu 2020, ki so označena na priloženem zemljevidu na koncu poročila, so: sadovnjak ob NEK (sadje), Pesje (mleko, zelenjava, sadje), Brege (meso, mleko, zelenjava), Vihre (zelenjava), Vrbina (jajca, sadje, žito), Spodnji Stari Grad (meso, jajca, zelenjava), Žadovinec (zelenjava), Trnje (zelenjava), Leskovec (meso, sadje), Dolenje Skopice (mleko, zelenjava). V letu 2020 je bilo v okolici NEK skupno vzorčenih 32 vrst živil.
- 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 2020 dvakrat (julij in september) na 5 lokacijah v okolici NEK in v Dobovi; skupaj je bilo analiziranih 5 vzorcev, od tega en v okolici NEK.

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.

REZULTATI MERITEV IN ZNAČILNOSTI V POTEKIH

Uvod

Pri ovrednotenju merskih rezultatov z visokoločljivostno spektrometrijo gama, opravljenih na IJS, smo uporabili neposredne merske rezultate, $y \pm u(y)$ iz poročila *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462*, enako kot v zadnjih treh letih. Tu je $u(y)$ združena standardna negotovost specifične aktivnosti y in se nanaša na interval zaupanja z 68-odstotno zanesljivostjo (faktor pokritja $k = 1$). Združena standardna negotovost pri rutinskih meritvah na visokoločljivostni spektrometriji gama vključuje statistično negotovost števila sunkov v vrhovih v spektru ter negotovosti metode določanja števila sunkov v vrhovih, ozadja, umeritve spektrometra, jedrskih podatkov in količine vzorca. Negotovosti, ki izvirajo iz vzorčenja, razen količine vzorca, niso vključene.

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 [43]. Negotovost izračunane letne doze je apriorna negotovost aritmetičnega povprečja, ki upošteva negotovosti periodičnih merskih rezultatov. Negotovost aritmetičnega povprečja lahko ocenimo tudi s predpostavko, da so periodični merski rezultati porazdeljeni po normalni verjetnostni porazdelitvi. Standardno deviacijo takšne porazdelitve imenujemo razsutje. Če jo delimo s korenem števila meritev, pridemo do aposteriorne negotovosti aritmetičnega povprečja. Definicije teh izrazov so v delovnem poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462*. Tako definirane cenilke so združljive s frekventističnim pristopom [45], le da se namesto aposteriorne negotovosti tam uporablja izraz raztresenost povprečja.

Kadar se poroča meja detekcije (največkrat pri Pb-210, H-3, Sr-90, itd.), se na podlagi priporočila Evropske komisije (*European Commission recommendation on standardized information on radioactive airborne and liquid discharges into the environment from nuclear power reactors and reprocessing plants in normal operation*, Euratom Off. J. Eur. Union. 2004; str. L2:32; odstavka 6 in 7 [46]) 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 razsustje 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 od počernobilskega obdobja dalje. To potrjujejo tudi redna mesečna poročila o izpustih iz NEK, kjer Sr-89 ni bil zaznan.

Po posvetu z lektorjem prof. dr. Alojzijem Kodretom smo izboljšali izraze (uporabili ustrezne slovenske izraze), ki smo jih poenotili po celotnem poročilu:

- namesto *ingestija* uporabljamo *zaužitje*;
- namesto *kontinuirno vzorčenje* uporabljamo *neprekinjeno vzorčenje*;

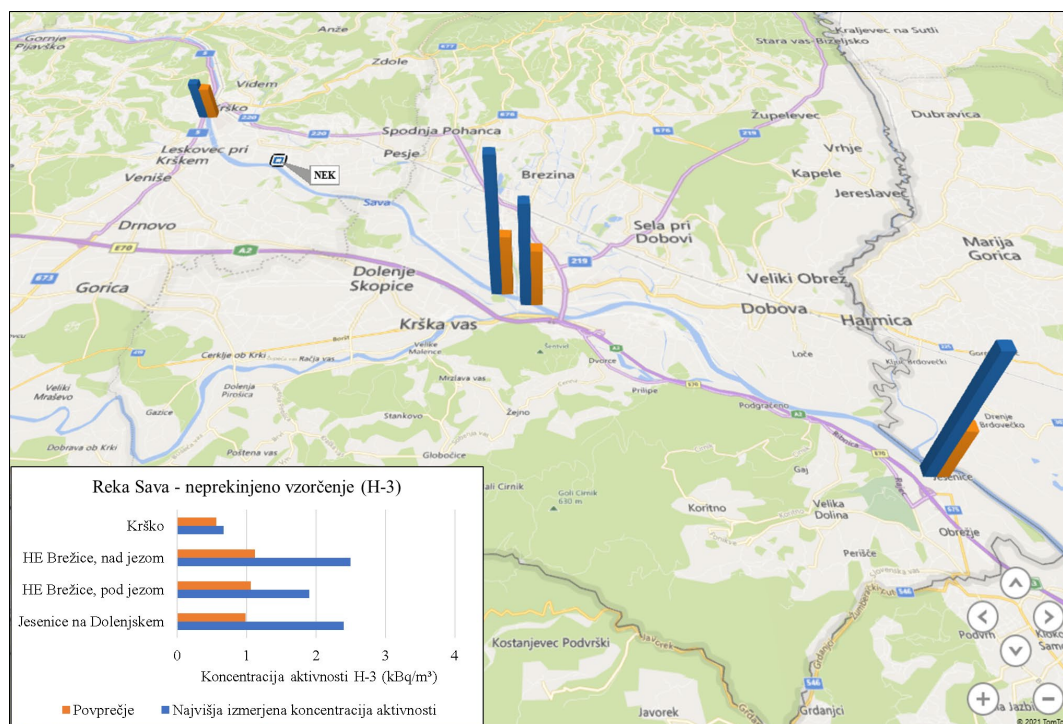


- namesto *enkratno vzorčenje* uporabljamo izraz *posamično vzorčenje*;
- *povprečje* je *aritmetično povprečje*. Če gre za drugo povprečje (npr. uteženo), je to ustrezno navedeno;
- *učinek* je neposredna posledica delovanja NEK;
- *vpliv* je posredna in nedoločena posledica delovanja NEK.
- Namesto *stresanje* uporabljamo dovršni glagolnik razsutje

1) Reka Sava (Izvodček poglavja Radioaktivnost v rečni vodi, sedimentih in ribah)

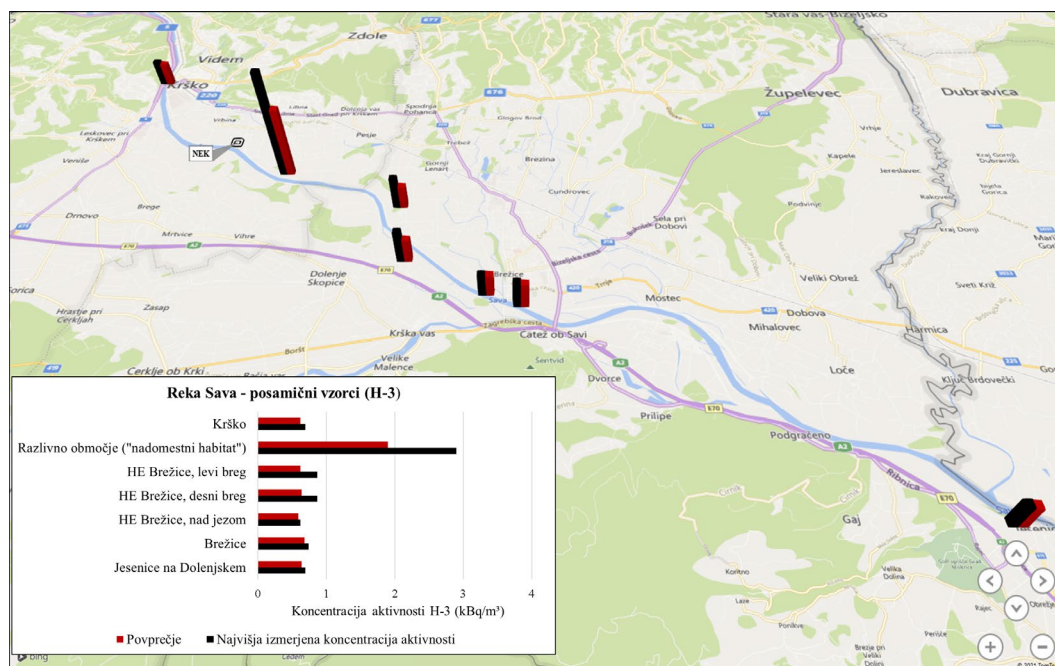
Tritij je redno prisoten v tekočinskih efluentih NEK, zaznamo ga tudi v reki Savi. Pregled povprečnih in najvišjih izmerjenih koncentracij aktivnosti H-3 v reki Savi na postajah z neprekinjenim vzorčenjem (filtrirana voda) vzvodno in nizvodno od jezua NEK v letu 2020 je prikazan na sliki II.

Rezultati mesečnih meritev iz vzorčevalnih postaj HE Brežice in Brežice so zmerno povezani, saj je korelacijski koeficient 0,59. Zmerno je ujemanje tudi med mesečnimi izpusti in mesečnimi izmerjenimi vrednostmi pred jezom HE Brežice (korelacijski koeficient je 0,55), medtem ko obstaja zelo močna povezanost med izpusti in mesečnimi koncentracijami aktivnosti H-3 na postaji pod jezom HE Brežice (korelacijski koeficient 0,94). Največji mesečni tekočinski izpust H-3 v letu 2020 je bil v novembru (1 TBq), kar je bistveno manj kot v prejšnjih letih. Skupni letni izpust je 3 TBq, kar je bistveno manj kot je dolgoletno povprečje (12 TBq od 2002 do 2019). Časovni poteki izmerjenih koncentracij aktivnosti na obeh vzorčevalnih lokacijah, kjer se vzorci iz reke Save zbirajo neprekinjeno, so bili v letu 2020 drugačni kot v 2018 in 2019. Povezava med koncentracijami aktivnosti H-3, izmerjenimi v vodi, ki je bila vzorčena na obeh postajah z neprekinjenim zajemanjem vzorcev, in pretokom reke Save je šibka (korelacijski koeficient je 0,19–0,38).



Slika II: Pregled povprečnih in najvišjih izmerjenih koncentracij aktivnosti H-3 v reki Savi na postajah z neprekinjenim vzorčenjem vzvodno in nizvodno od jezua NEK v letu 2020. Dolgoletno povprečje (od leta 2002) mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v Brežicah je 4,0 kBq/m³. Večmesečno povprečje (od julija 2017) mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 na vzorčevalni postaji pred jezom HE Brežice je 2,9 kBq/m³. Koncentracije aktivnosti tritija v Jesenicah na Dolenjskem so nižje zaradi dodatnega redčenja Save s Krko in Sotlo. Dolgoletno povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v Jesenicah na Dolenjskem je 2,4 kBq/m³.

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, pred jezom HE Brežice) ne sledi časovnemu poteku izpustov H-3 iz NEK. Enako je bilo tudi v letu 2020. 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 zajeitvi nad jezom HE Brežice [24]. Na sliki I2 so prikazane koncentracije aktivnosti H-3 na lokacijah vzvodno in nizvodno od jezua NEK, kjer se vzorčujejo posamični (mesečni ali četrtletni) vzorci.



Slika I2: Pregled povprečnih in najvišjih izmerjenih koncentracij aktivnosti H-3 v reki Savi na lokacijah vzvodno in nizvodno od jezua NEK, kjer se vzorčujejo posamični (mesečni ali četrtletni) vzorci.

Skupna letna izpuščena aktivnost C-14 v Savo v letu 2020 je bila 0,3 GBq, kar je za velikostni red nižje, kot je dolgoletno povprečje (1,9 GBq) od leta 2013. C-14 je bil merjen tudi v savski vodi in v ribah [20]. Na lokacijah na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice so bili odvzeti posamični četrtletni vzorci. Vse izmerjene specifične aktivnosti so nižje od trenutnih atmosferskih aktivnosti (103 pMC ali 226 Bq/kg C). V primerjavi z letom 2019 so specifične aktivnosti C-14 v reki Savi in ribah v letu 2020 okviru negotovosti meritev enake.

I-131 je redno prisoten na vseh nadzornih mestih reke Save, tako vzvodno od elektrarne kot nizvodno v Brežicah in Jesenicah na Dolenjskem. Povprečna koncentracija aktivnosti I-131 v vzorcih filtrirane vode (neprekinjeno zbiranje) je bila od 0,53 Bq/m³ pred jezom HE Brežice do 1,8 Bq/m³ v Jesenicah na Dolenjskem. Najvišja posamična vrednost je bila 6,5 Bq/m³ v junijskem vzorcu v Brežicah, pod jezom HE Brežice. V posamičnih vzorcih nefiltrirane vode je bila najvišja koncentracija aktivnosti I-131 8,3 Bq/m³ v vzorcu iz Brežic iz prvega četrtletja. Povprečje četrtletnih koncentracij aktivnosti je bilo od 1,5 Bq/m³ na desnem bregu akumulacijskega jezera do 4,0 Bq/m³ v Brežicah, pri čemer je bila na vseh odvzemnih mestih najvišja koncentracija aktivnosti v prvem četrtletju 2020. Prisotnost I-131 v reki Savi pripisujemo izpustom iz bolnišnic v reke, ki se izlivajo v Savo vzvodno od jezua NEK (Ljubljana, Savinja). V tekočinskih izpustih iz NEK I-131 v tem letu ni bil zaznan. Iz nadzora radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v letu 2020 [16] lahko razberemo, da so bile povprečne koncentracije v reki Savi v Brežicah podobne, kot jih izmerimo v Savi v Ljubljani (3,4 Bq/m³), in so tudi primerljive z dolgoletnim povprečjem 5,1 Bq/m³ v Brežicah.



V tem letu jod v talnem sedimentu ni bil zaznan. V vzorcih rib iz referenčnega odvzema (v Krškem nad jezo) in tudi v vzorcih iz nadzornih odvzemnih mest pod jezo NEK ni bila zaznana prisotnost I-131, enako kot v preteklih letih.

Letni tekočinski izpust Cs-137 iz NEK v reko Savo je bil 0,9 MBq, kar je manj kot v preteklih letih (dolgoročno povpečje 15,1 MBq). 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 $2 \cdot 10^{-4} \text{ Bq/m}^3$. Tega prispevka ni mogoče ločiti od nehomogeno porazdeljene globalne kontaminacije.

Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Cs-137 v rečni vodi (filtrirana voda) je bilo na referenčnem mestu v Krškem $0,17 \text{ Bq/m}^3$, pri HE Brežice $0,41 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah pa pod mejo detekcije. V posamičnih vzorcih nefiltrirane vode so bila povprečja koncentracij aktivnosti Cs-137 od $0,33 \text{ Bq/m}^3$ v Krškem, do $0,52 \text{ Bq/m}^3$ na levi strani akumulacijskega jezera in $0,55 \text{ Bq/m}^3$ na desnem bregu akumulacijskega jezera. Pred jezo HE Brežice, v Brežicah in v Jesenicah na Dolenjskem so bile koncentracije aktivnosti Cs-137 pod mejo detekcije. Koncentracije aktivnosti Cs-137 v filtrskem ostanku so bile od $0,12 \text{ Bq/m}^3$ do $0,43 \text{ Bq/m}^3$ v Brežicah in do $1,0 \text{ Bq/m}^3$ v Jesenicah na Dolenjskem. V Krškem in pred jezo HE Brežice so bile koncentracije aktivnosti Cs-137 v vseh vzorcih filtrskega ostanka pod mejo detekcije.

Izmerjena koncentracija aktivnosti Cs-137 v rekah po Sloveniji variira z lokacijo vzorčenja, najvišja je bila $(9,6 \pm 0,8) \text{ Bq/m}^3$ v reki Muri [16]. Povprečna koncentracija aktivnosti Cs-137 v letu 2020 je bila od $0,002 \text{ Bq/m}^3$ v Kolpi do 5 Bq/m^3 v Muri.

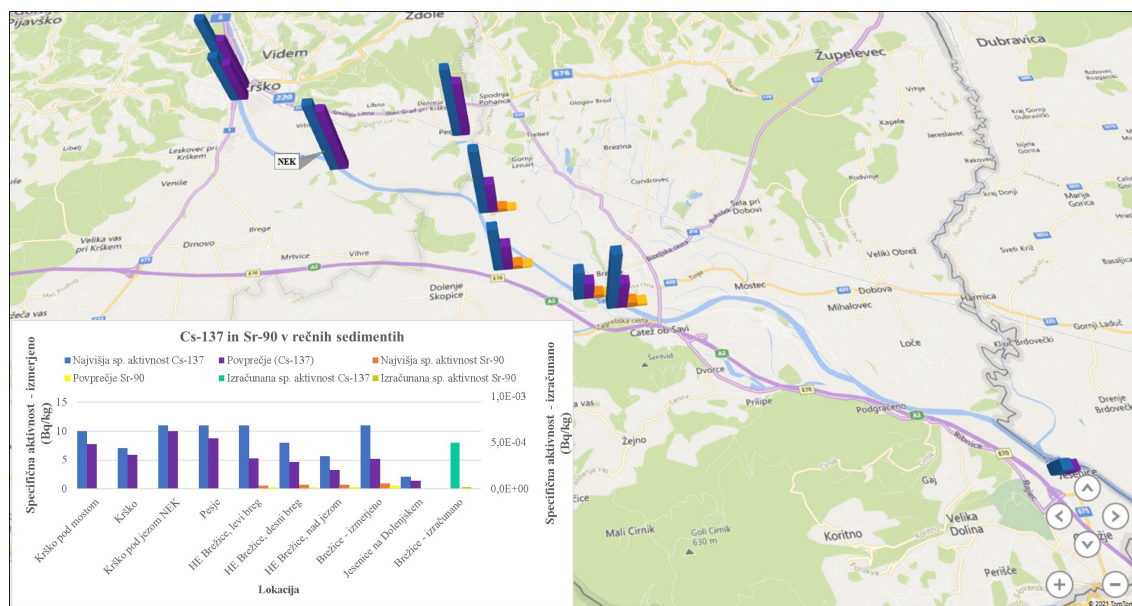
Radioaktivni stroncij (Sr-90) je redno izmerjen v tekočinskih izpustih NEK. V letu 2020 je bila izpuščena aktivnost v reko Savo $0,04 \text{ MBq}$, kar je nižje kot v prejšnjih letih. Tudi vsebnost Sr-90 v reki Savi pripisujemo globalni kontaminaciji, saj je izračunani prirastek koncentracije aktivnosti Sr-90 v Brežicah, ob upoštevanju letnih tekočinskih izpustov in povprečnega pretoka Save ter privzetku razredčitvenega razmerja na levem bregu v Brežicah, enak $1 \cdot 10^{-5} \text{ Bq/m}^3$. Tega prispevka ni mogoče ločiti od nehomogeno porazdeljene globalne kontaminacije.

Večina stroncija je raztopljen v vodi, saj je koncentracija aktivnosti Sr-90 v vodi vsaj 10-krat večja kot v filtrskem ostanku. Na splošno so koncentracije stroncija v vodi 10-krat višje kot za cezij. Povprečna koncentracija aktivnosti Sr-90 v filtrirani vodi na referenčnem mestu Krško je bila $1,7 \text{ Bq/m}^3$, pred jezo HE Brežice $1,8 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah $1,6 \text{ Bq/m}^3$ in v Jesenicah na Dolenjskem $2,1 \text{ Bq/m}^3$. V okviru razsutja podatkov so vrednosti primerljive med seboj. Prav tako so koncentracije aktivnosti Sr-90 v filtrirani vodi v okviru razsutja primerljive z dolgoletnimi koncentracijami aktivnosti na teh lokacijah. Koncentracije aktivnosti Sr-90 v posamičnih vzorcih nefiltrirane vode so v okviru negotovosti enake kot v neprekinjeno vzočenih vzorcih filtrirane vode. Na vseh lokacijah so četrtletna povprečja od $1,5 \text{ Bq/m}^3$ do $2,5 \text{ Bq/m}^3$. Najvišja posamična izmerjena vrednost je bila nad jezo HE Brežice na desnem bregu $3,0 \text{ Bq/m}^3$.

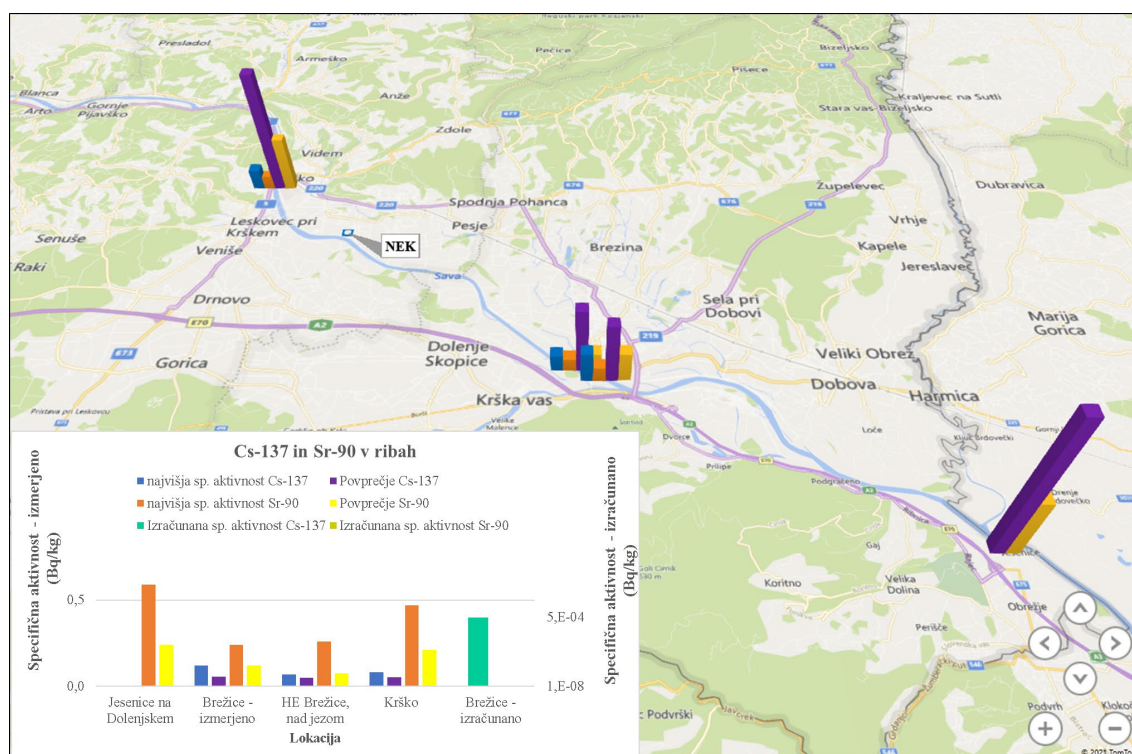
Povprečne koncentracije aktivnosti stroncija v drugih rekah po Sloveniji so podobne ali višje, kot jih lahko izmerimo v Savi v okolici NEK. Povprečna koncentracija, izmerjena v Savi na lokaciji Laze pri Ljubljani, je bila $2,3 \text{ Bq/m}^3$, v reki Muri $0,3 \text{ Bq/m}^3$ in v Dravi $1,6 \text{ Bq/m}^3$ [16].

Na sliki I3 prikazujemo povprečne specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v obrežnih sedimentih vzdolžno in nizvodno od jezu NEK. Vsebnosti obeh radionuklidov v sedimentih pripisujemo globalni kontaminaciji, saj tekočinski izpusti iz NEK prispevajo specifični aktivnosti $5 \cdot 10^{-4} \text{ Bq/kg}$ za Cs-137 in $2 \cdot 10^{-5} \text{ Bq/kg}$ za Sr-90 v obrežnih sedimentih v Brežicah. Prispevka sta zanemarljiva v primerjavi s povprečnimi specifičnimi aktivnostmi $5,2 \text{ Bq/kg}$ za Cs-137 in $0,56 \text{ Bq/kg}$ za Sr-90 v obrežnih sedimentih v letu 2020 v Brežicah.

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



Slika I3: Specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v sedimentih v letu 2020



Slika I4: Specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v ribah v letu 2020

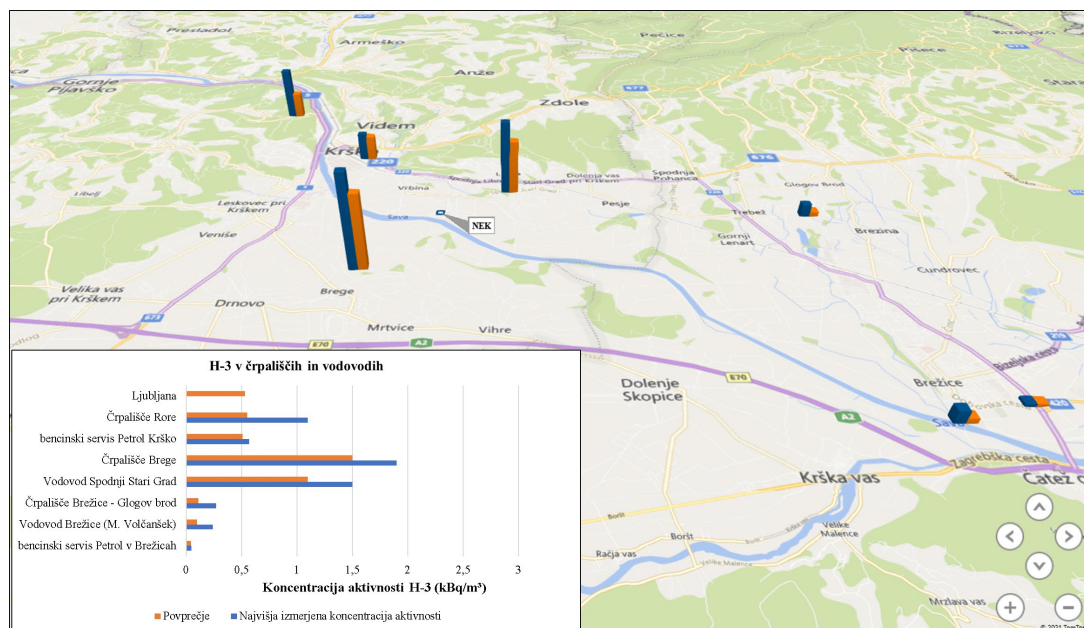
Drugi fisijski in aktivacijski produkti (Co-58, Co-60, Mn-54, Ag-110m, Cs-134, Sb-125) se redno pojavljajo v tekočinskih izpustih NEK. Skupna aktivnost teh radionuklidov v letu 2020 je bila vsaj šest velikostnih redov nižja od tritijeve. Cs-134 je bil v tekočinskih izpustih nazadnje izmerjen leta 2016. 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 nefiltrirani vodi so bile na vseh odvzemnih mestih koncentracije aktivnosti U-238 do 8 Bq/m³, Ra-226 do 6 Bq/m³, Pb-210 do 39 Bq/m³ in Ra-228 do 3 Bq/m³. Vrednosti so podobne izmerjenim v rekah po Sloveniji. Redno je bil merjen tudi kozmogeni radionuklid Be-7, katerega povprečne koncentracije aktivnosti so od 24 Bq/m³ do 63 Bq/m³. Vrednosti so podobne tistim, izmerjenim v rekah po Sloveniji. Povprečne koncentracije aktivnosti K-40 so od 26 Bq/m³ do 52 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. Najvišja povprečna koncentracija aktivnosti K-40 je bila izmerjena v Savinji 100 Bq/m³ [16]. V sedimentih so bile na vseh odvzemnih mestih specifične aktivnosti U-238 do 53 Bq/kg, Ra-226 do 55 Bq/kg, Ra-228 do 62 Bq/kg in Th-228 do 3 Bq/kg. Povprečne specifične aktivnosti K-40 so bile od 220 Bq/kg (Jesenice na Dolenjskem) do 560 Bq/kg (Krško pod jezom NEK). V sedimentu je bil zaznan Be-7 z razponom od 9,3 Bq/kg do 110 Bq/kg na vseh lokacijah. Specifične aktivnosti Pb-210 so bile od 32 Bq/kg do 90 Bq/kg.

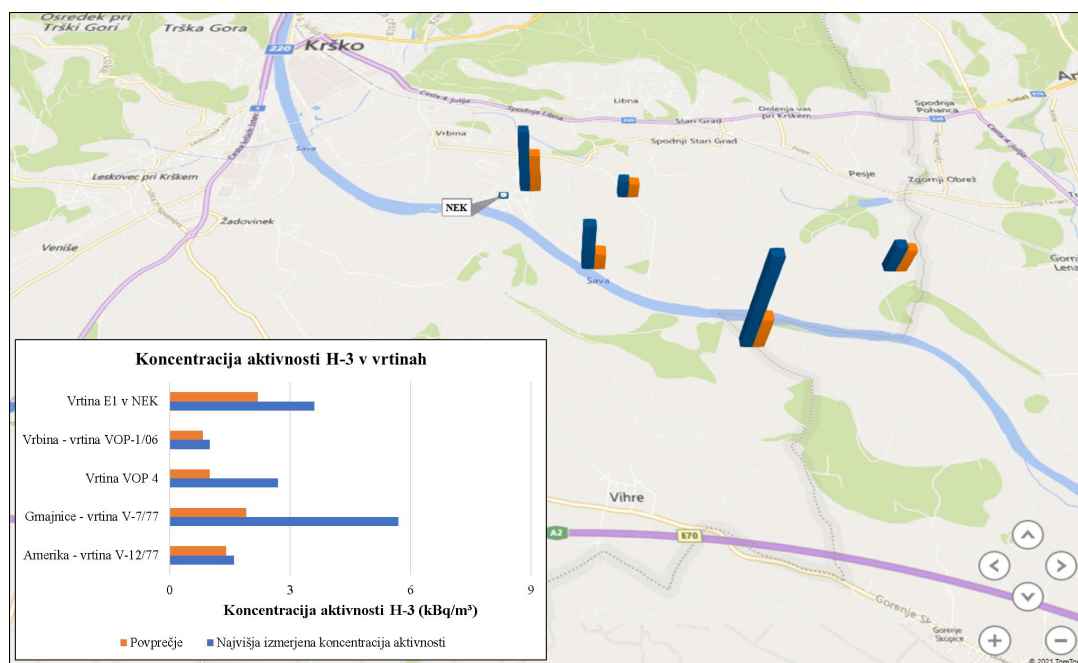
2) Vodovodi in črpaljšča (*Izvilleček poglavja Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi*)

Koncentracija aktivnosti tritija v pitni vodi v okolici NEK je istega velikostnega reda kot drugod po Sloveniji. Vrednosti v Bregah in Spodnjem Starem Gradu so najviše v Sloveniji in so nedvomno posledica učinka NEK, vendar tudi najviše vrednosti še vedno dosegajo manj kot 2 % najvišjih priporočenih vrednosti direktive Evropske komisije za pitne vode. Pregled 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 dodano še koncentracija aktivnosti H-3 v vodovodu Ljubljana [17].

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.



Slika I5: Pregled povprečnih in najvišjih izmerjenih koncentracij aktivnosti H-3 v pitni vodi iz črpaljšč in vodovodov v krški in brežiški občini. na lokacijah, kjer se vzorčujejo neprekinjeno ali četrtletno.



Slika I6: Pregled povprečnih in najvišjih izmerjenih koncentracij aktivnosti H-3 v vodi iz vrtin.

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. Oba lahko uporabimo kot sledilca za študij transportnih procesov, zato njuno prisotnost v vzorcih podzemne vode razlagamo s stikom atmosfere in podzemne vode. Iz tabel z merskimi podatki je razvidno, da se Cs-137 nad mejo kvantifikacije pojavlja le še v 17 % vzorcev, pri drugih ni bil detektiran. Stroncij je bil nad mejo kvantifikacije pri 72 % vseh vzorcev pitne oziroma podzemne vode.

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 ali pa je bil pod mejo kvantifikacije.

Koncentracije aktivnosti naravnega radionuklida K-40 so bile izmerjene na vseh vzorčevalnih mestih. Povečani sta bili vrednosti v vodi na črpališču Brege in vodovodu Spodnji Stari Grad, kar kaže na zunanje vplive (gnojenje, večji vodostaj Save). V Bregah je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti 68 Bq/m³, v vodovodu Spodnji Stari Grad 53 Bq/m³, kar je nižje kot v letu 2019. Na drugih črpališčih in vodovodih pa je bila povprečna koncentracija aktivnosti K-40 med 23 Bq/m³ in 25 Bq/m³, kar je v okviru statičnega razsutja podatkov enako kot v letu 2019.

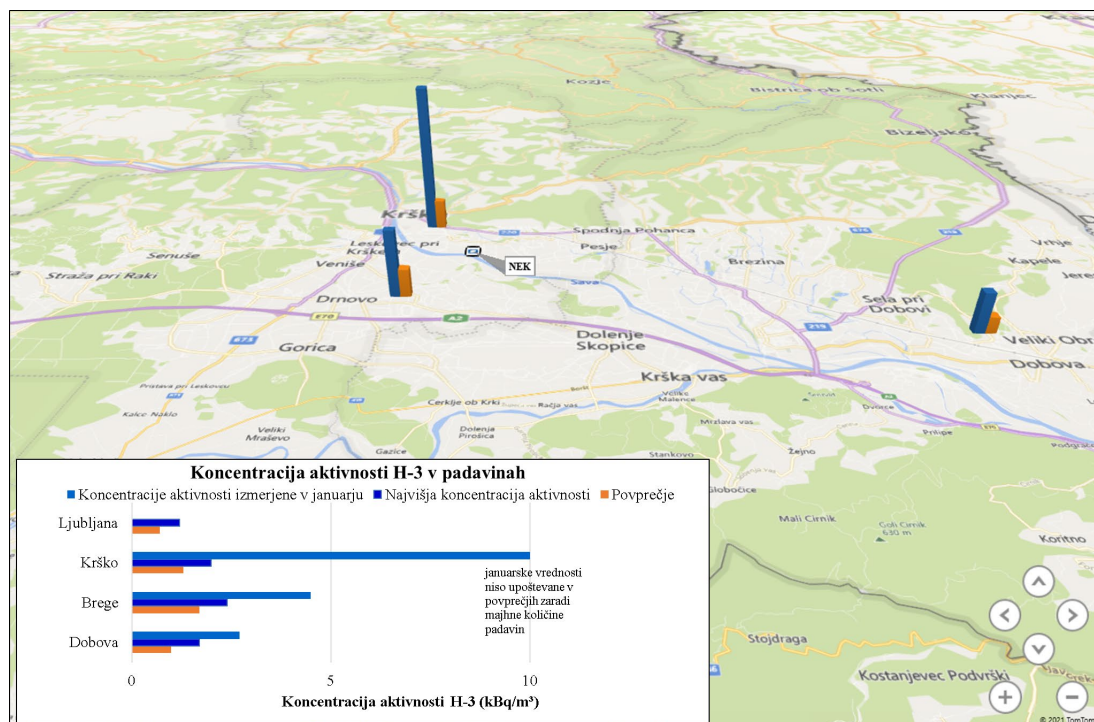
Za vsa vzorčevalna mesta krškega in brežiškega vodovoda velja, da so povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti naravnega U-238 nizka, najvišje povprečje mesečnih vrednosti je bilo izmerjeno v črpališču Brežice, in sicer 4,2 Bq/m³. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-226 se giblje od 1,3 Bq/m³ (vodovod Brežice) do 3,1 Bq/m³ (črpališče Brege). Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Pb-210 je bilo od 2,8 Bq/m³ v vodi iz vodovoda Spodnji Stari Grad, do 6,5 Bq/m³ v vodi iz vodovoda Brežice. V Ljubljani je bila koncentracija aktivnosti Pb-210 pod 1,6 Bq/m³. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-228 v črpališču Brežice je bilo 0,3 Bq/m³, v vodovodu Spodnji Stari Grad pa 1,2 Bq/m³. Povprečja mesečnih koncentracij Th-228 se gibljejo med 0,4 Bq/m³ (črpališče Brežice) in 0,6 Bq/m³ (črpališče Brege). Be-7 je bil občasno detektiran v vseh črpališčih in vodovodih v Krškem in Brežicah. Povprečje mesečnih koncentracij Be-7 je bilo 1,8 Bq/m³ v vodovodu Brežice, najvišje povprečje pa je bilo v vodovodu Spodnji Stari Grad in sicer 4,9 Bq/m³.

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

V letu 2020 je bila letna količina padavin v Ljubljani 1263 mm, v Krškem 1055 mm, v Bregah 914 mm in najmanj v Dobovi 879 mm. Količine padavin po lokacijah so v okvirih razsutja podatkov primerljive

z zadnjimi leti. Razsutje letne količine padavine je ± 60 mm. Variacija padavin po mesecih je še izrazitejša, v januarju je bilo padavin zelo malo, zato nismo uspeli dobiti reprezentativnega vzorca. Izrazito sušni meseci se pojavljajo praktično vsako leto, ne nujno vedno v istem letnem času.

Koncentracija aktivnosti tritija v padavinah močno variira in le koncentracije aktivnosti nad 2 kBq/m^3 bi lahko pripisali izpustom iz NEK [39]. V letu 2020 je bila koncentracija aktivnosti tritija v padavinah štirikrat višja od 2 kBq/m^3 , in sicer jeseni trikrat v Bregah in enkrat spomladi v Krškem. Izrazito visokih koncentracij aktivnosti H-3 v januarju ne moremo pojasniti in niso posledica učinka delovanja NEK. Pri računanju povprečij jih nismo upoštevali. Povprečne in najvišje koncentracije aktivnosti H-3 v padavinah so na sliki I7.



Slika I7: Pregled povprečnih in najvišjih izmerjenih koncentracij aktivnosti H-3 v padavinah

Učinek NEK na koncentracije aktivnosti tritija v padavinah v neposredni bližini elektrarne je opazen, če pogledamo letna povprečja, ki so v Bregah in Krškem (Stara Vas) vsako leto višja kot v Dobovi in Ljubljani. V jeseni (september–november) so bile koncentracije aktivnosti tritija v Bregah višje od povprečne vrednosti, kar se sklada z zračnimi izpusti, ki so bili takrat najvišji v letu. Povezanost med zračnimi izpusti in izmerjenimi koncentracijami aktivnosti H-3 je zmerena, saj je korelacijski koeficient v Krškem 0,58, v Bregah 0,63, medtem ko je za Dobovi 0,24, kar pomeni šibko povezanost. Tako za bližnje lokacije lahko ugotovljamo zmeren učinek zračnih izpustov H-3 iz NEK na okolje, medtem ko je v Dobovi učinek šibek. Za Ljubljano (referenčna lokacija) je koeficient korelacije negativen.

V Dobovi je časovni potek koncentracij aktivnosti H-3 podoben kot na referenčni lokaciji v Ljubljani. Mesečne vrednosti so za 40 % višje kot v Ljubljani. Koncentracije aktivnosti tritija v grobem sledijo naravnim letnim gibanjem tritija v ozračju severne zemeljske poloble, kjer so vrednosti poleti v splošnem višje kot pozimi [38]. Na drugih dveh lokacijah so mesečne koncentracije aktivnosti H-3 od 2- do 3-krat višje kot v Ljubljani.

Najvišji mesečni padavinski usedi H-3 so bili izmerjeni v Bregah, do $0,35 \text{ kBq/m}^2$ v mesecu oktobru. Vrednosti in časovna poteka za Ljubljano in Dobovo sta v okviru razsutja vrednosti primerljiva, vrhovi se skladajo z meseci, ko je bilo padavin več. Časovna poteka za Krško in Brege sta si kvalitativno podobna, nekoliko drugačna kot pri Ljubljani in Dobovi. Najvišje vrednosti sledijo mesecem z največjo količino padavin.

Najvišja koncentracija aktivnosti Cs-137 v padavinah za kraje v okolici NEK je bila ugotovljena v aprilskem vzorcu v Bregah (15 ± 1) Bq/m³, medtem ko je bila v Ljubljani najvišja koncentracija aktivnosti Cs-137 v padavinah v januarju (16 ± 20) Bq/m³. Izrazit odmik koncentracije aktivnosti Cs-137 od povprečja v Bregah pripisujemo resuspenziji s tal, medtem ko gre v Ljubljani še za majhno količino zbranega vzorca, kar je prispevalo k visoki negotovosti merskega rezultata. Številni merski rezultati imajo veliko negotovost, kar pomeni, da so vrednosti pod mejo kvantifikacije, prav tako je bilo tudi več kot polovica (7-8) mesecev, ko Cs-137 v padavinah nismo zaznali.

Najvišje izmerjene vrednosti padavinskega useda za Cs-137 so bile: v Ljubljani 0,22 Bq/m² januarja, v Bregah 0,66 Bq/m² aprila, v Krškem 0,041 Bq/m² junija in v Dobovi 0,1 Bq/m² marca, v vseh primerih pri majhni oziroma manjši količini padavin, razen v Krškem, ko je junija padla zmerna količina padavin. V takšnih primerih povišanje pripisujemo resuspenziji delcev s tal, v zimskih mesecih pa še zaradi kurjenja s trdimi gorivi.

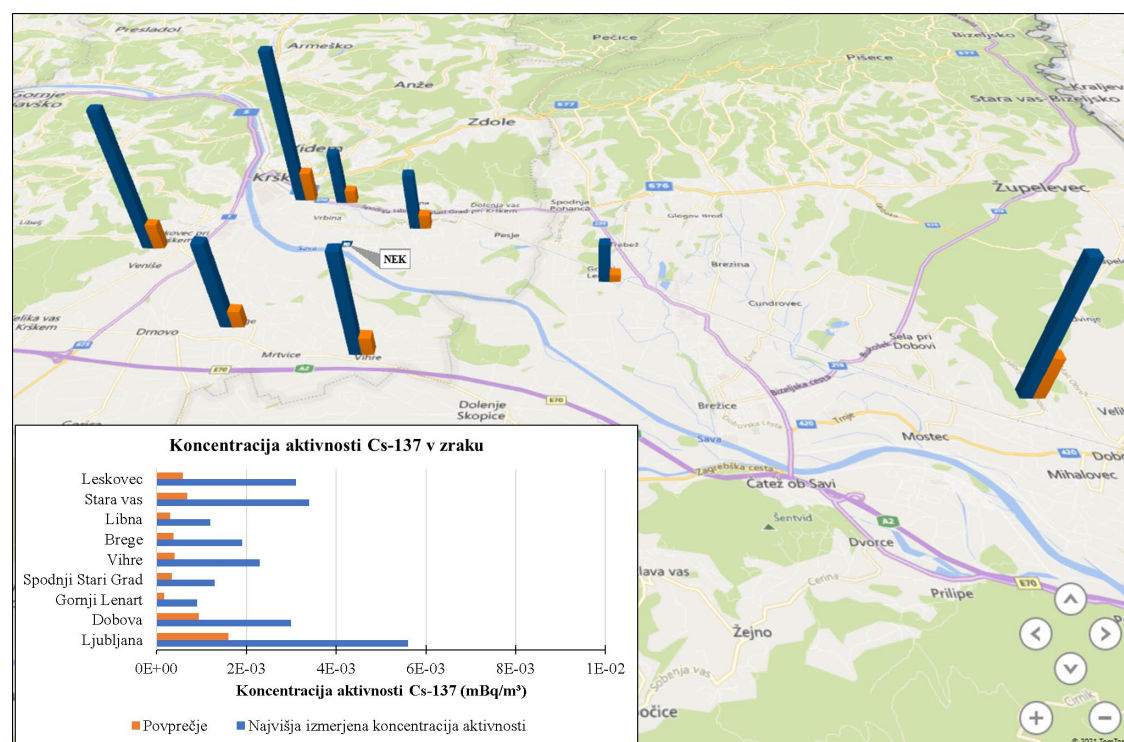
Used je na vseh lokacijah primerljiv z vrednostmi iz predčrnoobilskega obdobja med letoma 1982 in 1985.

Tudi v letu 2020 Sr-90 nismo posebej obravnavali, saj so bile vse izmerjene vrednosti pod mejo detekcije in tako ne moremo oceniti učinka delovanja NEK na okolje zaradi izpustov Sr-90.

4) Zrak (Izvilleček poglavja Zrak)

Čeprav je v zračnih izpustih iz NEK največ tritija H-3 (3,5 TBq) in C-14 (0,02 TBq), le-teh v okolju ne ugotavljamo oziroma nista v programu meritev. Njuno prisotnost v okolju ocenjujemo z uporabo modela razširjanja snovi po zraku na podlagi meritev na izviru.

Med obratovanjem so bili v izpuhu NEK v letu 2020 zaznani izpusti Co-60, Te-125m, 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.



Slika I8: Pregled povprečnih in najvišjih izmerjenih koncentracij aktivnosti Cs-137 v zraku



Povprečne mesečne koncentracije aktivnosti Cs-137 na lokacijah v okolici NEK v letu 2020 so bile nižje od dolgoletnih povprečij ter nižje kot drugod po Sloveniji. Domnevamo, da je prisotnost Cs-137 v zraku posledica uporabe trdih goriv (drva, briketi, peleti), manj pa zaradi resuspenzije prašnih delcev s tal. Na sliki I8 je pregled koncentracij aktivnosti Cs-137 na lokacijah v okolici NEK. Za primerjavo je v legendi dodana še vrednost za Ljubljano. Na lokacijah v Ljubljani in Dobovi, kjer uporabljamo zračne črpalke z večjim pretokom zraka, smo v letu 2020 zaznali manjše povišanje koncentracij aktivnosti Cs-137 tudi v aprilu. To smo pripisali gozdnim požarom v izključitvenem območju jedrske elektrarne v Černobilu, Ukrajina, kjer so tla še vedno onesnažena po nesreči v letu 1986. S transportnom zračnih mas oblak iz Černobila doseže tudi področje Slovenije [28].

Meritve stroncija Sr-90 v okolju se izvajajo le v Dobovi, in še to v trimesečnih sestavljenih vzorcih. Povprečna koncentracija aktivnosti v letu 2020 je bila $0,00007 \text{ mBq/m}^3$, vendar so bile vse meritve pod mejo detekcije. Radionuklid Sr-89 v letu 2020 v zračnih izpustih NEK ni bil zaznan.

Radionuklid I-131 v letu 2020 ni bil detektiran na nobenem od sedmih merilnih mest v okolici NEK, kjer so postavljene kombinirane črpalke (aerosolni filtri, ogljeni filtri). Tudi zmožljivejše 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 2020 v okviru negotovosti povprečja dobro ujemata na vseh merilnih mestih v okolici NEK in Ljubljani. Povprečna koncentracija aktivnosti Be-7 v letu 2020 v okolici NEK je bila $3,4 \text{ mBq/m}^3$, Pb-210 pa $0,6 \text{ mBq/m}^3$. V Ljubljani sta bili povprečni koncentraciji $4,6 \text{ mBq/m}^3$ in $0,8 \text{ mBq/m}^3$. Pri drugih naravnih radionuklidih (izotopi uranove in torijeve razpadne verige ter K-40) so bile razlike med posameznimi merilnimi mesti v okolici NEK nekaj večje, a še vedno v okviru merilnih negotovosti in pričakovanih odmikov, kar je posledica večje resuspenzije na obdelovanih kmetijskih površinah.

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

Zunanje sevanje

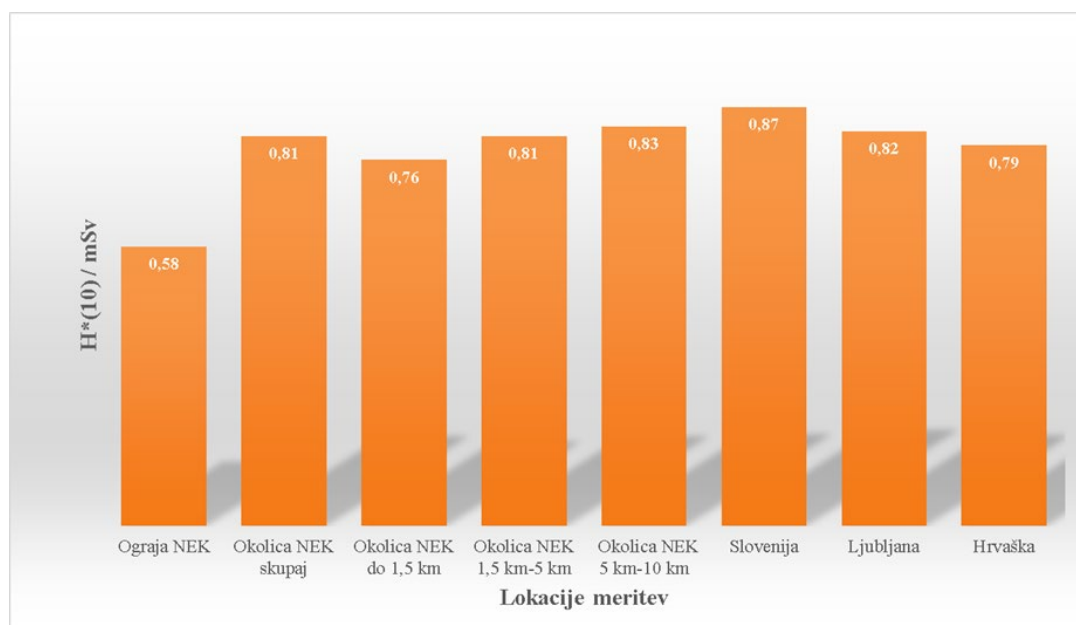
Zunanje sevanje, ki mu je izpostavljeno prebivalstvo v okolici NEK, vključuje kozmično sevanje, sevanje naravnih radionuklidov (predvsem razpadnih produktov radona) v ozračju, sevanje iz radioaktivnega oblaka ob izpustu radioaktivnih snovi iz NEK v okolje in zunanje sevanje zaradi useda, ki se odloži po prehodu oblaka, ter zunanje sevanje zaradi naravnih in umetnih radionuklidov v zemlji. Ker okoljski TLD ne merijo doze nevtronske komponente kozmičnega sevanja, smo jo izračunali z uporabo programa EXPACS ([59], [60], [61]). Program omogoča izračun doze, ki je posledica posameznih komponent kozmičnega sevanja, vključno z nevtronsko komponento za poljubno geografsko dolžino in širino. Mreža TLD tako meri skupno dozo sevanja gama naravnih radionuklidov v okolju, ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja ter prispevka globalne kontaminacije s Cs-137.

Na sliki I9 prikazujemo povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ v letu 2020 v okolici NEK, na ograji NEK, po Sloveniji in na Hrvaškem. 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 dozimetrov ob zahodni ograji NEK. Povprečen polletni dozni ekvivalent je bil $(0,32 \pm 0,01) \text{ mSv}$, kar je v okviru negotovosti meritev primerljivo s polletnim 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.

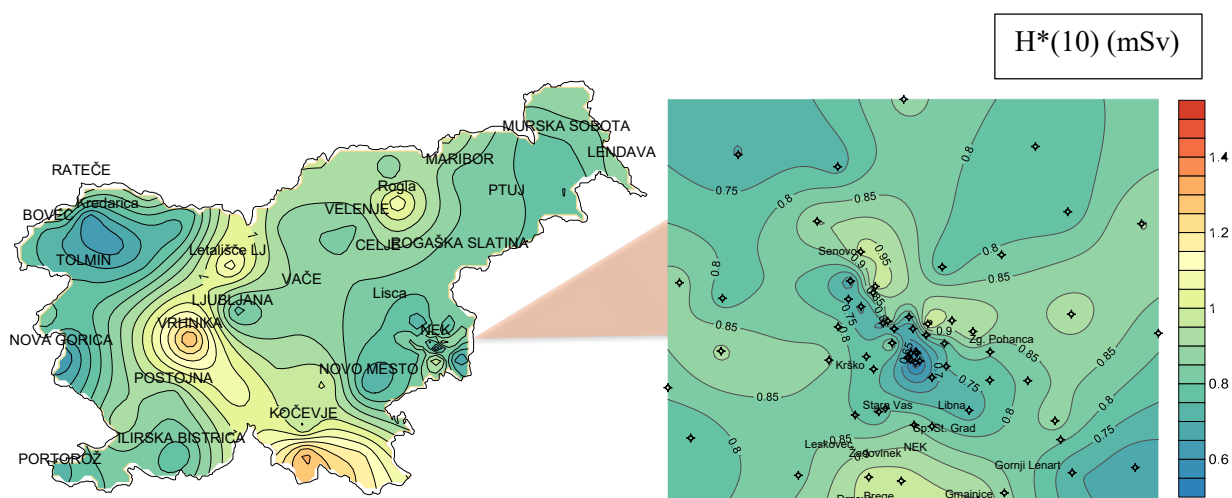
Meritve v Sloveniji kažejo, da je povprečni letni okoljski dozni ekvivalent v okolici NEK sistematično nekoliko nižji kot v življenjskem okolju v Sloveniji. To pripisujemo raznolikosti slovenske pokrajine, orografiji, sestavi tal, debelini snežne odeje, neenakomernemu usedu Cs-137 po nesreči v jedrskem reaktorju v Černobilu..., kar vpliva na dozo zunanjega sevanja. Tudi v krajih v okolici NEK so določene

raznolikosti pokrajine, dodatno pa k nihanjem efektivnih doz izmerjenih s TLD na bližnjih lokacijah prispevajo še lokalne posebnosti pri postavitvi dozimetров v okolju (travnik, polje, gozd, asfaltirane površine, bližine zgradb, temperatura tal itd.). Na sliki I10 prikazujemo izodoze¹ $H^*(10)$ na zemljevidu Slovenije. Povečano je prikazano območje v okolici NEK.

Neprekinjene meritve $H^*(10)$ s 13 merilniki MFM-203 v okolici NEK so v letu 2020 dale povprečno vrednost $(0,82 \pm 0,09)$ mSv na leto (v razponu od 0,62 mSv do 1,08 mSv), kar je v okviru razsutja merskih vrednosti enako kot letni dozni ekvivalent, dobljen s TL-dozimetri.



Slika I9: Primerjava med povprečnimi 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.



Slika I10: Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ po Sloveniji in v okolici NEK v letu 2020

¹ Izodoze so krivulje, ki povezujejo področja z enako letno efektivno dozo $H^*(10)$



Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent pri 60 merilnikih, ki so pod nadzorom URSJV, je bil v letu 2020 ($0,88 \pm 0,15$) mSv v razponu od 0,62 mSv do 1,17 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 odmikov.

Primerjava med rezultati meritev z MFM in TLD je le informativna, saj merilniki MFM niso namenjeni meritvam okoljskega doznega ekvivalenta ozadja. Iz rezultatov meritev ugotavljamo, 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 na določeni lokaciji postavljena merilnika MFM in TLD. Na IJS, kjer sta oba merilnika postavljena v neposredni bližini, se vrednost ($0,75 \pm 0,02$) mSv, določena z MFM, v okviru negotovosti ujema z vrednostjo ($0,82 \pm 0,09$) mSv, določeno s TLD.

Za meritve zunanjega sevanja v Sloveniji je v vseh primerih značilno izrazito zmanjševanje letnega okoljskega doznega ekvivalenta, predvsem v prvih letih po černobilski nesreči (1986). Tak potek se nadaljuje tudi v letu 2020. Vzrok je razpad usedlih kratkoživih sevalcev gama, ki so v začetnem obdobju največ prispevali k zunanjemu sevanju, in prodiranje Cs-137 v zemljo. Letni okoljski dozni ekvivalenti zaradi globalne kontaminacije s Cs-137 na lokacijah v okolici NEK, ocenjeni pri predpostavki realne globinske porazdelitve Cs-137, so v območju med 0,003 mSv in 0,033 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 0,015 mSv do 0,052 mSv.

Zemlja

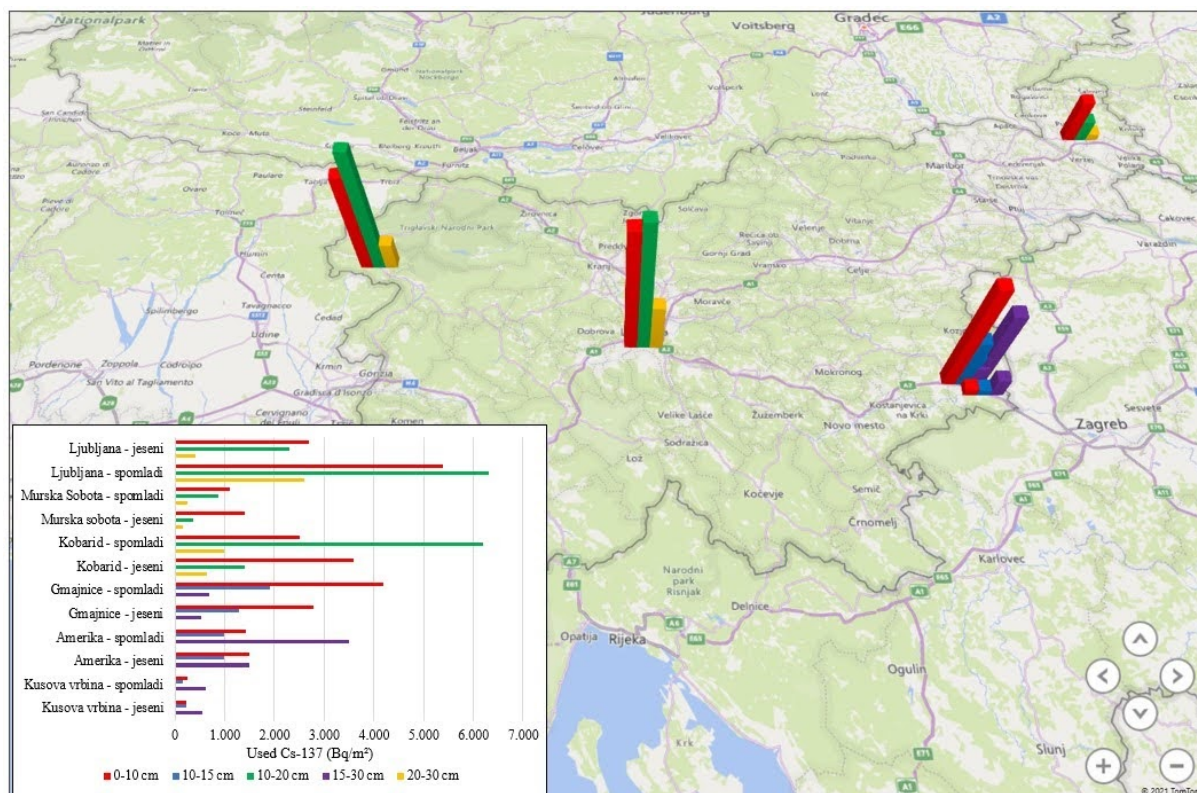
Vzorčenje zemlje poteka na poplavnih področjih, kjer sta usedanje iz zraka in poplavljanje prenosni poti, po katerih lahko izpusti NEK dosežejo mesto vzorčenja.

Specifične aktivnosti Cs-137 v zemlji so bile v letu 2020 od 2,5 Bq/kg v globini 5–10 cm na lokaciji Amerika do 63 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 černobilski nesreči. in prerazporeditvi useda na mikrolokaciji. Prerazporeditev je posledica hidrogeoloških procesov, ki vplivajo na prodiranje Cs-137 v zemljino. To ugotovitev lahko podkrepimo z ugotovljenim premikanjem težišča nanosa v globino na lokaciji Kusova Vrbina. Dva izrazita skoka v globini težišča sta vsekakor posledica poplav, ki so povzročile dodaten nanos sveže mivke. To je tudi razlog, da je prodiranje Cs-137 v zemljino navidežno 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 nižji kot po Sloveniji.

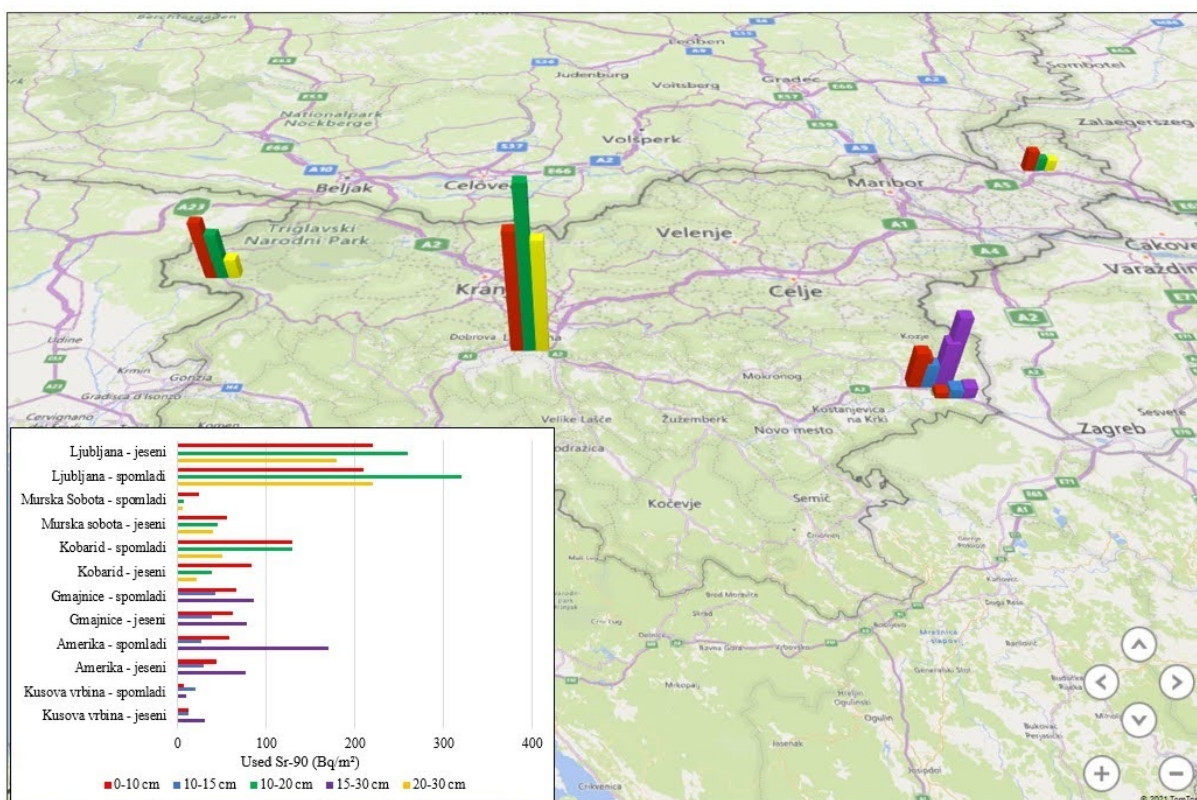
Sicer so se v izpuhu NEK poleg kratkoživih radionuklidov v letu 2020 pojavili tudi Co-60, Te-125m, Te-127m, katerih prisotnost v usedu zemlje nismo zaznali.

Noben od radionuklidov, ki so bili prisotni v tekočinskih izpustih, 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 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. Rezultati meritev specifičnih aktivnosti naravnih radionuklidov v zemlji (K-40, U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228) se ujemajo s povprečnimi specifičnimi aktivnostmi, ki jih za države južne Evrope navaja UNSCEAR [53].



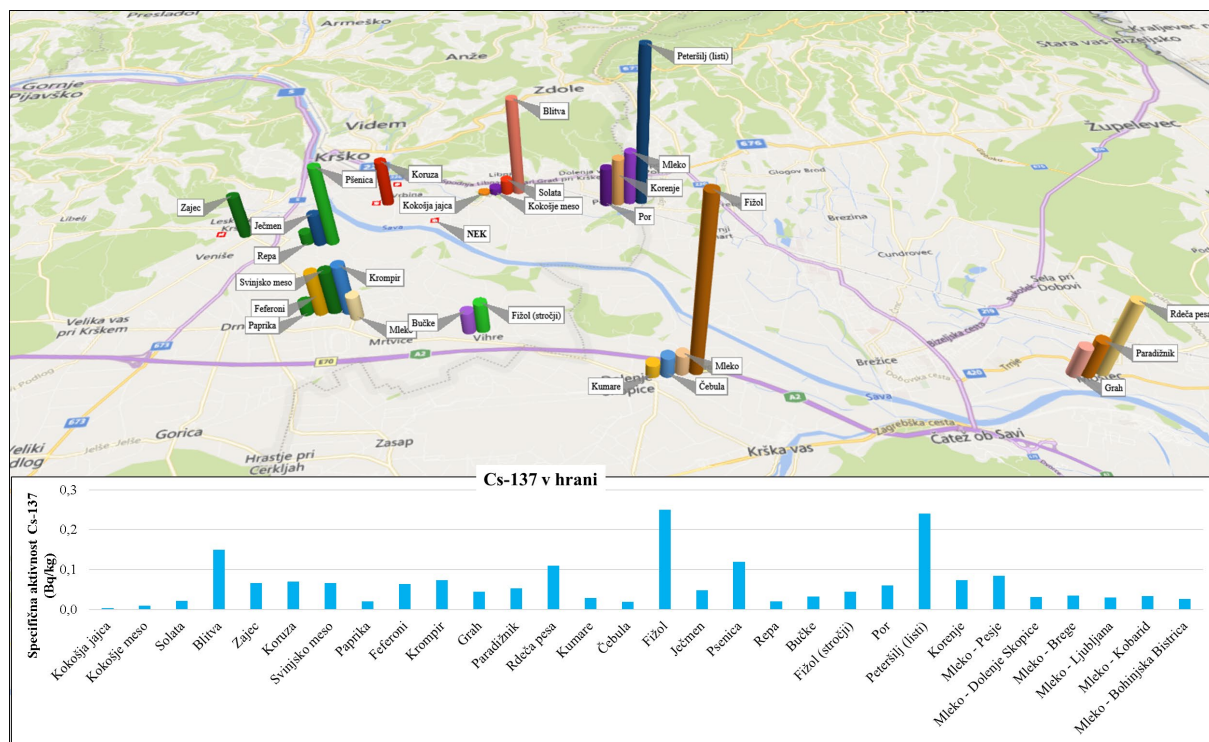
Slika I11: Usedi Cs-137 po Sloveniji (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) in v okolici NEK (Gmajnice, Amerika, Kusova Vrbina) v letu 2020



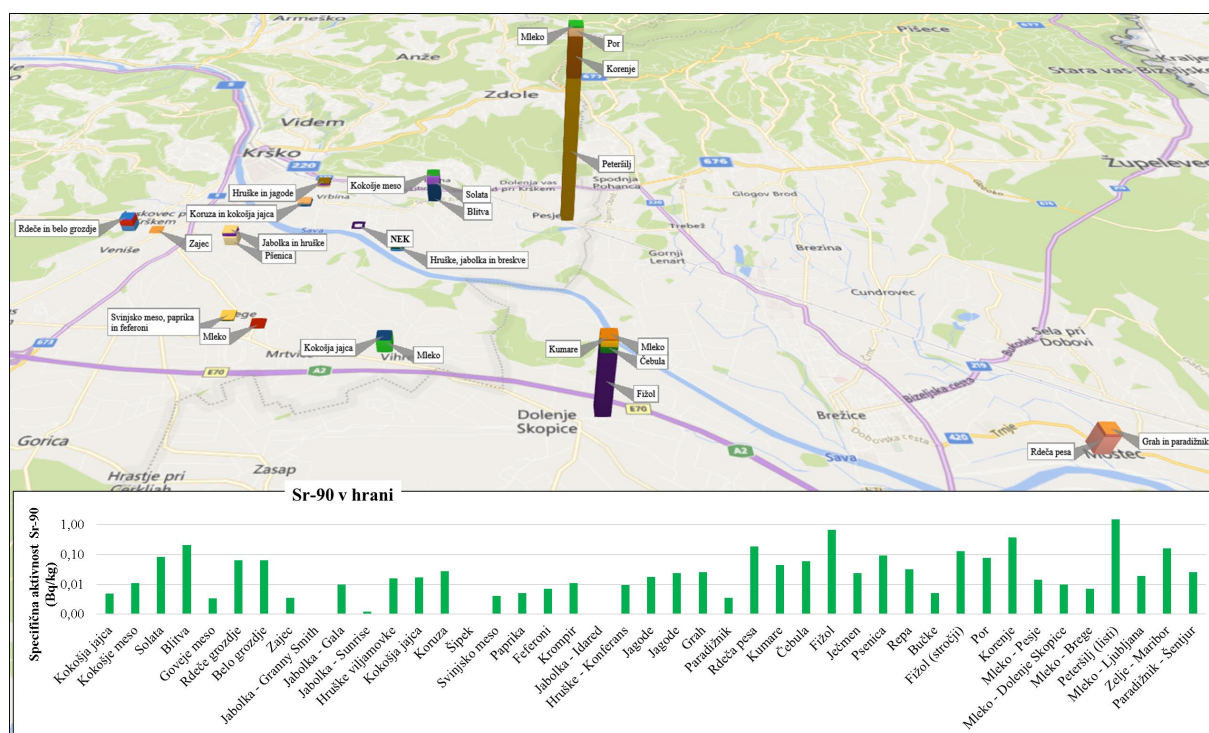
Slika I12: Usedi Sr-90 po Sloveniji (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) in v okolici NEK (Gmajnice, Amerika, Kusova Vrbina) v letu 2020

6) Hrana (Izvleček poglavja Radionuklidi v hrani)

V hrani nismo zaznali radionuklidov, ki so bodisi v zračnih bodisi v tekočinskih izpustih NEK. Izjeme so C-14, Cs-137 in Sr-90, ki pa so pretežno posledica kozmogenega izvora ali globalne kontaminacije. Meritve specifičnih aktivnosti H-3 v hrani niso v programu nadzora radioaktivnosti v okolici NEK.



Slika I13: Specifične aktivnosti Cs-137 v hrani v okolici NEK v letu 2020



Slika I14: Specifične aktivnosti Sr-90 v hrani v okolici NEK v letu 2020



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 2020 izmerjena v koruzi in pšenici in sicer v juliju in septembru. Med povprečnimi vsebnosti C-14 v hrani in rastlinju, merjenih v juliju in septembru na istih lokacijah, ni statistično značilnih razlik. Najvišja izmerjena specifična aktivnost C-14, (242 ± 3) Bq na kilogram ogljika, je bila izmerjena v koruzi (lokacija M, Žadovinec) v juliju [18].

Radionuklida Cs-137 in Sr-90 sta bila v letu 2020 tako v okolici NEK kot drugod po Sloveniji detektirana v vseh skupinah vzorčenih živil. Meritve drugod po Sloveniji je izvedel ZVD v okviru nadzora radioaktivnosti v hrani in živilih v Sloveniji [14]. Na slikah I13 in I14 prikazujemo specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v posameznih vzorčenih živilih na lokacijah v okolici NEK. V legendah sta dodani še primerjavi najvišjih vrednosti radionuklidov po Sloveniji. 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. To razloži, 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 primerljive za tiste vzorčene v okolici NEK in Sloveniji.

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

V letu 2020 je bila specifična aktivnost K-40 v hrani, pridelani na krško-brežiškem polju, od 27 Bq/kg (kumare) do 399 Bq/kg (fižol v zrnju), v hrani, vzorčeni drugod po Sloveniji, pa od 32 Bq/kg (hruške) do 176 Bq/kg (mleko). V okolici NEK v skupino z večjo specifično aktivnostjo K-40 spada listna zelenjava in plodovke, med živila z manjšo aktivnostjo K-40 pa mleko in sadje.

OCENA UČINKOV

Tekočinski izpusti (Tabeli A1 in A2)

Ob delovanju jedrske elektrarne v Krškem so koncentracije aktivnosti izpuščenih radionuklidov, razen H-3, v okolju znatno pod detekcijskimi mejami: njihov morebitni prispevek je težko ločiti od 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.

Zaradi gradnje HE Brežice in nastanka akumulacijskega jezera je prišlo do sprememb pri načinih in poteh izpostavitve prebivalstva. Sedanja ocena učinkov radionuklidov, ki je opisana v nadaljevanju, temelji na starih predpostavkah in ne upošteva vseh hidravličnih parametrov in konfiguracije struge reke Save, kot so mešanje na jezu, negotovosti pretokov ter zatekanje reke Save nizvodno v podtalnico (pred izgradnjo akumulacijskega jezera HE Brežice).

V tabelah A1 in A2 je prikazano ovrednotenje tekočinskih emisij z modelnim izračunom za leto 2020, ki temelji na tekočinskih izpustih in podatkih o letnem pretoku reke Save, upoštevajoč značilnosti referenčnih skupin (to so ribiči, ki lovijo po akumulacijskem jezeru do 350 m nizvodno od jeza NEK in pod merilno postajo za neprekinjeno vzorčenje v Brežicah, preživijo znaten čas na obrežju in uživajo savske ribe). Iz tabel A1 in A2 lahko ugotovimo, da so prispevki k letni efektivni dozi za odraslega prebivalca 350 m nizvodno od jeza NEK 0,027 % od predpisane omejitve, prispevek v Brežicah pa le 0,013 %.

Če bi upoštevali povprečne navade referenčne osebe, bi bile prejete efektivne doze še nekajkrat nižje. K celotni efektivni dozi tako največ prispeva C-14 (74 %), pri čemer je prevladujoča prenosna pot uživanje rib. Iz rezultatov meritev C-14 v reki Savi in ribah ugotavljamo, da so specifične aktivnosti C-14 v vodi in ribah enake naravnemu ozadju (globalno onesnaženje). Zaradi zadrževanja na bregu je prevladujoči prispevek obremenitve od izpustov Co-60 in Co-58 (89 %). Zaradi pitja savske vode, kar je malo verjetna prenosna pot, pa bi prevladal prispevek H-3 (100 %).



Tabela A1: Ocenjena efektivna letna doza posameznika iz referenčne skupine 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	1,5 E-6
zaužitje	ribe	C-14	1,2E-5

Tabela A2: Ocenjena efektivna letna doza posameznika iz referenčne skupine prebivalstva v Brežicah

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	sevanje iz useda (obrežni sediment)	Co-60	7,1E-7
zaužitje	ribe	C-14	5,6E-6

Atmosferski izpusti (Tabeli B1 in B2)

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;
- **izotopi joda** v raznih fizikalnih in kemijskih oblikah, s prispevkom pri inhalaciji ob prehodu oblaka in pri vnosu v telo z mlekom.

V tabelah B1 in B2 je prikazano ovrednotenje zračnih emisij z modelnim izračunom razredčitvenih koeficientov v ozračju za leto 2020 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 B1), in ob ograji NEK. Ocene okvirno veljajo tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja (tabela B2). Velja omejitev dodatne izpostavitve prebivalstva na robu izključitvenega območja (500 m od osi reaktorja) in navzven: celotna letna efektivna doza prispevkov vseh prenosnih poti na posameznika iz prebivalstva ne sme preseči 0,050 mSv. Iz tabel B1 in B2 lahko ugotovimo, da so prispevki k letni efektivni dozi za odraslega prebivalca ob ograji NEK ter okvirno tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja, 0,62 % od predpisane omejitve, prispevek v Spodnjem Starem Gradu pa le 0,01 %.

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. Za emisije je to pretok plinov skozi glavni izpuh. Model potrebuje še hitrost izpustnih plinov ter presek ventilacijskega izpusta. 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 2020 je v okviru razsutja podatkov primerljiva z ocenami za prejšnja leta.

Meritve C-14 so bile v letu 2020 izvedene na vzorcih pšenice in koruze na Institutu "Jožef Stefan". 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 efektivna doza zaradi zaužitja C-14 je tako v okolici NEK (do 1 km) za 5 E-5 mSv višja kot na kontrolni točki v Dobovi. Pri izračunu doze,



prejete zaradi C-14 v okolici NEK, smo konzervativno privzeli, da prebivalci 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 prebivalci uživajo hrano, pridelano na krško-brežiškem področju (od ograje NEK do Dobove).

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

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

Tabela B1: Izpostavitve sevanju odraslega prebivalca v naselju Spodnji Stari Grad zaradi atmosferskih izpustov iz NEK v letu 2020

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	– imerzija (oblak) – sevanje iz useda	– žlahtni plini (Ar-41, izotopi Xe) – aerosoli (Co-60, Cs-137)	3,6E–7 7,2E–16
inhalacija	oblak	H-3, C-14	6,3E–6
zaužitje	rastlinska hrana	C-14	0*

* Rezultat je manjši od negotovosti meritve.

Tabela B2: Izpostavitve sevanju odraslega prebivalca ob ograji NEK zaradi atmosferskih izpustov iz NEK v letu 2020. Ocene okvirno veljajo tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja.

Način izpostavitve	Prenosna pot	Najpomembnejši radionuklidi	Letna doza (mSv)
zunanje sevanje	– imerzija (oblak) – sevanje iz useda	– žlahtni plini (Ar-41, izotopi Xe) – aerosoli (Co-60, Cs-137)	5,6E–7 4,7E–15
inhalacija	oblak	H-3, C-14	7,3E–6
zaužitje	rastlinska hrana	C-14	5,0E–5

Naravno sevanje (Tabela C)

Meritve zunanjega sevanja v okolici NEK so tudi v letu 2020 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 ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja v okolici NEK je na prostem v povprečju 0,90 mSv. To je več, kot je ocena letne efektivne doze za zaprte prostore 0,83 mSv (1998). K temu je treba dodati še prispevek $H^*(10)$ nevtronskega kozmičnega sevanja, ki je za območje NEK 0,07 mSv na leto. Tako je bila skupna doza naravnega zunanjega sevanja $H^*(10)$ v letu 2020 v okolici NEK 0,97 mSv na leto. Ustrezna letna efektivna doza (ob upoštevanju pretvorbenih faktorjev iz publikacije Radiation Protection 106 [69]) je 0,81 mSv na leto, kar je nižje od podatka za svetovno povprečje (0,87 mSv na leto).



Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v hrani so primerljive s povprečnimi vrednostmi v svetu, zato za učinkovito dozo zaradi vnosa hrane privzemamo sklepe iz UNSCEAR [53].

Posamezni prispevki k dozi naravnega sevanja so zbrani v tabeli C. Skupna letna učinkovita doza je ocenjena na 2,39 mSv, kar je v okviru razsutja vrednosti primerljivo s prejšnjimi leti ter s svetovnim povprečjem, ki je 2,4 mSv na leto [53].

Tabela C: Učkovne doze E zaradi naravnih virov sevanja v okolici NEK v letu 2020

Vir	Letna učinkovita doza E (mSv)
– sevanje gama in neposredno ionizirajoče kozmično sevanje [#]	0,76
– kozmični nevtroni [53]	0,06
zaužitje (K, U, Th) ([53], učinkovita doza)	0,27
inhalacija (kratkoživi potomci Rn-222, učinkovita doza) ^{##}	1,3
Skupaj	2,39

Opomba: [#] Ocena učinkovne doze zunanjega sevanja iz okoljskega doznega ekvivalenta doze $H^*(10)$ z upoštevanjem pretvorbenega faktorja $E/H^*(10) = 0,84$ za fotone 600 keV [69]. Pretvorbeni faktorji v območju od 100 keV do 6 MeV so v območju med 0,84 in 0,89.

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

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 jedrske eksplozije, nesreča v Fukušimi

V letu 2020 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. Učinka radionuklidov, ki so ušli v ozračje po nesreči v japonski jedrski elektrarni v Fukušimi leta 2011, v letu 2020 ni bilo zaznati.

Prispevek Cs-137 k zunanjemu sevanju je bil ocenjen na manj kot 0,017 mSv na leto, kar je 2,5 % povprečne letne zunanje doze zaradi naravnega sevanja v okolici NEK. Ocena je primerljiva z ocenami v preteklih letih.

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

Cs-137 in Sr-90 iz jedrskih poskusov in černobilske nesreče sta bila izmerjena v sledih v posameznih vrstah hrane. Učkovna doza zaradi zaužitja te hrane je bila za leto 2020 ocenjena na $3 \text{ E-}4$ mSv na leto za Cs-137 in $1,3 \text{ E-}3$ mSv na leto za Sr-90, kar je skupaj 0,8 % letne učinkovne doze zaradi naravnih radionuklidov (brez K-40) v hrani. Ocenjena doza je primerljiva s tistimi iz prejšnjih let.

K letni učinkovni 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 2020 (Tabela D)

V tabeli D so predstavljeni posamezni prispevki k letni učinkovni dozi zaradi emisij NEK v letu 2020 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 skupine prebivalstva in je zato seštevek samo groba ocena letne efektivne doze.

Tabela D: Povzetek letnih izpostavitv prebivalstva v okolici NEK za leto 2020

Vir	Prenosna pot	Letna efektivna doza (mSv)
naravno sevanje	– gama in ionizirajoče kozmično sevanje	0,76 ^{**}
	– kozmični nevtroni	0,06
	– zaužitje (K, U, Th)	0,27
	– inhalacija (kratkoživi potomci Rn-222)	1,30
	Skupaj naravno sevanje	2,39
NEK – neposredno sevanje ob ograji NEK	– neposredno sevanje iz objektov NEK	nedoločljivo
NEK atmosferski izpusti (na ograji NEK ^{****})	– zunanje sevanje iz oblaka	5,6E–7
	– zunanje sevanje iz useda (Co-60, Cs-137)	4,7E–15
	– inhalacija iz oblaka (H-3, C-14)	7,3E–6
	– zaužitje (C-14)	5,0E–5
NEK tekočinski izpusti (Sava)	– referenčna skupina (350 m pod jezom NEK)	1,4 E–5
	– odrasla oseba, Brežice	6,3 E–6
	Skupaj učinki NEK*	7,14 E–5
černobilska kontaminacija, jedrski poskusi	– zunanje sevanje ^{**}	< 1,7E–2 ^{***}
	– zaužitje rastlinske in živalske hrane (brez C-14)	1,6E–3
	– zaužitje rastlinske hrane (C-14)	1,5E–2
	– zaužitje rib (Sr-90)	8,9E–5
	Skupaj globalno onesnaženje	3,37 E–2

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

** Ocena efektivne doze zunanjega sevanja iz okoljskega doznega ekvivalenta $H^*(10)$ z upoštevanjem pretvorbene faktorja $E/H^*(10) = 0,84$ za fotone 600 keV [69].

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

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

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) ali 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 E, dodana je primerjava s prejšnjimi leti. V letu 2020 je bil največji prispevek zaradi zunanjega sevanja – posledica prisotnosti Cs-137 v zemlji (globalno onesnaženje). Drugi največji prispevek je zaradi C-14 v hrani. Ugotovimo lahko še, da se vsota prispevkov z leti znižuje, k čemur največ prispeva zmanjšana ocena zaradi sevanja Cs-137 iz zemlje.



Tabela E: Pregled ocenjenih letnih efektivnih doz za vse **umetne radionuklide** po nadzorovanih medijih izpostavitve za odraslo osebo v okolici NEK od leta 2015 do leta 2020. 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 C) in so ocenjeni na manj kot 0,14 % avtorizirane mejne letne doze na robu izključitvenega območja in navzven.

Nadzorovani medij	Letna efektivna doza umetnih radionuklidov E (mSv)					Lokacija	Opombe
	2016	2017	2018	2019	2020		
Reka Sava	1,5 E-4 8 E-7 1,7 E-4	1,3 E-4 1,4 E-6 0,0011	9,1 E-5 1,5 E-6 7,3 E-4	1,1 E-4 8,3 E-7 1,4 E-4	7E-5 1,3 E-6 1,9 E-4	Brežice Brežice Brežice	pitje (H-3) kopanje (Cs-137) zaužitje rib (Sr-90)
Črpališča in vodovodi	3,1 E-5	3,5 E-5	3,5 E-5	2,8 E-5	3,2 E-5	Brege	pitje vode (H-3)
Padavine in ..suhi used	2 E-5	3,8 E-5	2,3 E-5	1,9 E-5	1,8 E-5	Brege	zaužitje (H-3)
Zrak	5 E-7	2,4 E-4	4,6 E-7	4,5 E-7	2,7 E-7	Povprečje po lokacijah	inhalacija in imerzija (Cs-137, Ru-106 (2017))
Zunanje sevanje **	0,04	0,033	0,023	0,015	0,017	Vse lokacije	(Cs-137)
Hrana	0,0148	0,0153	0,0151	0,0152	0,01485	Na ograji NEK***	zaužitje (C-14*, Sr-90)
	0,0018	0,0015	0,0015	0,001	0,0015	vse lokacije in na ograji NEK***	
Skupaj	0,057	0,0513	0,0405	0,0315	0,0337		

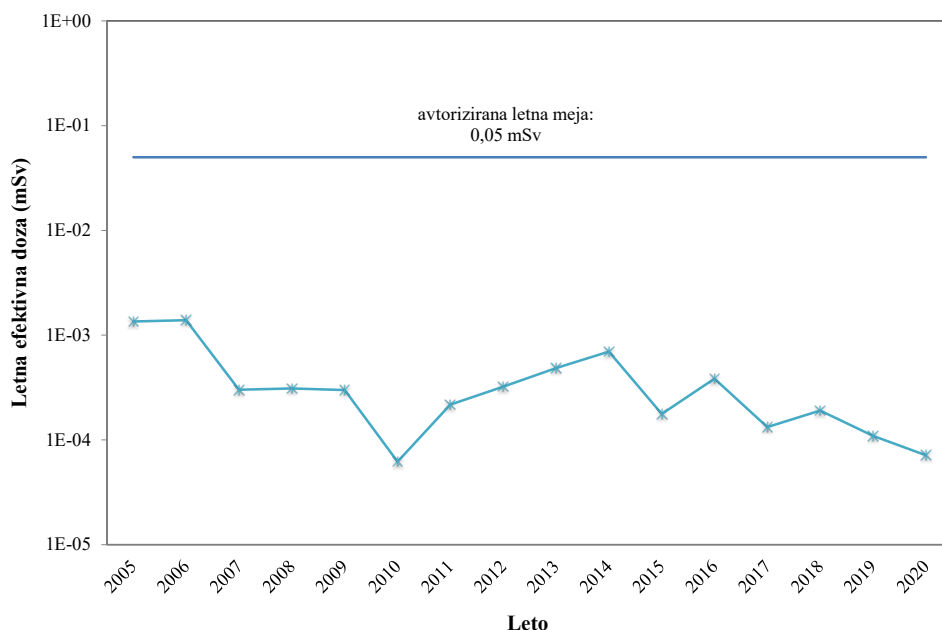
* Del pripada kontaminaciji zaradi nadzemnih jedrskih poskusov, del pa kozmogenemu izvoru, saj C-14 nastaja v ozračju ob jedrskih reakcijah molekul dušika s hitrimi (kozmičnimi) protoni.

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

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

Na sliki I15 je predstavljen seštevek ocenjenih letnih efektivnih doz posameznih referenčnih skupin zaradi emisij NEK od leta 2005 do leta 2020. Posebej je označena avtorizirana letna meja 0,05 mSv. Posamezni prispevki se nanašajo na različne skupine prebivalstva in je zato seštevek samo groba ocena letne efektivne doze. Od leta 2005 do 2011 se seštevek znižuje, v letih od 2012 pa 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 2020 daje seštevek drugo najnižjo vrednost v zadnjih 31-ih letih. Najnižja je bila v letu 2010. Tako nizke vrednosti lahko pripišemo majhnim nadzorovanim izpustom iz NEK (kvalitetno gorivo) in dejstvu, da v letu 2020 ni bilo rednega remonta. Pri primerjanju prispevkov v posameznih letih je treba upoštevati še, da se pri izračunu zunanjega sevanja iz oblaka in inhalacije iz oblaka od leta 2007 uporablja Lagrangeev model, ki daje nižje vrednosti izpostavitve, ter da so bile vrednosti prispevka 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 0,003 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja.



Slika I15: Seštevek ocenjenih letnih efektivnih doz posameznih referenčnih skupin zaradi emisij NEK od leta 2004 do leta 2020. Označena je tudi avtorizirana letna meja (0,05 mSv).

Izvleček povzema monografijo *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji*, ki je samostojna priloga poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2020*, interna oznaka 9/2021, Ljubljana, april 2020.

SKLEPI

Povzetek izpostavitve prebivalstva v okolici NEK za leto 2020 je v tabeli D, kjer so navedeni prispevki naravnega sevanja, učinki NEK na ograji NEK, ki je v izključitvenem območju, in preostali učinki černobilske kontaminacije in poskusnih jedrskih eksplozij:

- v letu 2020 so bili vsi sevalni učinki NEK-a 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 $7,14 \cdot 10^{-5}$ mSv na leto;
- k celotni efektivni dozi največ prispeva zaužitje hrane (86,9 %) z vnosom C-14;
- efektivna doza zaradi vdihavanja prispeva k celotni efektivni dozi 10,2%. Med radionuklidi največ prispeva H-3;
- efektivna doza zunanega sevanja k celotni efektivni dozi prispeva 2,9 %. Med radionuklidi največ prispeva Co-60;
- 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);
- ocenjena vrednost sevalnih učinkov NEK-a na ograji NEK je približno 0,003 % značilnega neizogibnega naravnega ozadja. Ocena okvirno velja tudi na razdalji 500 m od osi reaktorja;
- seštevek vseh prispevkov sevalnih učinkov je drugi najnižji v zadnjih 31-ih letih. Nizke vrednosti lahko pripišemo majhnim nadzorovanim izpustom iz NEK (kvalitetno gorivo) in dejstvu, da v letu 2020 ni bilo rednega remonta Zasluge za nizke učinke jedrske elektrarne grede tudi zaposlenim v NEK, ki zgledno skrbijo za nadzor in omejevanje izpustov.
- vsota prispevkov efektivnih doz, ki jih izračunamo iz meritev vzorcev iz okolja, se z leti znižuje, k čemur največ prispeva zmanjšana ocena zaradi sevanja Cs-137 iz zemlje. To je ostanek zračnega in padavinskega useda po nesreči v jedrskem reaktorju leta 1986 v Černobilu, Ukrajina.



S U M M A R Y

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 Chernobyl contamination and the contamination generated by atmospheric nuclear tests. When it comes to the 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], [10]) and other dose limits related to releases, as well as other radiation impacts on the environment and population. The limitation of additional exposure of the population 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 reference 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*. 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 *authorised monitoring providers*.

This Report presents the results of radioactivity monitoring that was performed in 2020 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 natural 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 D). The dose assessment is based on the principles of ICRP and IAEA [25] [26] [27].

Thus, in 2020, the radiation effects of the Krško NPP on the population in the immediate surroundings were estimated at less than 7.14 E-5 mSv per year, what presents 0.14 % of the authorized dose at the Krško NPP exclusion area. The estimated effective dose at the Krško NPP fence (it applies approximately also at the distance of 500 m from the axis of the reactor) received by reference person as the result of Krško NPP atmospheric discharges is estimated to 5.8 E-5 mSv per year, and to 1.35 E-5 mSv per year due to the Krško NPP liquid discharges. The major contribution of 5 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 0.003 % 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 *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici Krško NPP in po Sloveniji*, ki je samostojna priloga poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2020*, interna oznaka 9/2021, Ljubljana, April 2021.

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 2020, the scope and methods of sampling and measurements were the same as in previous years, which enables 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 radiological monitoring 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) 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);
- d) fish samples: Krško, reservoir, Brežice, Jesenice na Dolenjskem, Podsused (Croatia) and Otok.

Sample measurements involved determination of the activity concentration and specific activity of gamma emitters using high resolution gamma-ray spectrometry (HRGS), for tritium (H-3) the activity concentration and specific activity determination with liquid scintillation beta spectrometry, and the determination of Sr-90/Sr-89 using radiochemical separation and counting with a proportional counter.

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;
- 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, which were 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 special pumps in Dobova;
- d) emission measurements were performed at the Krško NPP's main vent, 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 2020, a total of sixteen 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 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;
- 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 60 continuous radiation detectors are in operation at other locations in Slovenia, also as a part of the Early Warning Network.

All TL dosimeters used for monitoring in Slovenia were evaluated by the IJS MR 200 (C) system. Dosimeters in Croatia were evaluated on the system located at the Ruđer Bošković Institute in Zagreb. 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

- d) Sampling of food was performed in the following locations: orchard next to the Krško NPP (fruits), Pesje (milk, vegetables, fruits), Brege (meat, milk, vegetables), Vihre (vegetables), Vrbina (eggs, vegetables, cereals), Spodnji Stari Grad (meat, eggs, vegetables), ŽadoviKrško NPP (vegetables), Trnje (vegetables), Leskovec (meat, fruits), Dolenje Skopice (milk, vegetables); 32 different food samples were collected in 2020;
- e) 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;
- f) sampling of vegetation, crops and fruits for C-14 specific activity determination took place twice in 2020 (July and September) at 5 locations in the surroundings of the Krško NPP and in the reference location in Dobova; a total of 5 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.

MEASUREMENT RESULTS AND TIME-TRENDS

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 2020, IJS-DP-13462*) 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 " $\ddagger$ ", 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 [43]. 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 [46]). 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 [45], 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 2020, IJS DP 13462*.

The designation Sr-90/Sr-89 means, that the separation to determine the activity of Y-90 was not performed. The separation to determine the activity of Y-90 shall be carried out only in cases, when the counting rate of Sr-90/Sr-89 decreases, and the difference is a result of the radioactive decay rate of Sr-89. Thus, the reported activity concentrations or specific activities of Sr-89/Sr-90 refer only to activity concentrations or specific activities of Sr-90, because the short-lived Sr-89 has not been detected in the environment since post-

Chernobyl period. This is also confirmed by periodic monthly reports on atmospheric discharges from the Krško NPP, where the radionuclide Sr-89 was not detected.

1) Sava River (*Abstract from the chapter Radioaktivnost v rečni vodi, sedimentih in ribah*)

Filtered water

Tritium is regularly present in liquid effluents from the NPP, and it is also detected in the Sava River. An overview of the average and highest measured 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 2020 is shown in Figure I1.

There is a moderate correlation among the results of monthly measurements from the sampling stations of HPP Brežice and Brežice, as the correlation coefficient was 0.59. A moderate match is also between monthly discharges and monthly measured values in front of HPP Brežice (correlation coefficient is 0.55). Simultaneously, there is a robust correlation between discharges and monthly concentrations of H-3 activity at the station under dam Brežice (correlation coefficient is 0.94). The largest monthly liquid discharge of H-3 in 2020 was in November (1 TBq), significantly less than in previous years. Total annual emissions 3 TBq, which is substantially less than the long-term average (long-term average from 2002 to 2019 is 12 TBq). The time courses of the measured activity concentrations at both sampling locations, where samples from the Sava River are collected continuously, in 2020 were different than in 2018 and 2019. The relationship between the H-3 activity concentrations measured in water sampled at both stations with continuous sampling and flow-rate of the Sava River is weak (correlation coefficient is 0.19–0.38).

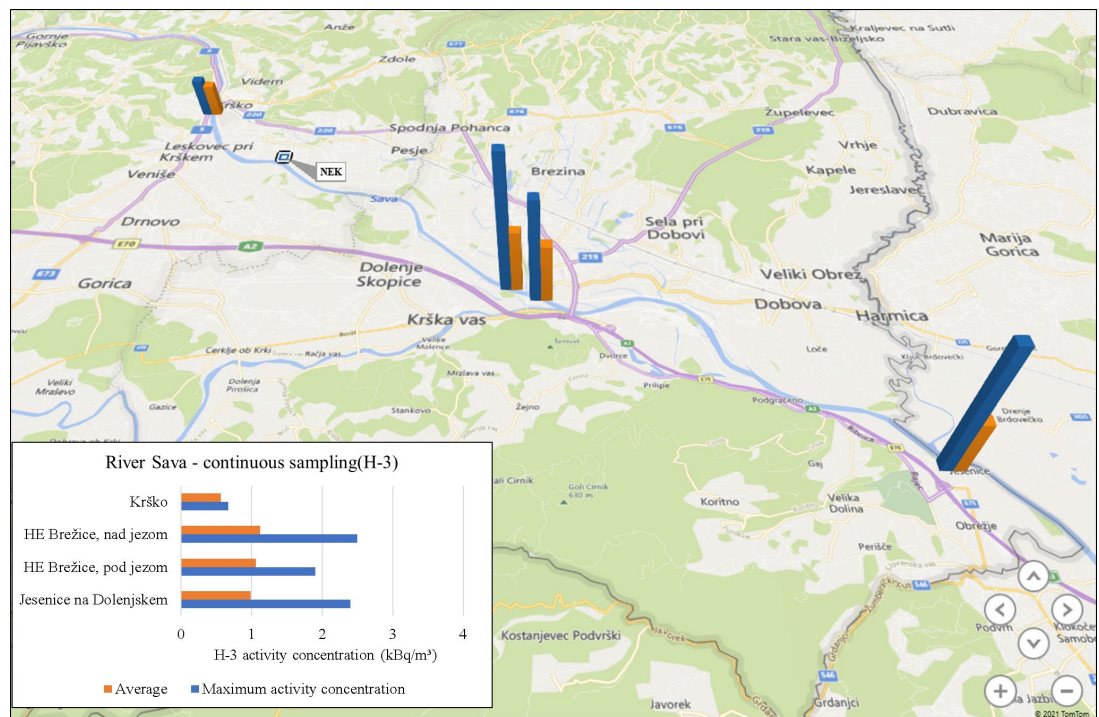


Figure I1: Overview of average and highest measured activity concentrations of H-3 in the Sava River at stations with continuous sampling mode upstream and downstream of the Krško NPP dam in 2020. The long-term average (since 2002) of monthly activity concentrations of H-3 activity in Brežice is 4.0 kBq/m³. The long-term average (since July 2017) of the monthly activity concentrations of H-3 at the sampling station in front of the Brežice HPP dam is 2.9 kBq/m³. Activity concentrations of tritium in Sava at Jesenice na Dolenjskem sampling station are lower due to additional dilution of the Sava with Krka and Sotla. The long-term average of monthly concentrations of H-3 activity in Jesenice na Dolenjskem is 2.4 kBq/m³.



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. The same was true in 2020. 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 in terms of measurement uncertainty. We can assume that the river flow is slower but more pronounced on the right side of the accumulation lake 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 [24]. Figure I2 shows the activity concentrations of H-3 at the locations upstream and downstream of the NEK dam, where single samples are unfiltered water are collected

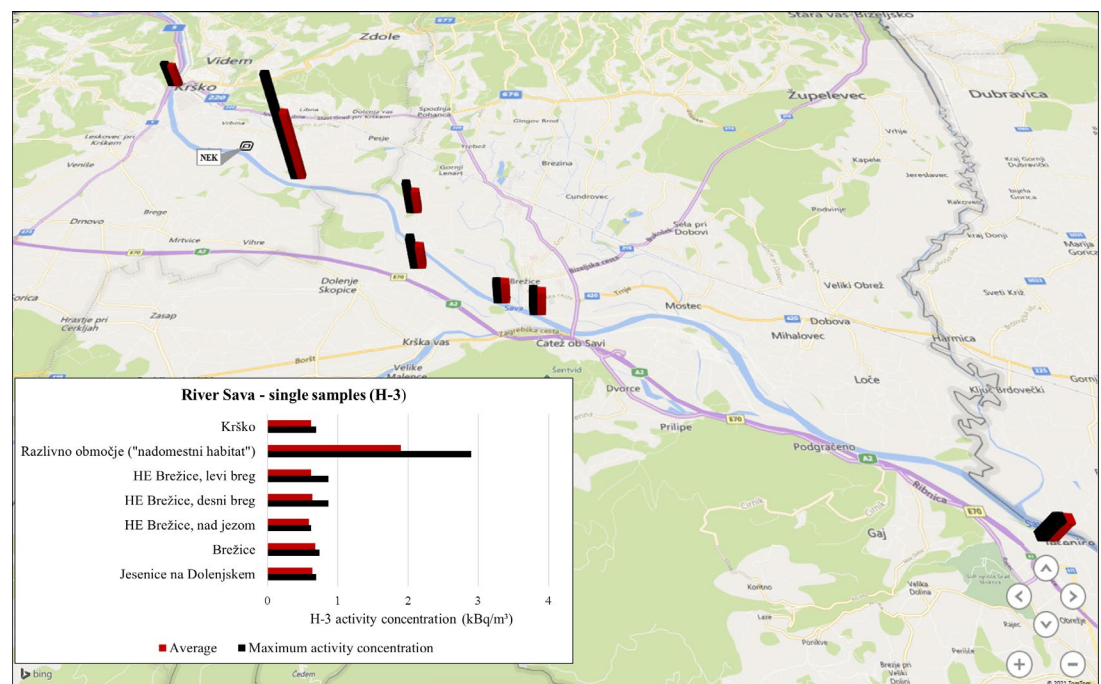


Figure I2: Review of average and highest measured activity concentrations of H-3 in the Sava River at locations upstream and downstream of the Krško NPP dam, where single (monthly or quarterly) samples are collected.

The total annual discharged activity of C-14 in the Sava was 0.3 GBq in 2020, which is an order of magnitude lower than the long-term average (1.9 GBq) since 2013. C-14 was also measured in Sava River water and fish [20]. Single samples were taken quarterly at the locations on the left and right banks of the lake of HPP Brežice. All measured specific activities are lower than the current atmospheric activities (103 pMC or 226 Bq/kg C). Compared to 2019, the specific activities of C-14 in the Sava River and fish in 2020 are the same in terms of measurement uncertainty.

I-131 is regularly present at all control points of the Sava River, both upstream from the power plant and downstream in Brežice and Jesenice na Dolenjskem. The average activity concentration of I-131 in the filtered water samples (continuous sampling) ranged from 0.53 Bq/m³ in front of the Brežice HPP dam to 1.8 Bq/m³ in Jesenice na Dolenjskem. The highest individual value was 6.5 Bq/m³ in the June sample in Brežice, below the dam of HPP Brežice. In single samples of unfiltered water, the highest activity concentration of I-131 was 8.3 Bq/m³ in the sample in Brežice taken in the first quarter of the year 2020. The average quarterly activity concentrations ranged from 1.5 Bq/m³ on the right bank of the accumulation lake to 4.0 Bq/m³ in Brežice, with the highest activity concentration in all sampling locations in the first quarter of 2020. The presence of I-131 in the river The Sava is attributed to discharges from hospitals that discharge liquid sewage 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. From the control of radioactivity in the living environment in the Republic of Slovenia in 2020 [16], we can understand that the average concentrations in the Sava River in Brežice were similar to those measured in the Sava River in Ljubljana (3.4 Bq/m^3) and are also comparable with the long-term average of 5.1 Bq/m^3 in Brežice.

No iodine was detected in the soil sediment this year.

I-131 was not detected in the fish samples from the reference sampling location (in Krško above the dam) and in the samples from the control collection points below the Krško NPP dam, which is the same as in previous years.

The annual activity of Cs-137 in liquid discharges from the Krško NPP into the Sava River was 0.9 MBq , which is less than in previous years (long-term average is 15.1 MBq).

The major component of the content of Cs-137 in the Sava River is attributed to global contamination. The calculated increase in the activity concentration of Cs-137 in Brežice due to the liquid discharges of Cs-137 from the Krško NPP is 2 E-4 Bq/m^3 , if the annual dilution ratio on the left bank in Brežice and the average flow-rate of river Sava in 2020 are used. This contribution cannot be separated from inhomogeneously distributed global contamination. The increment is three orders of magnitude lower than the measured values, making it indistinguishable from global contamination.

The average monthly activity concentrations of Cs-137 in river water (filtered water) were 0.17 Bq/m^3 at the reference point in Krško, 0.41 Bq/m^3 at HPP Brežice, and below the detection limit in Brežice. In individual samples of unfiltered water, the averages of Cs-137 activity concentrations were 0.33 Bq/m^3 in Krško, 0.52 Bq/m^3 on the left side of the accumulation lake and 0.55 Bq/m^3 on the right bank of the accumulation lake. In front of the Brežice HPP dam, in Brežice and in Jesenice na Dolenjskem, the activity concentrations of Cs-137 were below the detection limit. Activity concentrations of Cs-137 in the filter residue ranged from 0.12 Bq/m^3 to 0.43 Bq/m^3 in Brežice and up to 1.0 Bq/m^3 in Jesenice na Dolenjskem. In Krško and in front of the Brežice HPP Dam, the activity concentrations of Cs-137 in all samples of the filter residue were below the detection limits.

The measured activity concentration of Cs-137 in rivers in Slovenia varies according to the sampling location. The highest was $(9.6 \pm 0.8) \text{ Bq/m}^3$ in the Mura River [16]. The average activity concentration of Cs-137 in 2020 ranged from 0.002 Bq/m^3 in the Kolpa to 5 Bq/m^3 in the Mura.

Radioactive strontium (Sr-90) is regularly measured in Krško NPP liquid effluents. In 2020, the activity discharged into the Sava River was 0.04 MBq , which is less than in previous years. The Sr-90 in the Sava River is also attributed to global contamination, as the calculated increment in the activity concentration of Sr-90 in Brežice, taking into account annual liquid discharges and average flow of the Sava and the dilution ratio on the left bank in Brežice, is 1 E-5 Bq/m^3 . This contribution cannot be separated from inhomogeneously distributed global contamination.

Most of the strontium is dissolved in water, as the activity concentration of Sr-90 is at least ten times higher than in the filter residue. In general, strontium concentrations in water are ten times higher than for caesium. The average Sr-90 activity concentration in filtered water at the Krško reference site was 1.7 Bq/m^3 , upstream of the Brežice HPP dam 1.8 Bq/m^3 , in Brežice 1.6 Bq/m^3 and in Jesenice na Dolenjskem 2.1 Bq/m^3 . In the context of data scattering, the values are comparable with each other. Also, the Sr-90 activity concentrations in filtered water are similar to the long-term activity concentrations at these sites in the data fluctuations. The activity concentrations of Sr-90 in single samples of unfiltered water are, within uncertainty, the same as in continuously sampled samples of filtered water. At all sites, the quarterly averages ranged from 1.5 Bq/m^3 to 2.5 Bq/m^3 . The highest single measured value was 3.0 Bq/m^3 above the Brežice HPP dam - at the right bank.

The average activity concentrations of strontium in other rivers in Slovenia are similar or higher than can be measured in the Sava in Krško NPP's vicinity. The average concentration measured in the Sava at the Laze site near Ljubljana was 2.3 Bq/m^3 , in the Mura 0.3 Bq/m^3 and in the Drava 1.6 Bq/m^3 [16].



Figure I3 shows the average specific activities of Cs-137 and Sr-90 in river sediments upstream and downstream of the NEK dam. The contents of both radionuclides in the sediments are attributed to global contamination, as liquid discharges from the Krško NPP contribute to the specific activities of 5 E-4 Bq/kg for Cs-137 and 2 E-5 Bq/kg for Sr-90 in river sediments in Brežice, respectively. These contributions are negligible compared to the average specific activities of 5.2 Bq/kg for Cs-137 and 0.56 Bq/kg for Sr-90 in river sediments in 2020 in Brežice, respectively.

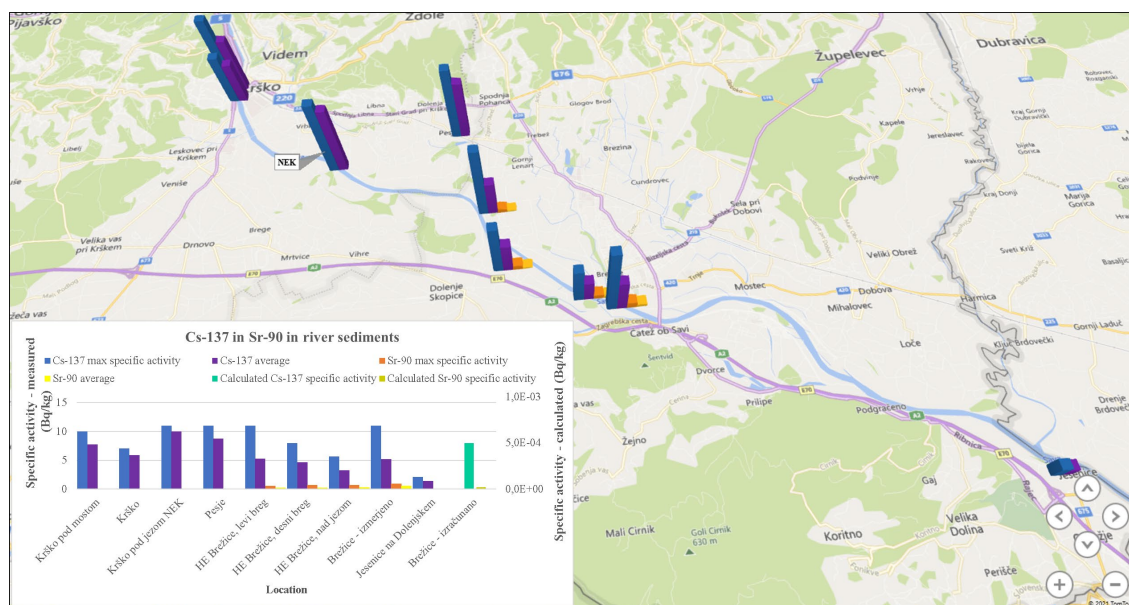


Figure I3: Specific activities of Cs-137 and Sr-90 in river sediments in 2020

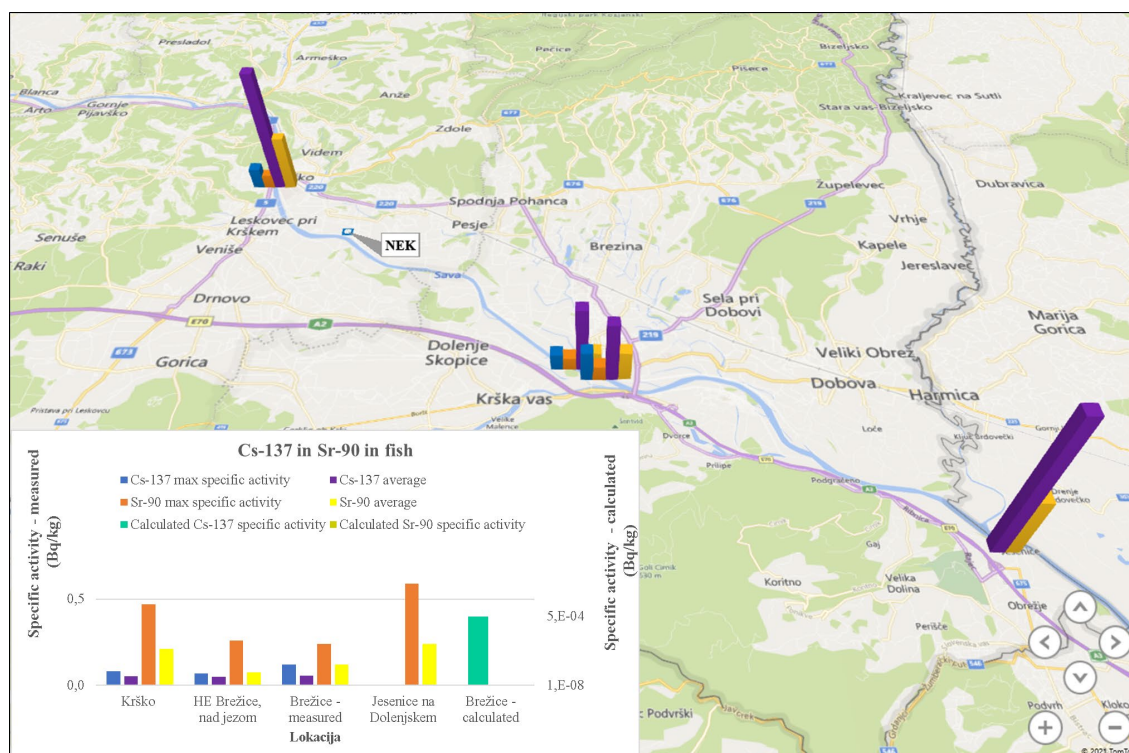


Figure I4: Specific activities of Cs-137 and Sr-90 in fish samples in 2020



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

Other fission and activation products (Co-58, Co-60, Mn-54, Ag 110m, Cs-134, Sb-125) occur regularly in NPP liquid effluents. The total activity of these radionuclides in 2020 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 species were regularly detected in all water samples. In unfiltered water, activity concentrations of U-238 up to 8 Bq/m³, Ra-226 up to 6 Bq/m³, Pb-210 up to 39 Bq/m³ and Ra-228 up to 3 Bq/m³ were observed at all sampling sites. The values are similar to those measured in rivers across Slovenia. The cosmogenic radionuclide Be-7 has also been measured regularly, with average activity concentrations ranging from 24 Bq/m³ to 63 Bq/m³. The values are similar to those measured in rivers across Slovenia. The average activity concentrations of K-40 range from 26 Bq/m³ to 52 Bq/m³ at all locations from the reference site in Krško to Jesenice na Dolenjskem. In particular, K-40 shows a marked fluctuation, which is mainly related to the contamination of rivers, but also to a lesser extent to the geological composition of the soil. The highest average concentration of K-40 activity was measured in the Savinja River at 100 Bq/m³ [16]. In sediments, specific activities of U-238 up to 53 Bq/kg, Ra 226 up to 55 Bq/kg, Ra 228 up to 62 Bq/kg and Th-228 up to 3 Bq/kg were found at all sampling sites. The average specific activities of K-40 ranged from 220 Bq/kg (Jesenice na Dolenjskem) to 560 Bq/kg (Krško below the Krško NPP dam). Be-7 was detected in sediment with the range of values from 9.3 Bq/kg to 110 Bq/kg at all locations. The specific activities of Pb 210 ranged from 32 Bq/kg to 90 Bq/kg.

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's maximum recommended values. 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 [17] is added for comparison.

In order to monitor the exchange of water between the 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, but is only used 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. Both can be used as tracers to study transport processes, and their presence in groundwater samples is interpreted as a contact between the atmosphere and groundwater. The tables with the measurement data show that Cs-137 occurs above the quantification limit in only 17 % of the samples, while in the others it was not detected. Strontium was above the quantification limit in 72 % of all drinking water and groundwater samples respectively.

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 was below the quantification limit.

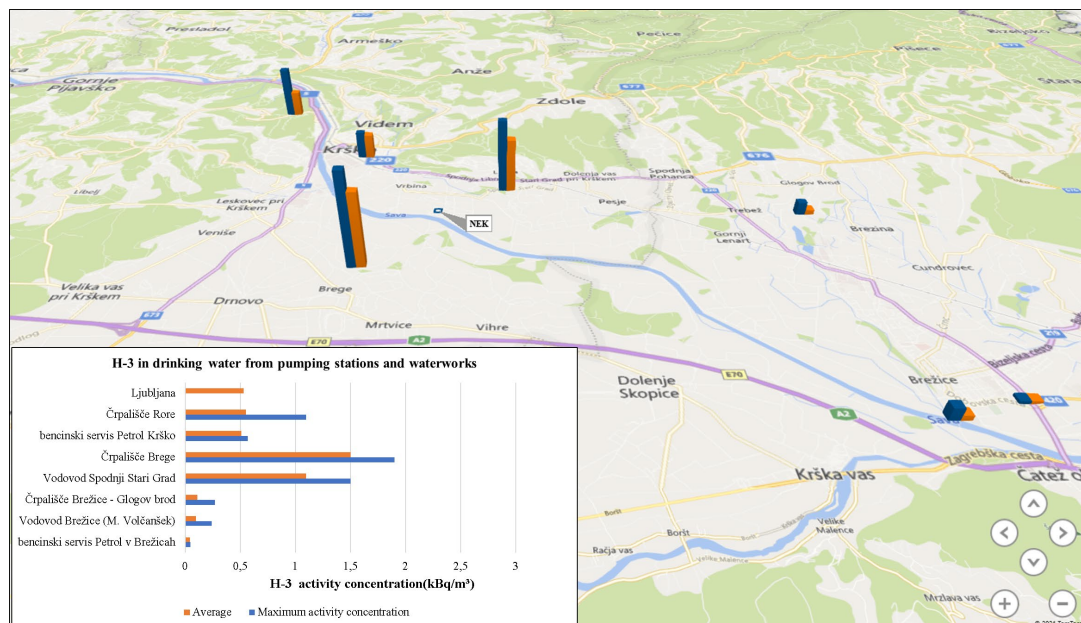


Figure I5: Review of average and highest measured activity concentrations of H-3 in drinking water from pumping stations and waterworks in the municipalities of Krško and Brežice at locations where they are sampled continuously or quarterly.

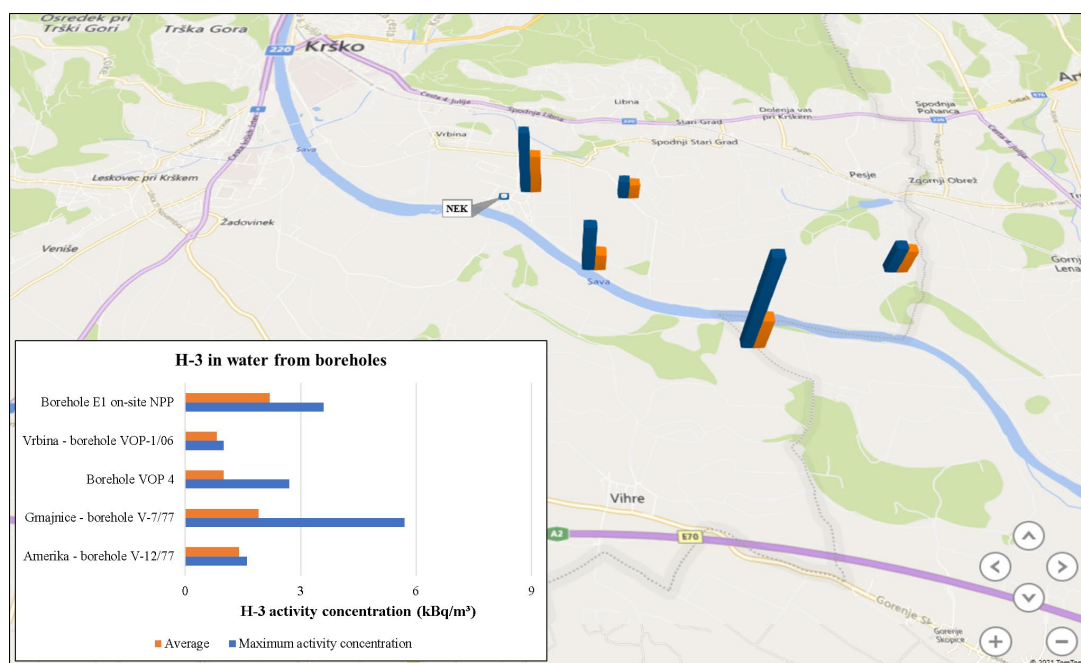


Figure I6: Review of average and highest measured activity concentrations of H-3 activity in water from the boreholes.



Activity concentrations of the natural radionuclide K-40 were measured at all sampling points. The activity concentration of K-40 was elevated in the water at the Brege pumping station and the Spodnji Stari Grad water supply, indicating external influences (fertilisation, higher water level of the Sava). At Brege, the average monthly activity concentration was 68 Bq/m^3 , and at the Lower Stari Grad water supply 53 Bq/m^3 , which is lower than in 2019. At the other pumping stations and water supply points, the average K-40 activity concentration was between 23 Bq/m^3 and 25 Bq/m^3 , which is within the range of the static data scattering, the same as in 2019.

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 average monthly values measured at the Brežice pumping station at 4.2 Bq/m^3 . The average monthly activity concentrations of Ra 226 range from 1.3 Bq/m^3 (Brežice water supply) to 3.1 Bq/m^3 (Brege pumping station). The average monthly activity concentrations of Pb 210 ranged from 2.8 Bq/m^3 in water from the Spodnji Stari Grad water supply to 6.5 Bq/m^3 in water from the Brežice water supply. In Ljubljana, the activity concentration of Pb-210 was less than 1.6 Bq/m^3 . The average monthly activity concentration of Ra-228 in the Brežice pumping station was 0.3 Bq/m^3 and in the Spodnji Stari Grad water supply was 1.2 Bq/m^3 . The average monthly activity concentrations of Th-228 ranged from 0.4 Bq/m^3 (Brežice pumping station) to 0.6 Bq/m^3 (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 1.8 Bq/m^3 in the Brežice water supply and the highest concentration was 4.9 Bq/m^3 in the Spodnji Stari Grad water supply.

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

In 2020, the annual precipitation in Ljubljana was 1263 mm, in Krško 1055 mm, in Brege 914 mm and in Dobova at least 879 mm. Precipitation amounts by location are comparable to recent years within the range of data fluctuations. The variation in annual rainfall is even more pronounced, with very little rainfall in January, which is why we were not able to obtain a representative sample. Pronounced dry months occur practically every year, not necessarily always at the same time of year.

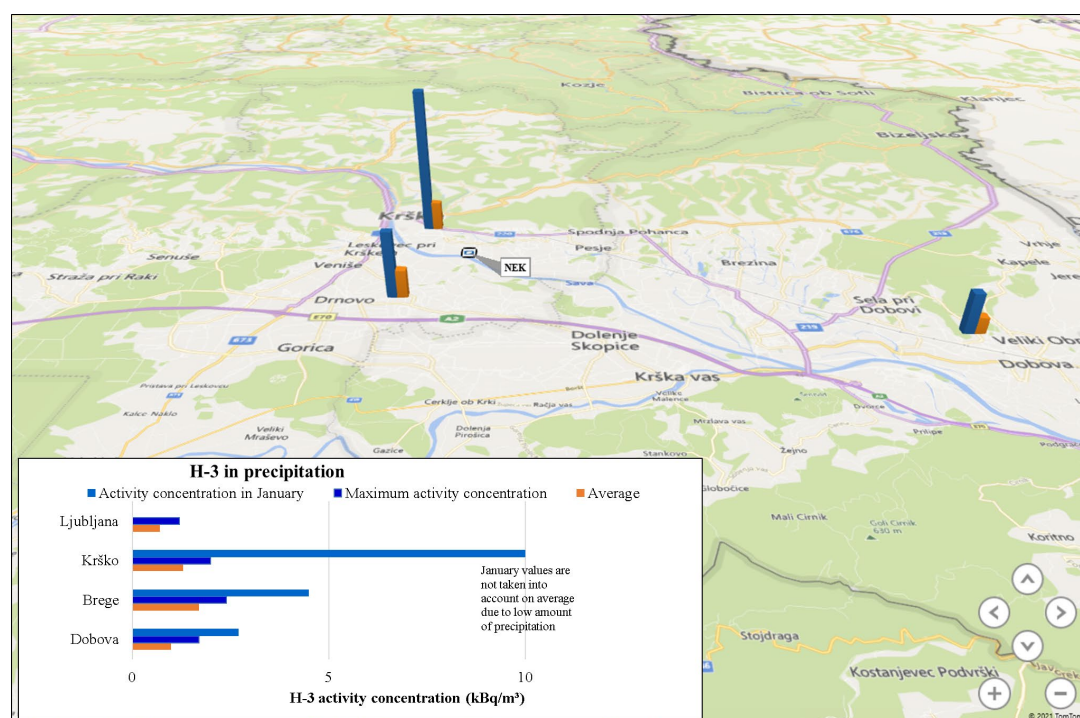


Figure I7: Review of average and highest measured activity concentrations of H-3 in precipitation



The concentration of tritium activity in precipitation varies widely and only activity concentrations above 2 kBq/m³ could be attributed to NPP discharges [39]. In 2020, the concentration of tritium activity in precipitation was higher than 2 kBq/m³ four times, three times in Brege in autumn and once in Krško in spring. The markedly high concentrations of H-3 activity in January cannot be explained and are not due to the effect of Krško NPP operation. They have not been taken into account in the calculation of the averages. The average and highest 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 looking at the annual averages, which are higher each year in Brege and Krško (Stara Vas) than in Dobova and Ljubljana. In autumn (September–November), tritium activity concentrations in Brege were higher than the average value, which is consistent with the air emissions being the highest of the year at that time. The correlation between air emissions and measured H-3 activity concentrations is moderate, with a correlation coefficient of 0.58 in Krško, 0.63 in Brege and 0.24 in Dobova, indicating a weak correlation. Thus, for the nearby locations, a moderate effect of Krško NPP discharges on the environment due to airborne H-3 emissions can be observed, while for Dobova the effect is weak. For Ljubljana (reference location), the correlation coefficient is negative.

The time course of H-3 activity concentrations at Dobova is similar to that at the reference site in Ljubljana. Monthly H-3 activity concentrations are 40% higher than in Ljubljana. Tritium activity concentrations roughly follow the normal natural annual trends of tritium in the atmosphere of the northern hemisphere, where values are generally higher in summer than in winter [38]. At the other two locations, monthly H-3 activity concentrations are 2 to 3 times higher than in Ljubljana.

The highest monthly H-3 fallout was measured in Brege, up to 0.35 kBq/m² in October. The values and time courses for Ljubljana and Dobova are comparable in the context of the value fluctuations, with peaks corresponding to months when precipitation was higher. The time courses for Krško and Brege are qualitatively similar, but slightly different from Ljubljana and Dobova. The peaks follow the months with the highest rainfall.

The highest Cs-137 activity concentration in precipitation for the sites around Krško NPP was found for the April sample in Brege (15 ± 1) Bq/m³, while in Ljubljana the highest Cs-137 activity concentration in precipitation was found in January (16 ± 20) Bq/m³. In Brege, the marked deviation of the Cs-137 activity concentration from the mean is attributed to resuspension from the soil, while in Ljubljana it is still a small amount of the collected sample, which contributed to the high uncertainty of the measurement result. Many of the measurement results have a high uncertainty, meaning that the values are below the quantification limit, and there were also (7-8 out of 12) months when Cs-137 was not detected in precipitation.

The highest measured precipitation Cs-137 levels were 0.22 Bq/m² in Ljubljana in January, 0.66 Bq/m² in Brege in April, 0.041 Bq/m² in Krško in June and 0.1 Bq/m² in Dobova in March, in all cases with low and moderate precipitation, except in Krško, where moderate precipitation fell in June. In such cases, the increase is attributed to resuspension of particles from the soil, and in winter months to solid fuel burning.

Fallout at all sites is comparable to the pre-Chernobyl values between 1982 and 1985.

Also in 2020, Sr-90 was not considered separately as all measured values were below the detection limit and thus the impact of Krško NPP operations on the environment due to Sr-90 releases cannot be assessed.

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

Although tritium H-3 (3.5 TBq) and C-14 (0.02 TBq) are the most abundant in air emissions from Krško NPP, they are not detected 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, Co-60, Te-125m, Te-127m, Cs-137 and Sr-90 were detected in the Krško NPP atmospheric effluents in 2020, but with the exception of the last two, these radionuclides were not detected at any of the seven sampling sites in the vicinity of the Krško NPP and in Ljubljana. Cs-137 and Sr-90 in the environment are mainly due to global contamination. Namely, the calculated activity concentrations of Cs-137 and Sr-90 are at least three orders of magnitude lower than the measured values at the sampling sites.

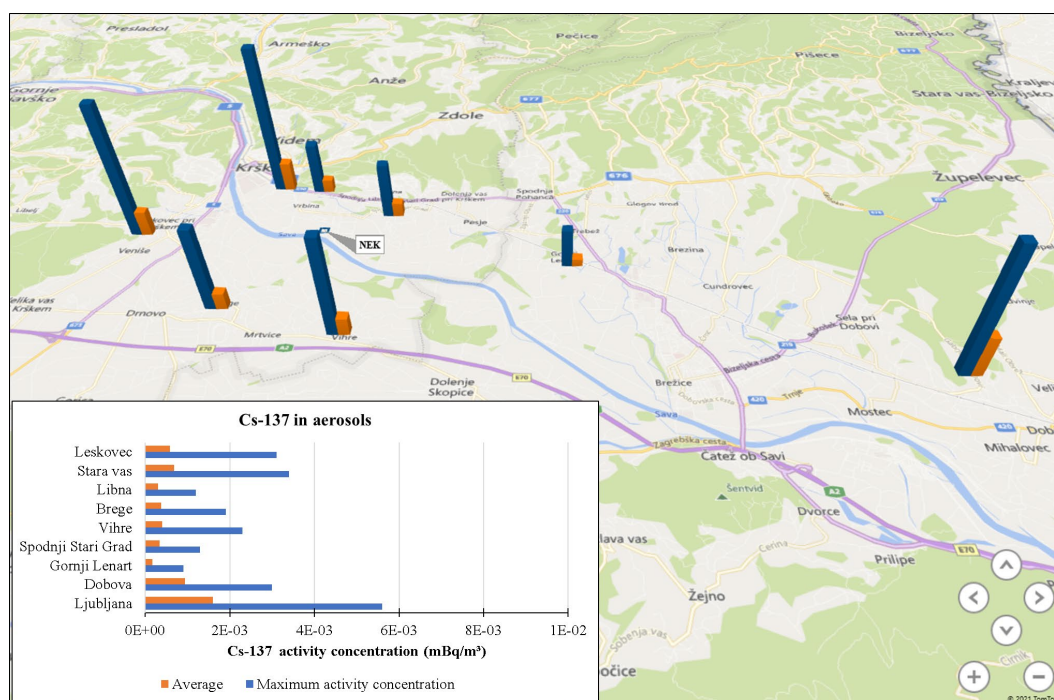


Figure I8: Review of average and highest measured activity concentrations of Cs-137 in air.

The average monthly activity concentrations of Cs-137 at sampling sites in the vicinity of Krško NPP in 2020 were lower than the long-term averages and lower than elsewhere in Slovenia. The presence of Cs-137 in the air is assumed to be due to the use of solid fuels (wood, briquettes, pellets), and to a lesser extent to 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 is added.

A slight increase in Cs-137 activity concentrations was also detected in April at the Ljubljana and Dobova sampling sites, where we use air pumps with a higher air flow. This small increase was attributed to forest fires in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant in Ukraine, where the soil is still contaminated after the 1986 accident. The plume from Chernobyl also reached Slovenia by air mass transport [28].

Measurements of Sr-90 strontium in the environment are only carried out at Dobova, and then only in three-month composite samples. The average activity concentration in 2020 was $7\text{E-}5\text{ mBq/m}^3$, but all measurement results were below the detection limit. The radionuclide Sr-89 was not detected in Krško NPP air emissions in 2020.

Radionuclide I-131 was not detected in 2020 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 ambient radioactivity 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 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 2020 are considered to be in good agreement within the uncertainties of the mean at all measurement sites in the vicinity of Krško NPP and Ljubljana. The average Be-7 activity concentration in 2020 in the vicinity of Krško NPP was 3.4 mBq/m³ and Pb-210 was 0.6 mBq/m³. In Ljubljana the average concentrations were 4.6 mBq/m³ and 0.8 mBq/m³. For other natural radionuclides (uranium and thorium isotopes of the decay chain and K-40), the differences between the individual measurement sites in the vicinity of the Krško NPP were slightly higher, but still within the measurement uncertainties and the expected deviations, which is due to the higher resuspension in the cultivated agricultural areas.

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

External radiation

External radiation to which the population 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 and 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 ([59], [60], [61]). 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 2020 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 sampling sites in the range of data scattering. The lowest annual $H^*(10)$ is at the Krško NPP fence perimeter due to a topmost layer of gravel (soil layer was removed). External radiation from the soil is further attenuated by asphalted surfaces and buildings inside the Krško NPP fence. As part of the pre-operational monitoring for the dry storage, in June 2020, we deployed 7 dosimeters at the western part of the fence. The mean half-year ambient dose equivalent (0.32 ± 0.01) mSv is comparable considering measurement uncertainties to the half-year ambient dose equivalent measured by TLDs at the NPP fence in the framework of the operational off-site environmental radioactivity monitoring. This shows that the contribution of the Krško NPP radiation effects to the ambient dose equivalent is negligible and immeasurable.

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 Chernobyl 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 isodoses² 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 13 MFM-203 meters in the vicinity of Krško NPP in 2020 gave an average value of (0.82 ± 0.09) mSv per year (ranging from 0.62 mSv to 1.08 mSv), which is the same as the annual dose equivalent obtained with the TL dosimeters within the range of the scattering of the measurement values.

² Isodoses are curves connecting areas with the same annual ambient dose equivalents, $H^*(10)$

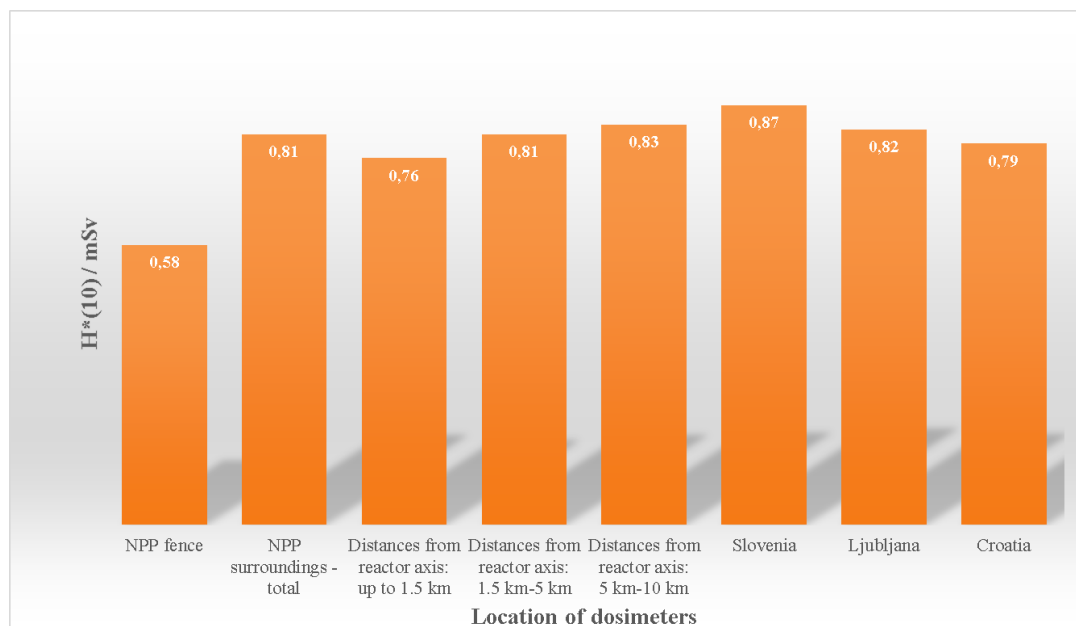


Figure I9: Comparison between average ambient dose equivalents, $H^*(10)$ measured in the environment in the vicinity of the Krško NPP, fence perimeter, at the reference location in Ljubljana, the average ambient dose equivalents measured in environments in Croatia and Slovenia.

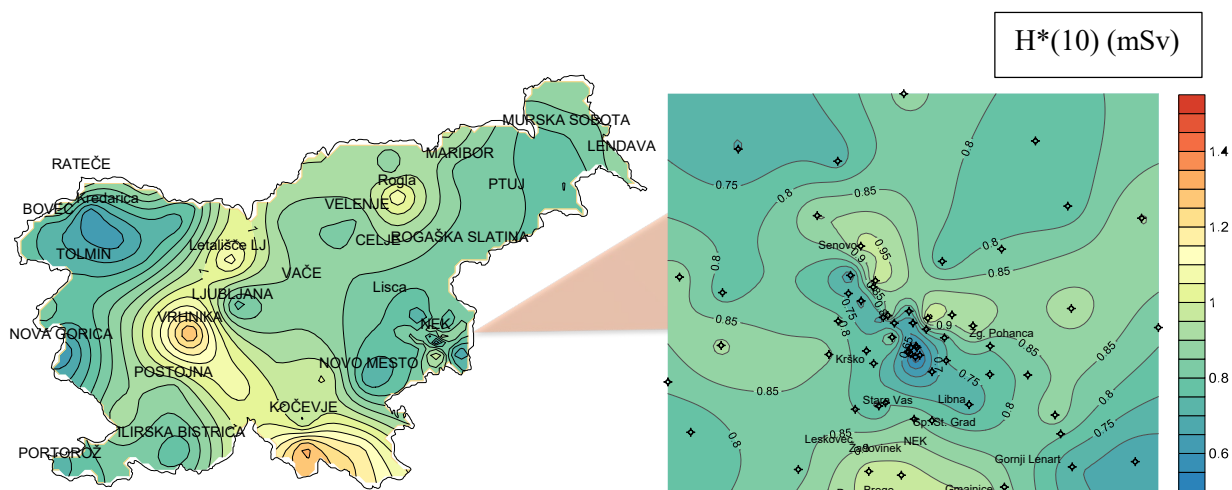


Figure I10: Average annual ambient dose equivalent $H^*(10)$ in Slovenia and in the vicinity of the Krško NPP in 2020

The average annual ambient dose equivalent from the 60 meters under the supervision of the URSJV in 2020 was (0.88 ± 0.15) mSv, ranging from 0.62 mSv to 1.17 mSv. The average annual ambient dose equivalent measured by the 60 MFM is the same as the TLD measurements in the Slovenian area in the context of benchmark fluctuation. No statistical deviations are observed compared to previous years.

The comparison between the measurement results obtained by MFM and TLD is only informative, as the MFM probes are not intended for measurements of the natural background ambient dose equivalent. From the measurement results, we find that the values measured by the MFM and TLD can vary by up to 30% at individual locations, which is due to the different ground characteristics at the locations where the MFM and TLD are posted. At the JSI meadow, where both detectors are located in close proximity, the MFM value of (0.75 ± 0.02) mSv agrees within the range of uncertainties with the TLD value of (0.82 ± 0.09) mSv.



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 2020. 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 0.003 mSv and 0.033 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 0.015 mSv to 0.052 mSv.

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 sites.

Specific activities of Cs-137 in soil in 2020 ranged from 2.5 Bq/kg at a depth of 5-10 cm in America to 63 Bq/kg at a depth of 5-10 cm also in the Gmajnice. From the measurement results, it is clear that there is considerable scattering 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 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 downward 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, and 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 in Slovenia.

The Co-60, Te-125m, Te-127m 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-228, 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 leaches more. 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 228) are in agreement with the average specific activities reported by UNSCEAR for the countries of southern Europe [53].

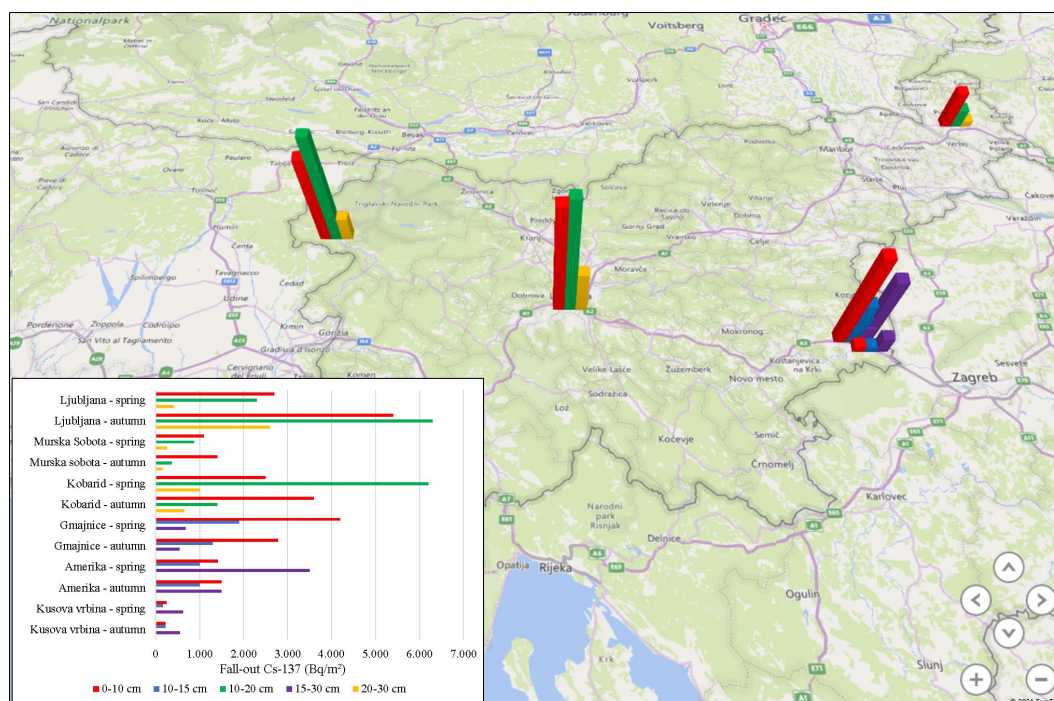


Figure I11: Fallout of Cs-137 in Slovenia (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) and in the vicinity of the Krško NPP (Gmajnice, Amerika, Kusova vršina) in 2020

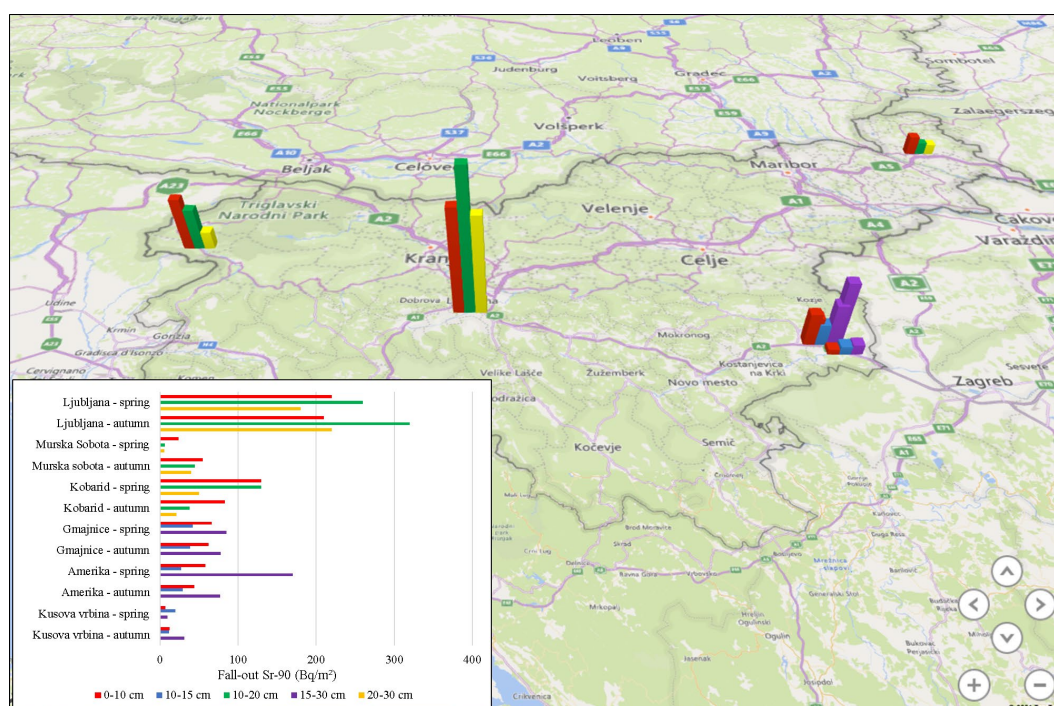


Figure I12: Fallout of Sr-90 in Slovenia (Ljubljana, Murska Sobota, Kobarid) and in the vicinity of the Krško NPP (Gmajnice, Amerika, Kusova vršina) in 2020

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 in food. The exceptions are Cs-137 and Sr-90, which are mainly part of cosmogenic or global contamination origin.

C-14 is incorporated into plants through photosynthesis, and is mainly taken up by animals and humans by ingestion of plants. In 2020, the 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, (242 ± 3) Bq per kg of carbon, was measured in maize in July (Site M, Žadovinec) [18].

The radionuclides Cs-137 and Sr-90 were detected in all food groups sampled in 2020, both in the vicinity of Krško NPP and elsewhere in Slovenia [14]. Figures I13 and I14 show the specific activities of Cs-137 and Sr-90 in individual sampled foods at locations in the vicinity of the Krško NPP. For the comparison, the amounts of Cs-137 and Sr-90 in food sampled across Slovenia are given in the legends. 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 that the levels of Cs-137 and Sr-90 in food are attributed to global contamination. The specific activities of radionuclides in food in the vicinity of the Krško NPP and elsewhere in Slovenia vary greatly, which is a consequence of uneven global contamination, orography, soil composition and other surface characteristics of the Republic of Slovenia. Within the averages' uncertainties variations for groups of foodstuff, the 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, where it reaches 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 2020, the specific activity of K-40 in food produced in the Krško-Brežice field ranged from 27 Bq/kg (cucumbers) to 399 Bq/kg (beans in grain), and in food sampled elsewhere in Slovenia from 32 Bq/kg (pears) to 176 Bq/kg (milk). 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.

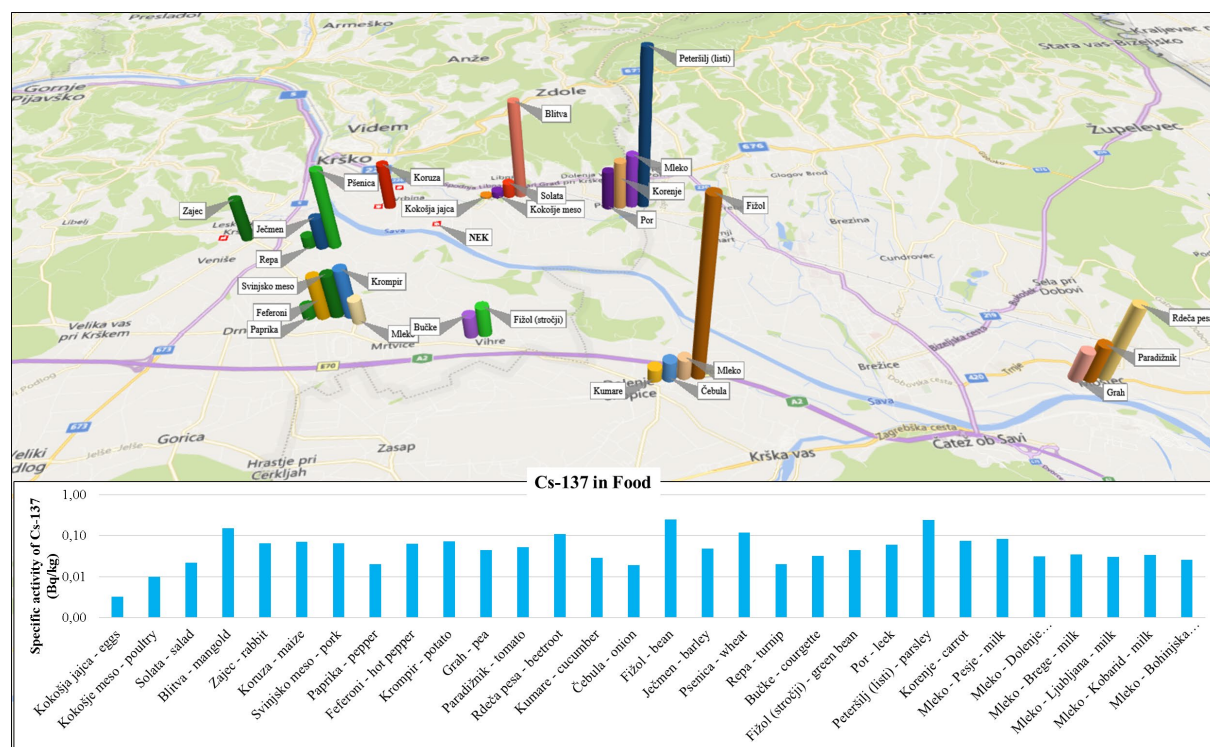


Figure I13: Specific activities of Cs-137 in food in the vicinity of the Krško NPP in 2020

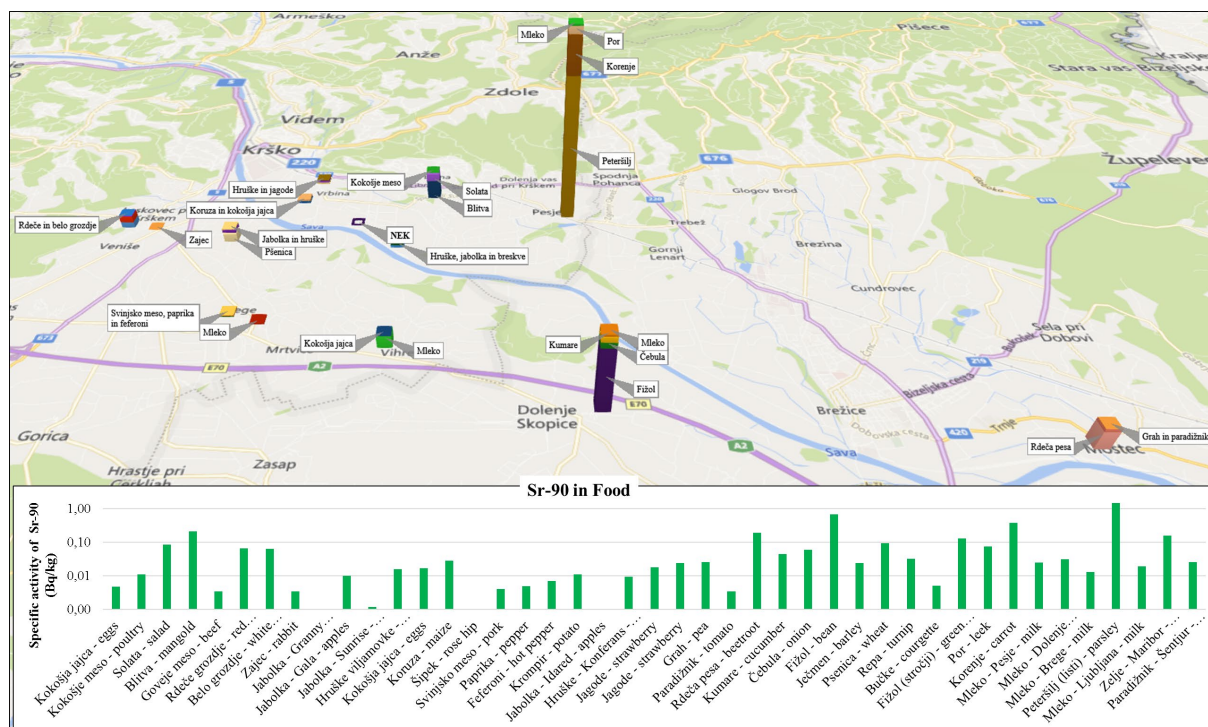


Figure I14: Specific activities of Sr-90 in food in the vicinity of the Krško NPP in 2020.

DOSE ESTIMATE

Liquid effluents (Tables A1 and A2)

With the operation of the nuclear power plant in Krško, the activity concentrations of the released radionuclides, with the exception of H-3, in the environment are well below the detection limits or it is difficult to separate the possible contribution of these radionuclides from the background (C-14, Cs-137). Therefore, their impact on humans and the environment is indirectly assessed from atmospheric and liquid discharges data. Population exposure is assessed using models describing the dispersion of radionuclides through various exposure pathways in the environment.

The construction of the Brežice hydroelectric power station and the creation of the reservoir (lake) have led to changes in the exposure pathways and routes of exposure of the population. The current assessment of the effects of released radionuclides, described below, is based on old assumptions and does not take into account all hydraulic parameters and the configuration of the Sava river channel, such as mixing at the dam, flow uncertainties, downstream flow of the Sava river into the groundwater (before the construction of the storage lake of the Brežice HPP).

Tables A1 and A2 show the dose estimates due to the liquid effluents using a model calculation. The model calculations 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 reference groups (ie fishermen fishing in the lake up to 350 m downstream of the dam of the NPP and fishermen catching fishes near the location for continuous sampling of river water in Brežice). From Tables A1 and A2 we can conclude that the annual effective doses for an adult reference person at 350 m downstream of the NPP dam, and at Brežice are 0.027%, and 0.013% of the authorized dose limit, respectively.

If the average habit characteristics of the reference person were taken into account, the effective doses received by those individuals would even be several times lower than those stated above. Thus, C-14 (74%) contributes the most to the total effective dose, with the fish ingestion as 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). In case standing a given time at the shoreline, the predominant contribution is the external radiation from Co-60 and Co-58 (89%). In case of drinking Sava water is an unlikely exposure pathway, the contribution of H-3 (100%) would prevail.

Table A1: Estimated annual effective dose of an individual from the reference population group at a location 350 m downstream the NPP dam

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	groundshine (river sediment)	Co-60	1.5 E–6
Internal exposure	Ingestion (fish)	C-14	1.2E–5

Table A2: Estimated annual effective dose of an individual from the reference population group at Brežice

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	groundshine (river sediment)	Co-60	7.1E–7
Internal exposure	Ingestion (fish)	C-14	5.6E–6

Atmospheric discharges (Tables B1 and B2)

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;
- isotopes of iodine in various physical and chemical forms, relevant for inhalation during cloud passage and for intake in milk.

Tables B1 and B2 show the evaluation of the air emissions with the model calculation of the dilution factors in the atmosphere for the year 2020 and for the individual groups of radionuclides along the most important exposure pathways for the adult population in the settlement of Spodnji Stari Grad, which is the nearest settlement outside the exclusion zone (Table B1), and along the Krško NPP fence. Estimates are also indicatively valid for a distance of 500 m from the reactor axis (Table B2). A limitation on the additional exposure of the population at the edge of the exclusion zone (500 m from the reactor axis) applies and further that the total annual effective dose contribution of all transmission pathways to an individual member of the population should not exceed 0.050 mSv. From Tables B1 and B2 it can be seen that the contributions to the annual effective dose to an adult resident at the NPP fence and also, approximately, at 500 m from the reactor axis are 0.62 % of the prescribed limit of 0.050 mSv, while the contribution at Lower Stari Grad is 0.01 % of the prescribed limit of 0.050 mSv.



Table B1: Exposure of an adult resident in Spodnji Stari Grad to ionizing radiation from atmospheric discharges from NPP in 2020

Mode of exposure	Exposure pathway	Key radionuclide	Annual effective dose (mSv)
External radiation	– cloudshine – groundshine	– noble gases (Ar-41, isotopes of Xe) – aerosols (Co-60, Cs-137)	3.6E–7 7.2E–16
Internal exposure	inhalation	H-3, C-14	6.3E–6
Internal exposure	ingestion	C-14	0*

* The measurement result is lower than the measurement uncertainty

Table B2: Exposure of an adult resident near the Krško NPP fence perimeter due to atmospheric discharges from Krško NPP in 2020. 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)	5.6E–7 4.7E–15
Internal exposure	inhalation	H-3, C-14	7.3E–6
Internal exposure	ingestion	C-14	5.0E–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 main exhaust. The model also needs the velocity of the exhaust gases and the cross section of the stack at the outlet. After consultation with Krško NPP, the flue gas temperature was set to 25 °C. The contribution of radiation from the plume was also estimated by a Gaussian model taking into account the ground discharge until 2010 [3]. The estimate for the 2020 air emission is comparable to previous years in the context of data scattering.

C-14 measurements were carried out on wheat and maize samples at the Jožef Stefan Institute in 2020. 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 5 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 population 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 population 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 the 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 isotopes replace C-12 isotopes in organic molecules.

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

Natural background (Table C)

Measurements of ambient dose radiation in the vicinity of Krško NPP in 2020 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 ionising component of cosmic radiation in the vicinity of Krško NPP was 0.90 mSv on average outdoors. This is higher than the estimate of the annual effective indoor dose of 0.83 mSv (1998). To this must be added the contribution of $H^*(10)$ neutron cosmic radiation, which for the Krško NPP area is 0.07 mSv per year. Thus, the total natural external radiation dose $H^*(10)$ in 2020 in the vicinity of Krško NPP was 0.97 mSv per year. The corresponding annual effective dose (taking into account the conversion factors from Radiation Protection 106 [69]) is 0.81 mSv per year, which is lower than the figure for the world average (0.87 mSv per year).

The specific activities of natural radionuclides in food are comparable to the global average, and we therefore adopt the conclusions of UNSCEAR [53] for the effective dose due to food intake.

The individual contributions to the natural radiation dose are summarised in Table C. The total annual effective dose is estimated to be 2.39 mSv, which is comparable to previous years and to the global average of 2.4 mSv per year within the range of the fluctuating values [53].

Primordial 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.

Table C: Effective doses E due to natural radiation sources in the vicinity of Krško NPP in 2020

Source	Annual effective dose E (mSv)
– gamma radiation and the directly ionizing component of cosmic radiation [#]	0.76
– neutron component of cosmic radiation [53]	0.06
Ingestion (K, U, Th) ([53], effective dose)	0.27
Inhalation (short-lived daughters of Rn-222, effective dose) ^{##}	1.3
Total	2.39

Note: [#] 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 [69]). Conversion factors in the 100 keV to 6 MeV energy range are between 0.84 and 0.89.

^{##} 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).

Global contamination

In 2020, as in previous years, Cs-137 and Sr-90, which originate from the Chernobyl accident and experimental nuclear explosions, were the most measurable of the 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 2020.



The contribution of Cs-137 to the external radiation was estimated to be less than 0.017 mSv per year, which is 2.5% of the average annual external dose from natural radiation in the vicinity of Krško NPP. The estimate is comparable to estimates in previous years.

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

Cs-137 and Sr-90 from nuclear tests and the Chernobyl accident have been measured in trace amounts in individual foodstuffs. The annual effective dose from ingestion of these foods was estimated for 2020 at $3 \text{ E-}4$ mSv for Cs-137 and $1.3 \text{ E-}3$ mSv for Sr-90, totalling 0.8% 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.

Table D: Summary of annual exposures of the population in the vicinity of Krško NPP for 2020

Source	Exposure pathway	Annual effective dose (mSv)
Natural radiation	- gamma radiation and the directly ionizing component of cosmic radiation	0.76 ^{**}
	- neutron component of cosmic radiation	0.06
	- ingestion (K, U, Th)	0.27
	- inhalation (Rn-222 short-lived daughters)	1.30
	Total natural radiation	2.39
Krško NPP - direct radiation at the fence of the Krško NPP	- direct irradiation from the Krško NPP buildings	indeterminable
Krško NPP atmospheric discharges (at the Krško NPP fence****)	- external dose (air immersion)	$5.6\text{E-}7$
	- groundshine (Co-60, Cs-137)	$4.7\text{E-}15$
	- inhalation (H-3, C-14)	$7.3\text{E-}6$
	- ingestion (C-14)	$5.0\text{E-}5$
Krško NPP Liquid effluent (Sava)	- reference group 350 m downstream from the Krško NPP dam	$1.4 \text{ E-}5$
	- adult in Brežice	$6.3 \text{ E-}6$
	Total radiation effects of the Krško NPP*	$7.14 \text{ E-}5$
Chernobyl accident, nuclear-weapons tests	- external dose ^{**}	$< 1.7\text{E-}2^{***}$
	- ingestion of vegetable and animal food (without C-14)	$1.5\text{E-}3$
	- ingestion of vegetable food (C-14)	$1.5\text{E-}2$
	- ingestion of fish	$8.9\text{E-}5$
	Total global contamination	$3.37 \text{ E-}2$

* The total sum of NPP's contributions is informative, as we add up the contributions that are not necessarily additive since the population groups are not the same. In the total sum, only the estimate of the annual effective dose for the reference 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 [69]).

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

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



Summary of annual exposures of the population in the vicinity of Krško NPP for 2020 (Table D)

Table D presents the individual contributions to the annual effective dose from Krško NPP emissions in 2020 for an adult at the Krško NPP fence. 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. The topsoil was removed and gravel was piled along the Krško NPP fence during the construction of the facility, 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.

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

Comparison with previous years (Table E)

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 (adults) from the nearest settlements, or reference sites, and a comparison with previous years are summarised in Table E. In this case, the largest contribution in 2020 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 with the years, with the main contribution being the decrease in the estimate due to Cs-137 radiation from soil.

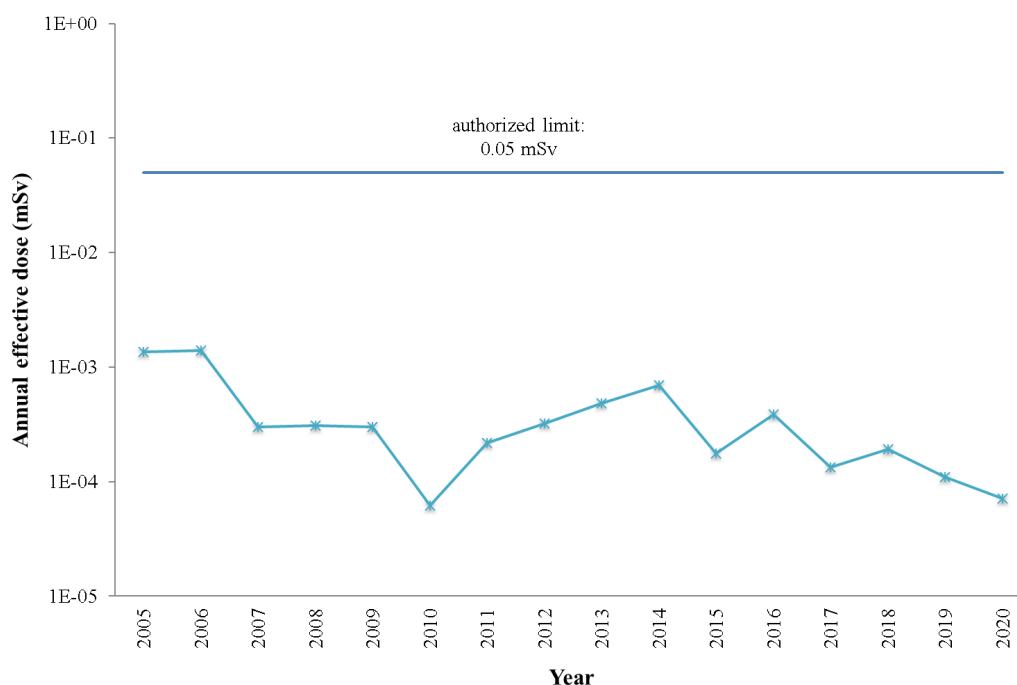


Figure I15: The sum of the estimated annual effective doses of individual reference groups due to NEK emissions from 2004 to 2020. The authorized annual limit (0.05 mSv) is also marked. The total sum of NPP's contributions is informative, as we add up the contributions that are not necessarily additive since the population groups are not the same.



Table D: Overview of annual effective doses for all artificial radionuclides delivered to adult person in the vicinity of Krško NPP through various contamination media from 2016 to 2020. 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 population in the immediate surroundings are small compared to the global contamination (Table C): they are estimated at 0.14 % 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
	2016	2017	2018	2019	2020		
River Sava	1.5 E-4	1.3 E-4	9.1 E-5	1.1 E-4	7E-5	Brežice	drinking (H-3)
	8 E-7	1.4 E-6	1.5 E-6	8.3 E-7	1.3 E-6	Brežice	swimming (Cs-137)
	1.7 E-4	0.0011	7.3 E-4	1.4 E-4	1.9 E-4	Brežice	fish ingestion (Sr-90)
Waterworks, pumping stations	3.1 E-5	3.5 E-5	3.5 E-5	2.8 E-5	3.2 E-5	Brege	drinking (H-3)
Precipitation and dry fallout	2 E-5	3.8 E-5	2.3 E-5	1.9 E-5	1.8 E-5	Brege	ingestion (H-3)
Air	5 E-7	2.4 E-4	4.6 E-7	4.5 E-7	2.7 E-7	Povprečje po lokacijah	Inhalation and immersion (Cs-137, Ru-106 (2017))
External radiation **	0.04	0.033	0.023	0.015	0.017	All locations	(Cs-137)
Food	0.0148	0.0153	0.0151	0.0152	0.01485	At the Krško NPP fence***;	ingestion (C-14*, Sr-90)
	0.0018	0.0015	0.0015	0.001	0.0015	All locations and at the Krško NPP fence***	
Total	0.057	0.0513	0.0405	0.0315	0.0337		

* 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), which was 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.

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

Figure I15 presents the sum of the estimated annual effective doses of individual reference groups due to NEK emissions from 2005 to 2020. The authorized annual limit of 0.05 mSv is marked separately. Individual contributions refer to different reference population groups and therefore the sum is only a rough estimate of the annual effective dose. From 2005 to 2011, the summation decreases, and in the years since 2012, the annual effective dose per capita at the NPP fence (estimates are also tentatively valid for a distance of 500 m from the reactor axis) has been slightly higher due to the effect of C-14 on the food chain during vegetation, but 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 2020, the summation shows the second lowest value in the last 31 years. Such low values can be attributed to the low controlled releases from Krško NPP (fuel quality) and the fact that there was no scheduled maintenance in 2020. When comparing the contributions in individual 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 compared to 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 population along the Krško NPP fence and also at a distance of approximately 500 m from the reactor axis is about 0.003% of the typical unavoidable natural background. The abstract summarises the monograph Evaluation of measurements of radioactivity in the Sava River, drinking water, precipitation, air, soil and food in the vicinity of the NPP and in Slovenia, which is an independent annex to the report Monitoring of radioactivity in the vicinity of the Krško Nuclear Power Plant, Report for 2020, internal code 5/2020, Ljubljana, April 2020.

CONCLUSION

A summary of the radiation effects on the population living in the vicinity of Krško NPP for the year 2020 is given in Table D, 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 2020, 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 population were estimated to be less than $7.14 \text{ E-5 mSv per year}$;
- the most significant contributor to the total effective dose is food ingestion (86.9%), with C-14 from atmospheric discharges being the major contributor among radionuclides;
- inhalation effective dose contributes 10.2% to the total effective dose. Among the radionuclides, H-3 from atmospheric discharges is the major contributor;
- the effective dose from external radiation contributes 2.9% to the total effective dose. Among the radionuclides, Co-60 from liquid discharges is the major contributor;
- the estimated value of the radiation effects of Krško NPP is small compared to the authorised dose limit for the population in the vicinity of the NPP (effective dose of 0.05 mSv per year at a distance of 500 m and beyond for contributions via all exposure pathways);
- the estimated value of the radiation effects of Krško NPP at the fence perimeter is approximately 0.003% of the typical unavoidable natural background. The estimate is also tentatively valid at a distance of 500 m from the reactor axis;
- the sum of all contributions of radiative effects is the second lowest in the last 31 years. The low values can be attributed to the low controlled releases from Krško NPP (quality fuel) and the fact that there was no scheduled refuelling outage in 2020. The credit for the low discharges from NPP also goes to the employees of the Krško NPP, who take exemplary care of controlling and limiting the emissions;
- the sum of the effective dose 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 primerjava rezultatov meritev iz programa neodvisnega nadzora obratovalnega nadzora med laboratoriji NEK, IJS in ZVD za leto 2020 za izbrane emisijske vzorce tekočinskih izpustov iz odpadnih merilnih rezervoarjev WMT in plinastih izpustov iz ventilacijskega izpusta iz RM-24 ter za imisijske vzorce iz okolja – posamično vzorčenje vzorcev hrane – sadja iz sadovnjakov v okolici NEK ter žitaric iz Žadovinka. Poleg tega je opravljena statistična primerjava vseh rezultatov meritev različnih vzorcev iz okolja v obdobju 2017–2020. Glede na kompleksnost postopkov vzorčenja, priprave vzorcev in meritev lahko ocenimo, da so ujemanja med sodelujočimi laboratoriji zadovoljiva, saj gre v primerjavi za obravnavo različnih okoljskih vzorcev, ki so bili sicer odvzeti na istem mestu ob istem času, vendar po različnih postopkih vzorčenja, priprave vzorcev in meritev. Na podlagi rezultatov meritev plinastih izpustov iz ventilacijskega izpusta iz RM-24 predlagamo, da bi v prihodnje prenehali s primerjavo teh meritev in da bi namesto tega sočasno sodelovali obe inštituciji – IJS in ZVD – pri neodvisnem nadzoru meritev vsebnosti umetnih radionuklidov v vzorcih WMT, ki vsebujejo merljive vsebnosti umetnih radionuklidov. V letu 2020 je bil spremenjen nabor vzorcev iz imisijskih meritev, ki je prinesel v neodvisni nadzor dodatne informacije in kvaliteto, zato predlagamo, da URSJV s tem pristopom nadaljuje v prihodnjih letih in vsako leto izbere druge vzorce iz okolja za neodvisni nadzor.

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 (Ur. l. RS 76/17, ZVISJV-1) [7] in Pravilnikom o monitoringu radioaktivnosti (JV10) (Ur. l. RS 27/18) [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 pooblašteni 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 2020* obsega tri sklope. Sklopa 1 in 2 obravnavata meritve emisij (tekoči in plinasti izpusti), medtem ko sklop 3 obravnava primerjavo vzorčenja in meritev vzorcev iz okolja (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 letu 2020 pa so na URSJV izbrali drugačen nabor vzorcev in analiz.

V letu 2020 sta pri neodvisnem nadzoru emisij NEK – tekočinskih izpustov iz odpadnih merilnih rezervoarjev (WMT) - sodelovala laboratorij NEK kot izvajalec obratovalnega nadzora in laboratorij IJS kot izvajalec neodvisnega nadzora. Za razliko od predhodnih let, ko smo primerjali rezultate meritev vsebnosti radionuklidov z visokoločljivostno spektrometrijo gama ter meritve vsebnosti H-3, sta bila v letu 2020 v programu le meritvi vsebnosti C-14 in H-3. Te meritve na vzorcih iz programa neodvisnega nadzora je izvedel IJS, odsek O-2. 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, vzorčevalec IJS tedaj prevzame vzorce v NEK. Oboji izvajalci (IJS in NEK) nato opravijo meritve prevzetih vzorcev po svojih postopkih. Meritve C-14 je opravil le IJS, odsek O-2, zato meritve C-14 v tem poročilu niso obravnavane.

Pri neodvisnem nadzoru emisij – plinastih izpustov NEK iz glavnega izpuha RM-24 v letu 2020 ni bilo sprememb v programu. Sodelovala sta laboratorija IJS kot izvajalec obratovalnega nadzora in ZVD kot izvajalec neodvisnega nadzora. Pri rednem obratovalnem nadzoru NEK mesečno pošilja filtre izvajalcu meritev (IJS). V mesecih, ko se izvaja neodvisni nadzor, pa NEK pošlje filtre najprej na ZVD. Ko na ZVD opravijo meritve, pošljejo filtre na IJS. V tem primeru so meritve opravljene zaporedoma na istih vzorcih.



Primerjava meritev aktivnosti alfa v zračnih filterih v tem poročilu ni obravnavana.

V letih 2010–2019 sta 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). Za razliko od predhodnih let je v letu 2020 program imisijskih meritev vseboval primerjavo enkratnih sezonskih vzorcev sadja in žitaric. Vzorčevalca ZVD (izvajalec obratovalnega nadzora za vzorce žitaric in neodvisnega nadzora za sadje) in IJS (izvajalec obratovalnega nadzora za vzorce sadja in neodvisnega nadzora za žitarice) sta vzorčila sadje in žitarice sočasno pod nadzorom URSJV. Vzorce žitaric sta neodvisno odvzela iz istega sode pri dobavitelju, kjer vzorči ZVD v okviru obratovalnega nadzora. Vzorce sadja sta oba izvajalca sočasno prevzela v hladilnici Evrosada. Vzorce je pripravil Evrosad, sadje je bilo vzorčeno na istem območju. Oba izvajalca sta nato pripravila vzorce in opravila meritve po svojih postopkih. V okviru neodvisnega nadzora so bile opravljene primerjave rezultatov meritev z visokoločljivostno spektrometrijo gama ter stroncija Sr-90 na vzorcih jabolk in hrušk ter ječmena in pšenice.

Tabela 1: Program nadzora emisij – tekočinski izpusti (sklop 1) za leto 2020

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 (četrletno)	4 (brez joda in žlahtnih plinov)
Specifična analiza tekočinskoscintilacijska spektrometrija H-3)	Odpadni merilni rezervoarji (WMT)		4-krat letno (četrletno)	4 (brez joda in žlahtnih plinov)

Tabela 2: Program nadzora emisij – plinasti izpusti (sklop 2) za leto 2020

VRSTA IN OPIS MERITVE	VZORČEVALNO MESTO	VRSTA VZORCA	POGOSTOST VZORČENJA	LETNO ŠT. MERITEV
Izotopska analiza sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama	Glavni izpuh RM-24	Zbirni mesečni zračni filter	4-krat letno (četrletno)	4 (brez joda in žlahtnih plinov)
Aktivnost sevalcev alfa	Glavni izpuh RM-24		2-krat letno (polletno)	2

Tabela 3: Program nadzora imisij (sklop 3) za leto 2020

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 (iste lokacije kot v obratovalnem monitoringu)	Enkratni sezonski vzorci raznega sadja (VZORČI IJS)	1-krat letno, 2 vzorca	2
		Sezonski vzorci žit (VZORČI ZVD)	1-krat letno, 2 vzorca	2
Izotopska analiza Sr-90		Enkratni sezonski vzorci raznega sadja (VZORČI IJS)	1-krat letno, 2 vzorca	2
		Sezonski vzorci žit (VZORČI ZVD)	1-krat letno, 2 vzorca	2



REZULTATI MERITEV S ČASOVNIMI POTEKI

Primerjava rezultatov meritev za leto 2020

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 $k = 1$ in da, v primeri 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 , ki so po absolutni vrednosti večje od 2.**

V tabeli 4 so podane primerjave med rezultati meritev vod iz odpadnih merilnih rezervoarjev WMT (sklop 1). Podani in primerjani so le rezultati za tritij H-3. 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 $k = 1$).

Tritij je bil določen v vseh 4 vzorcih pri obeh sodelujočih laboratorijih. Primerjava med rezultati NEK in IJS, odsek O-2, potrjuje dobro ujemanje pri vseh štirih vzorcih z absolutno vrednostjo ζ med 0,00 in 0,84, pri čemer so rezultati IJS sistematsko nižji od rezultatov NEK. Tu je treba poudariti, da so izmerjene koncentracije aktivnosti tritija zelo visoke v primerjavi z aktivnostmi v okoljskih vzorcih.

Tabela 4: Primerjava rezultatov C-14 in H-3 v tekočinskih izpustih iz WMT *

Vzorč. mesto	WMT				
Pooblaščena organizacija	IJS			NEK	H-3
Radionuklid		C-14	H-3	H-3	
Datum vzorčevanja	Koda vzorca	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)			
29. 3. 2020	KI20WWM31	1,5E+05 ± 5E+03	2,6E+09 ± 3E+07	2,6E+09 ± 3E+08	0,00
5. 6. 2020	KI20WWM61	3,0E+05 ± 1E+04	8,3E+09 ± 8E+07	8,8E+09 ± 1E+09	-0,43
22. 9. 2020	KI20WWM91	5,2E+05 ± 2E+04	9,4E+09 ± 9E+07	1,0E+10 ± 1E+09	-0,84
18. 12. 2020	KI20WWMC1	8,8E+04 ± 3E+03	2,2E+09 ± 2E+07	2,2E+09 ± 3E+08	-0,14

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



Tabela 5: Primerjava rezultatov emisijskih meritev plinastih izpustov iz ventilacijskega izpusta RM-24 *

Vzorč. mesto	RM-24											
Pooblaščenca organizacija	IJS				ZVD				ζ-preskus			
Datum vzor.	4. 2. 2020 - 3. 3. 2020	28. 4. 2020 - 2. 6. 2020	28. 7. 2020 - 1. 9. 2020	3. 11. 2020 - 1. 12. 2020	4. 2. 2020 - 3. 3. 2020	28. 4. 2020 - 2. 6. 2020	28. 7. 2020 - 1. 9. 2020	3. 11. 2020 - 1. 12. 2020	Prvi vzorec	Drugi vzorec	Tretji vzorec	Četrti vzorec
Kol. vzorca (m ³)	1200	1467	1776	1394	1200	1467	1776	1394				
Koda vzorca	K20AERM2421	K20AERM2451	K20AERM2481	K20AERM24B1	RV0560320	RV1740620	RV3600920	RV4871220				
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/m ³)											
Na-22												
Cr-51												
Mn-54												
Fe-59												
Co-57												
Co-58												
Co-60					< 4,0E-5	< 3,7E-05	< 3,0E-05	< 5,0E-5				
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												
Sn-113												
Sn-117m												
Sb-124												
Sb-125												
Te-123m												
Te-125m					7,1E-05 ± 5E-06							
Te-127m					1,6E-04 ± 1E-05							
Te-129m												
Te-132												
I-131												
I-133												
Cs-134												
Cs-137	1,3E-05 ± 5E-06			1,6E-06 ± 2E-06	< 3,7E-05	< 3,3E-05	< 2,8E-05	< 5,0E-5				
Ba-140												
La-140												
Ce-141												
Ce-144												
Fe-55												

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



Tabela 6: Primerjava rezultatov meritev sadja

Vzorč. mesto	Vrbina (Krško)					
Pooblaščen organizacija	IJS		ZVD		jabolka	hruške
Vrsta vzorca	jabolka	hruške	jabolka	hruške		
Datum vzorčevanja	12. 8. 2020	12. 8. 2020	12. 8. 2020	12. 8. 2020		
Kol. vzorca (kg)	0,30	0,40	4,18	4,93	ζ-preskus	ζ-preskus
Koda vzorca	K20HSJB1181	K20HSHR781	RV2840820	RV2850820		
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)					
U-238		† 3,2E-01 ± 3E-01				
Ra-226	† 3,2E-01 ± 2E-01	† 1,3E-02 ± 4E-02	1,5E-01 ± 8E-03	1,3E-01 ± 2E-02	0,84	-2,68
Pb-210	† 4,6E-02	† 1,0E-01 ± 4E-01	1,3E-01 ± 5E-02	4,3E-01 ± 2E-01		-0,69
Ra-228		† 6,4E-02 ± 5E-02		7,6E-02 ± 6E-02		-0,15
Th-228	† 1,6E-02 ± 2E-02	† 5,2E-02 ± 2E-02				
Th-230						
K-40	4,7E+01 ± 2E+00	5,3E+01 ± 2E+00	4,4E+01 ± 2E+00	4,7E+01 ± 2E+00	0,96	2,23
Be-7	5,6E-01 ± 1E-01	8,4E-01 ± 1E-01	6,3E-01 ± 6E-02	9,4E-01 ± 1E-01	-0,51	-0,71
I-131						
Cs-134			1,9E-02 ± 8E-03	3,6E-02 ± 1E-02		
Cs-137						
Co-58						
Co-60						
Cr-51						
Mn-54						
Zn-65						
Nb-95						
Ru-106						
Sb-125						
Sr-90	† 1,2E-03	1,6E-02 ± 2E-03	1,1E-02 ± 4E-03	1,2E-02 ± 5E-03		0,81

(†) Rezultat meritve je pod mejo detekcije.

(‡) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije.

S krepkim tiskom na sivi podlagi so označene vrednosti ζ, večje po absolutni vrednosti od 2.

Tabela 7: Primerjava rezultatov meritev žitaric

Vzorč. mesto	Žadovinec (Leskovec pri Krškem)					
Pooblaščen organizacija	IJS		ZVD		pšenica	ječmen
Vrsta vzorca	pšenica	ječmen	pšenica	ječmen		
Datum vzorčevanja	5. 8. 2020	5. 8. 2020	5. 8. 2020	5. 8. 2020		
Kol. vzorca (kg)	0,43	0,34	1,50	1,50	ζ-preskus	ζ-preskus
Koda vzorca	KI20HPPS481	KI20HPJE481	SZNEK070820	SZNEK080820		
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)					
U-238	† 1,6E+00 ± 2E+00	† 1,5E+00 ± 1E+00				
Ra-226	† 6,2E-01 ± 6E-01	† 9,4E-02 ± 2E-01	1,4E-01 ± 3E-02	7,7E-02 ± 3E-02	0,79	0,09
Pb-210	† 8,1E-01	† 9,6E-01	6,8E-01 ± 2E-01	1,6E+00 ± 3E-01		
Ra-228	† 3,1E-01 ± 6E-01	† 4,8E-01 ± 3E-01	1,1E-01 ± 7E-02	2,8E-01 ± 8E-02	0,37	0,73
Th-228	1,6E-01 ± 1E-01	† 6,6E-02 ± 9E-02	1,0E-01 ± 7E-02	1,3E+00 ± 3E-01	0,39	-3,61
Th-230						
K-40	8,6E+01 ± 3E+00	1,1E+02 ± 4E+00	9,5E+01 ± 5E+00	1,1E+02 ± 6E+00	-1,40	0,00
Be-7	† 2,3E-01 ± 2E+00	9,3E+00 ± 7E-01	1,7E+00 ± 2E-01	9,4E+00 ± 4E-01	-0,67	-0,21
I-131						
Cs-134						
Cs-137			1,2E-01 ± 2E-02	4,8E-02 ± 2E-02		
Co-58						
Co-60						
Cr-51						
Mn-54						
Zn-65						
Nb-95						
Ru-106						
Sb-125						
Sr-90	1,5E-01 ± 1E-02	1,3E-01 ± 1E-02	9,3E-02 ± 4E-02	2,4E-02 ± 1E-02	1,38	7,07

(†) Rezultat meritve je pod mejo detekcije.

(‡) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije.

S krepkim tiskom na sivi podlagi so označene vrednosti ζ, večje po absolutni vrednosti od 2.



V tabeli 5 so podane primerjave rezultatov meritev vsebnosti radionuklidov v aerosolnih filterih iz glavnega izpuha RM-24 (sklop 2). Obravnavani so le umetni radionuklidi, negotovosti v tabeli pa so podane z 68-odstotno zanesljivostjo (faktor pokritja $k = 1$). V izbranih vzorcih je IJS nad mejo kvantifikacije poročal le o Cs-137 v februarjem vzorcu ter o Te-125m, Te-127m in Cs-137 v novembrskem vzorcu. Za razliko od IJS je ZVD poročal meje detekcije za Co-60 in Cs-137 ter ni poročal o nobenem umetnem radionuklidu nad mejo kvantifikacije. Tako kot v preteklih dveh letih ne moremo pri meritvah vsebnosti radionuklidov v aerosolnih filterih primerjati nobenega rezultata. Rezultata za Cs-137 v februarjem in novembrskem vzorcu, o katerih poroča IJS, sta nižja od meje detekcije, ki jo je za ta dva vzorca določil ZVD, kar pomeni, da so rezultati konsistentni.

V mesečnih poročilih o radioaktivnih emisijah in dozi, ki jih pripravlja NEK na podlagi rednih nadzornih meritev emisij v NEK [5], so v vseh 4 mesecih (februar, maj, avgust in november) vključeni le izotopi žlahtnih plinov ksenona in argona ter H-3 in C-14, aktivnosti vseh drugih radionuklidov v aerosolih pa so bile pod njihovo detekcijsko mejo.

V tabeli 6 so prikazani rezultati meritev IJS in ZVD za vzorce sadja, v tabeli 7 pa rezultati za žitarice (sklop 3). Tu lahko med seboj primerjamo 21 rezultatov, od teh so pri štirih razlike nad mejo sprejemljivosti. Če primerjamo nabora radionuklidov, vidimo, da IJS poroča o U-238 v hruškah in žitaricah in Th-228 v sadju, ZVD pa ne. Na drugi strani pa ZVD poroča o Cs-137 v vseh vzorcih, IJS pa ne. Poudariti je treba, da so aktivnosti teh radionuklidov zelo nizke. Vrednosti ζ , ki so večje od 2, so pri Ra-226 in K-40 v hruškah ter Th-228 in Sr-90 v ječmenu. Pri vseh radionuklidih, razen pri K-40, je vzrok v nizkih vrednostih blizu detekcijskih mej, pri K-40 pa prispevajo k višji vrednosti ζ nizke negotovosti rezultatov.

V splošnem so nabori radionuklidov v poročilih obeh izvajalcev primerljivi.

Primerjava rezultatov meritev različnih vzorcev iz okolja

Pooblaščenim laboratorijem redno in v primernem obsegu sodelujejo pri mednarodnih primerjalnih meritvah, kjer z naborem 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 2020, IJS-DP-13462, marec 2021* 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.

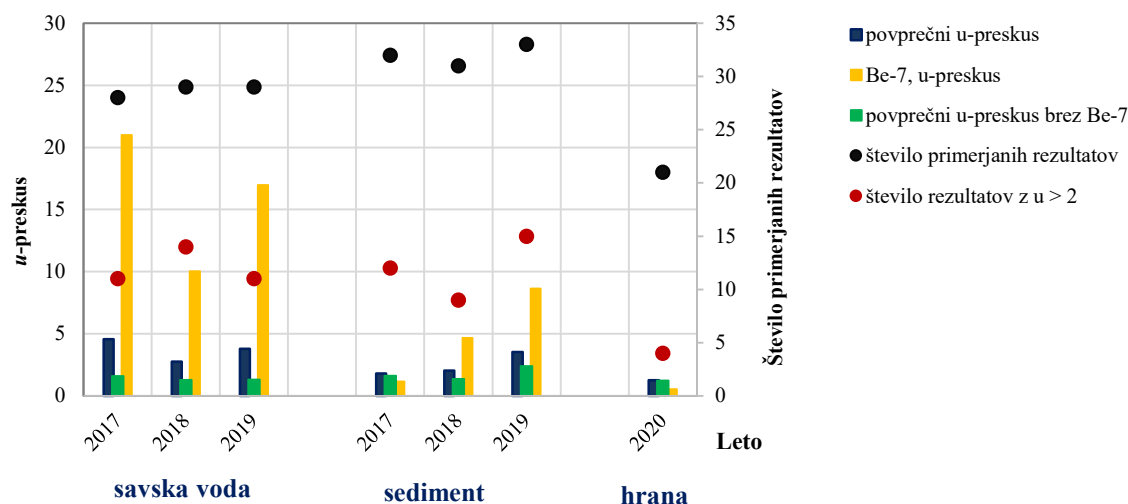
Med primerjalnimi meritvami in neodvisnim nadzorom je ključna razlika. Pri mednarodnih medlaboratorijskih primerjavah laboratoriji dobijo v analizo pripravljene vzorce z dobro definiranimi referenčnimi vrednostmi, določenimi na neodvisen način. Vzorčenja ni, v laboratoriju opravijo le zadnjo fazo priprave 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 letu 2020. Rezultati te analize so prikazani na sliki 1. Za vsako leto je bil določen povprečen u -preskus ($|z|$ -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 posebej za druge radionuklide brez Be-7. 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 s tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo v tej analizi niso upoštevani. S slike lahko razberemo, da so največji odmiki pri savski vodi in najmanjši pri vzorcih hrane. 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 sode ali območja bolje določeno in enolično, kar sekaže s skladnimi rezultati in manjšimi vrednostmi u -preskusa.



Slika 1: Statistična obdelava rezultatov meritev savske vode in sedimentov v Krškem in Brežicah za obdobje 2017–2019 ter hrane v letu 2020

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.

Pri neodvisnem nadzoru emisijskih meritev plinastih izpustov, vzorčenih v ventilacijskem izpustu u pred RM-24, je vsebnost izmerjenih radionuklidov premajhna, da bi lahko opravili kakršno koli primerjavo. Pri meritvah vzorcev tekočinskih izpustov iz WMT smo v letu 2020 opravili le primerjavo rezultatov za H-3 in potrdili dobro ujemanje.

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, saj so to edini vodni vzorci, ki lahko vsebujejo merljive koncentracije aktivnosti umetnih radionuklidov. 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. **Poleg tega predlagamo, da bi vzorce za primerjavo odvzeli med rednim remontom NEK in neposredno po njem, ko je v vzorcih lahko več umetnih radionuklidov, kar omogoča bolj kakovostno primerjavo.**



Glede na kompleksnost postopkov lahko kljub vsemu trdimo, da so ujemanja med izvajalci obratovalnega nadzora in neodvisnega nadzora pri imisijskih meritvah zadovoljiva, saj gre za obravnavo različnih realnih vzorcev, ki so bili sicer odvzeti na istem mestu ob istem času, vendar se postopki vzorčenja, priprave za analizo in samih analiz v obeh laboratorijih razlikujejo. Prepoznana neskladja med objavljenimi rezultati pooblaščenih izvajalcev pri neodvisnem nadzoru imisij v okolju lahko v veliki meri pripišemo vzorčenju in nehomogenosti vzorčenega materiala. Iz teh primerjav lahko sklepamo, da sta vzorčenje in priprava tista elementa postopka, ki lahko bistveno vplivata na rezultate meritve, zato bi bilo v prihodnje tema elementoma smiselno nameniti dodatno pozornost in ustrezno dopolniti program meritev v okviru neodvisnega nadzora.

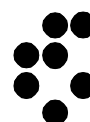
Na podlagi rezultatov statistične primerjave vseh rezultatov v okviru neodvisnega nadzora v obdobju od 2010 do 2020 ponovno poudarjamo naslednje sklepe:

- predlagamo, da bi v prihodnje ukinili primerjavo plinastih efluentov in bi namesto tega ponovno uvedli visokoločljivostno spektrometrijo gama pri neodvisnem nadzoru tekočinskih emisij (WMT), kjer bi sodelovala 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;
- poleg tega predlagamo, da tudi v prihodnjih letih URSJV nadaljuje z novim pristopom in vsako leto izbere za neodvisni nadzor drugi nabor okoljskih vzorcev in meritev iz programa obratovalnega nadzora, saj lahko na ta način bolje ocenimo, kje so potrebne izboljšave pri delu pooblaščenih izvajalcev.

OVREDNOTENJE MERITEV RADIOAKTIVNOSTI V REKI SAVI, PITNI VODI, PADAVINAH, ZRAKU, ZEMLJI IN HRANI V OKOLICI NEK IN PO SLOVENIJI



Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija





OVREDNOTENJE MERITEV RADIOAKTIVNOSTI V REKI SAVI, PITNI VODI, PADAVINAH, ZRAKU, ZEMLJI IN HRANI V OKOLICI NEK IN PO SLOVENIJI

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 rečni vodi, sedimentih in ribah

mag. Matjaž Stepišnik, 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

dr. Matjaž Korun, IJS

Radionuklidi v hrani

prof. dr. Katarina Vogel Mikuš, BF

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

Prva izdaja: april 2021

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

539.16:502.175(497.4)
621.311.25(497.4Krško)

OVREDNOTENJE meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi,
padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji /
[urednika Benjamin Zorko in Denis Glavič - Cindro]. - 1. izd. -
Ljubljana : Institut "Jožef Stefan", 2021

ISBN 978-961-264-211-2
COBISS.SI-ID 56586243

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: 55 izvodov



VSEBINA

Predgovor urednika

1	Radioaktivnost v rečni vodi, sedimentih in ribah	1 / 106
2	Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi	21 / 106
3	Radioaktivnost v usedih	37 / 106
4	Zrak	49 / 106
5	Zunanje sevanje	71 / 106
6	Radionuklidi v hrani	87 / 106
7	Reference	103 / 106





PREDGOVOR UREDNIKA

Monografija *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji* obravnava stanje v okolju v okolici Nuklearne elektrarne Krško (NEK) v obdobju 31. gorivnega ciklusa delovanja jedrske elektrarne. Je samostojna priloga poročila *Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2020*, interna oznaka 9/2021. 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 oziroma z jedrskimi snovmi, lahko pa radioaktivni izotopi pridejo tudi v okolje zaradi zaradi kontroliranih izpustov iz jedrskih, medicinskih, raziskovalnih in industrijskih objektov. 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 predvidene letne efektivne doze ali okoljski dozni ekvivalent zračnih in tekočinskih izpustov iz NEK na referenčno skupino ljudi po starostnih skupinah (odrasli, otroci in dojenčki), ki živijo v neposredni bližini jedrske elektrarne. 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.

Koncentracije aktivnosti (v tekočinah, zraku) ali specifične aktivnosti (v hrani, zemlji) sevalcev gama so v okolju nizke, zato pri vzorčenju in pripravi vzorcev uporabljamo metode, s katerimi sevalce gama v vzorcu koncentriramo (filtriranje, izparevanje). Kadar je negotovost merskega rezultata večja od izmerjene



vrednosti, bi to pomenilo, da znaten del verjetnostne porazdelitve, ki opisuje spremenljivko, leži v območju negativnih vrednosti, ki ne opisujejo realnega fizikalnega stanja. Z leti smo v raziskavah našli ustrezne načine računanja in poročanja o majhnih vrednostih [43]. 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 zmožnosti (CMC) na ravni regionalnih metroloških organizacij in Mednarodnega biroja za mere in uteži (BIPM) za aktivnosti (Bq/kg). Tako lahko dokazujemo visoko znanstveno-raziskovalno ter strokovno usposobljenost tako za izvedbo meritev kot tudi za njihovo objavo in ovrednotenje.

Monografija *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji* 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 rečni vodi, sedimentih in ribah* tako razlagamo učinek tekočinskih izpustov NEK na okolico in referenčno skupino ljudi (ribiči), vse do vnosa radionuklidov v telo (efektivna doza zaradi notranjega obsevanja) in tudi zunanjega sevanja (efektivna doza zaradi zunanjega obsevanja). 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. Pri tem je mogočih več poti zunanjega in notranjega obsevanja. 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 *Zrak* o radioaktivnosti 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. V razširjenem analitičnem pristopu razlage merskih rezultatov smo pokazali, da bi mogli opaziti in pravilno tolmačiti tudi hipotetični učinek NEK na okoljski dozni ekvivalent. Poglavje *Radionuklidi v hrani* opisuje in razlaga vplive na prebivalstvo zaradi zaužitja hrane, ki je pridelana na krško-brežiškem polju in se kritično primerja s podatki po Sloveniji. Obravnavo smo dopolnili s statistično analizo, kar bogati kritično presojo podatkov in predstavlja dodano vrednost k celotni monografiji. V zadnjem poglavju so zbrane vse reference, uporabljene v monografiji *Ovrednotenje meritev radioaktivnosti v reki Savi, pitni vodi, padavinah, zraku, zemlji in hrani v okolici NEK in po Sloveniji*.

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-strokoven 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 efektivne 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 efektivnih 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 izrazju, 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.

B. Zorko

doc. dr. Benjamin Zorko, odgovorni urednik

1 RADIOAKTIVNOST V REČNI VODI, SEDIMENTIH IN RIBAH

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, kot tudi z uporabo modela.

V letu 2020 je bila skupna aktivnost tekočinskih izpustov v okolje precej nižja kot v letu 2019. 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 je posledica uporabe tega radionuklida v terapijski in diagnostični rabi v bolnišnicah. 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 0,014 μSv na leto.

UVOD

Nadzorni program meritev na reki Savi obsega meritve v okolju (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 se izpuščajo v reko Savo skozi kanal bistvene oskrbne vode (ESW – Essential Service Water), ki je pred jezo 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.



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.



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 radionuklidov so zaradi globalne kontaminacije in medicinske uporabe radioaktivnih snovi povsod v okolju tudi umetni radionuklidi: stroncij (Sr-90), cezij (Cs-137) in jod (I-131).

Učinke na okolje ocenjujemo iz neposrednih meritev izpustov (emisij) in z uporabo modela, ki je natančneje opisan v poročilu *Izpostavitev referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo (IJS-DP-10114)* [22], [23]. Model 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.

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

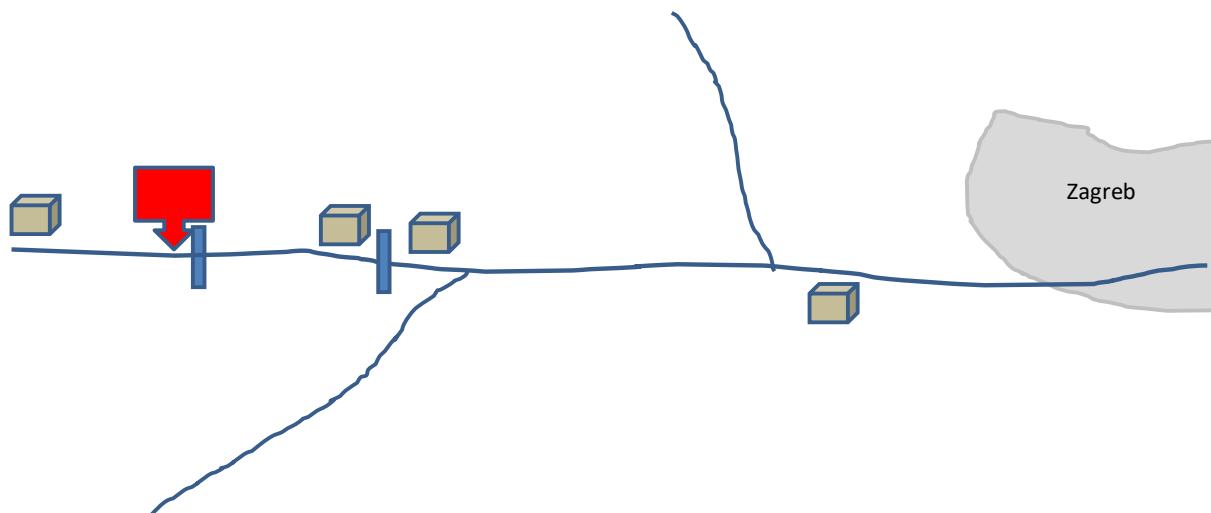
OKOLJSKI VZORCI

Značilnosti vzorčenja

Neprekinjeno vzorčenje reke Save je potekalo v rečni matici na štirih lokacijah (slika 1.2), in sicer v Krškem pred papirnico (3,2 km vzvodno od NEK), pri HE Brežice (nad jezom, 7,2 km nizvodno od NEK), v Brežicah (8,2 km nizvodno od NEK in 400 m nizvodno od starega mostu) in v Jesenicah na Dolenjskem (17,5 km nizvodno od NEK). Prvi vzorčevalnik za neprekinjeno vzorčenje na referenčnem odvzemnem mestu Krško (v črpalni postaji za tehnološko vodo papirnice Vipap) deluje tako, da se zbirajo in merijo vzorci četrtletno, razen za tritij, ki se vzorčuje mesečno. Po izgradnji jeza HE Brežice je bila v letu 2017 zgrajena nova avtomatska vzorčevalna postaja HE Brežice, ki je na levem bregu Save 100 m nad jezom (sliki 1.2 in 1.3). Košara za zajem vode je na sredini jeza HE Brežice v najnižjem delu v rečni matici. Tudi vzorčevalna postaja v Brežicah je na levem bregu, rečna vodna 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 preko filtrov, tako da se ločeno zbira filterški 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 neodvisne organizacije ZVD, IRB in IJS. Neprekinjena vzorčenja sestavljenih dnevnih vzorcev savske vode so namenjena predvsem za določanje povprečne koncentracije aktivnosti dolgoživih radionuklidov. Pri tem se ločeno merita voda in filterški 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 natančneje ocenimo koncentracije aktivnosti kratkoživega joda (I-131).

Ločen odvzem posamičnih vzorcev vode je tako potekal na osmih lokacijah in sicer v Krškem, v razlivnem območju ("nadomestni habitat" 1,7 km nizvodno od NEK), na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice (4,5 km in 5,5 km od NEK), neposredno nad jezom HE Brežice (ob avtomatski postaji), v Brežicah pod starim mostom, v Jesenicah na Dolenjskem in v kraju Podsused pri Zagrebu (okrog 30 km nizvodno od NEK). Lokacija na razlivnem območju je namenjena spremljanju vode za zapornim 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 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 jezo v NEK (desni breg), pri Pesju (na levem bregu), na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice, neposredno nad jezo 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 se je merila 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 okrog 200 g); vzorčenje gibljevih sedimentov, ki vsebujejo več organske snovi, se od leta 2005 ne izvaja več;
- vzorčenje in meritve rib vrst klen, podust, krap, som, mrena, plotica in deverika z maso okrog 500 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 2020, IJS-DP-13462, marec 2021*, 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 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 na dušiku. 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 kBq/m³ na 150 kBq/m³ v letu 1963 [21]. Do danes se je zaradi radioaktivnega razpada in prehoda v oceanske vode koncentracija aktivnosti H-3 v deževnici znižala na prvotnih 0,6 kBq/m³. Tritij je edini radionuklid, ki ga je mogoče sistematično spremljati v okolju in je nedvomno posledica izpustov NEK. Zato je uporaben kot sledilec in z njegovo razredčitvijo ocenimo tudi koncentracije drugih radionuklidov, ki jih v okolju navadno ne zaznavamo [23].

Tritij je redno prisoten v tekočinskih efluentih NEK. Na sliki 1.4 so prikazane primerjave koncentracij aktivnosti tritija v savski vodi na lokacijah Krško, HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem v letu 2020.

Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 nad jezo HE Brežice 1,12 kBq/m³ je višje od koncentracij aktivnosti na referenčnem odvzemnem mestu Krško 0,56 kBq/m³. V Brežicah (pod jezo HE) je povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti 1,06 kBq/m³, kar je v okviru merilne negotovosti enako kot nad jezo HE Brežice. Povprečje koncentracij aktivnosti H-3 v Brežicah je nižje od dolgoletnega povprečja 3,0 kBq/m³ za zadnjih 20 let. Izmerjena povprečja koncentracij aktivnosti v Jesenicah na Dolenjskem (letno

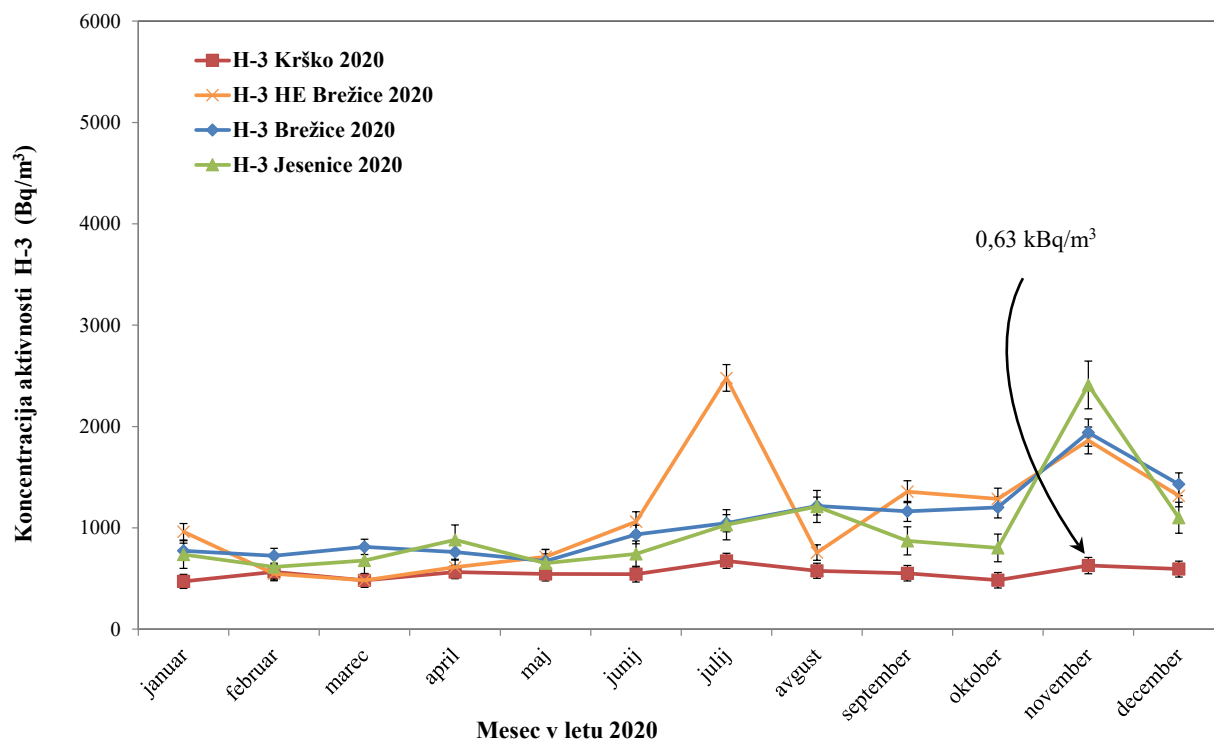


povprečje $0,98 \text{ kBq/m}^3$) so pričakovano nižja kot v Brežicah zaradi dodatnega redčenja Save s Krko in Sotlo.

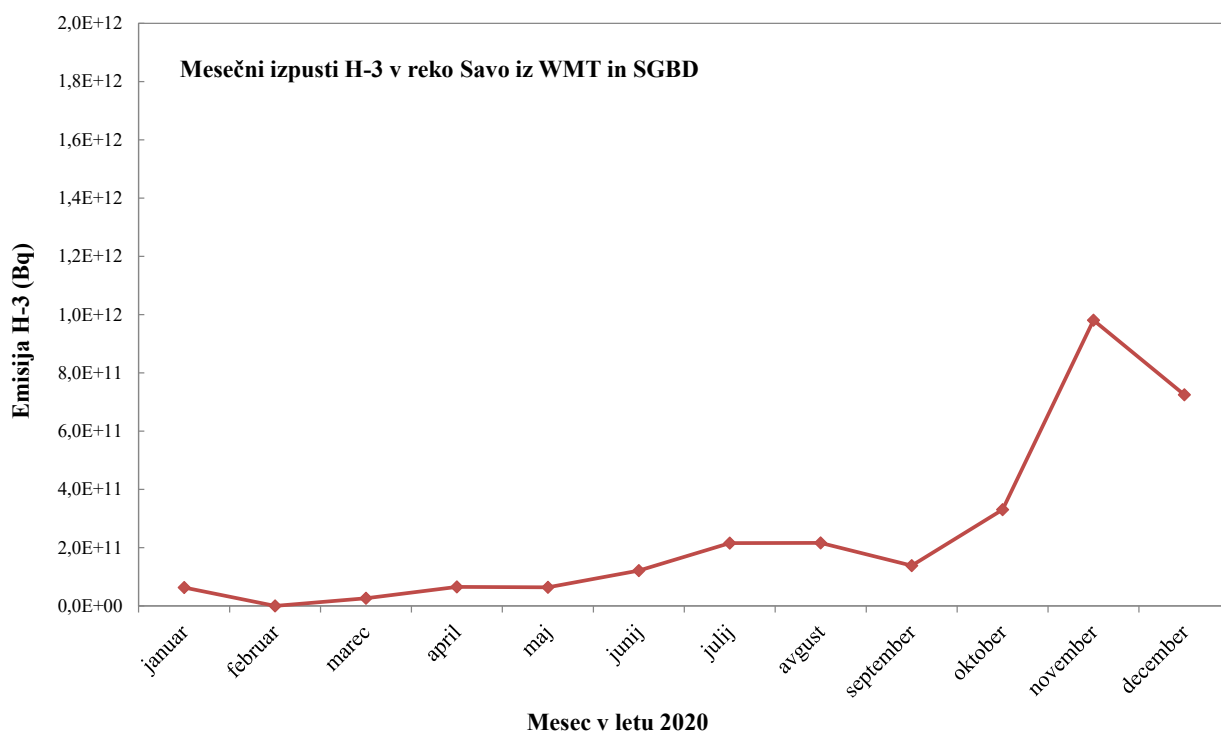
Glede na precej nižje mesečne koncentracije se rezultati meritev iz vzorčevalnih postaj HE Brežice in Brežice ujemajo nekoliko slabše. Izstopa julijska meritev v HE Brežice ($2,5 \text{ kBq/m}^3$), ki je precej višja, kot jo lahko izmerimo v Brežicah ($1,0 \text{ kBq/m}^3$) ali v Jesenicah na Dolenjskem ($1,0 \text{ kBq/m}^3$). Pričakovali bi primerljive aktivnosti koncentracije. Odstopanje ne znamo pojasniti.

Po podatkih NEK so bili največji mesečni tekočinski izpusti H-3 opravljeni v novembru ($0,98 \text{ TBq}$, slika 1.5), kar je bistveno manj kot je bil največji mesečni izpust v letu 2019 ($5,6 \text{ TBq}$). Skupni letni izpust $2,95 \text{ TBq}$ je bil prav tako bistveno manjši kot v letu 2019 ($13,6 \text{ TBq}$) in tudi manjši od dolgoletnega povprečja ($11,8 \text{ TBq}$ od 1999 do 2020). Zaradi tega je tudi časovna korelacija med izpusti in mesečnimi izmerjenimi koncentracijami aktivnosti nizvodno od NEK manj izrazita. V novembru je bila povišana tudi koncentracija aktivnosti H-3 na vseh odvzemnih mestih nizvodno od NEK ($1,9 \text{ kBq/m}^3$ – $2,4 \text{ kBq/m}^3$) in je bila približno 4-krat višja kot na referenčnem odvzemu v Krškem. Meseca novembra je bil vodostaj reke Save blizu povprečja ($157 \text{ m}^3/\text{s}$). Opažamo, da je bila v tem mesecu najvišja izmerjena koncentracija aktivnosti v Jesenicah na Dolenjskem, kar ni običajno in je lahko posledica vzorčevalnih in merskih negotovosti. V letu 2019 je bilo največje mesečno povišanje kar 25-krat višje od referenčnega odvzema (v tem letu le 4-krat višje). Meritve tritija na lokacijah Brežice in Krško je opravil IJS, medtem ko je meritve na Hrvaškem izvajal IRB.

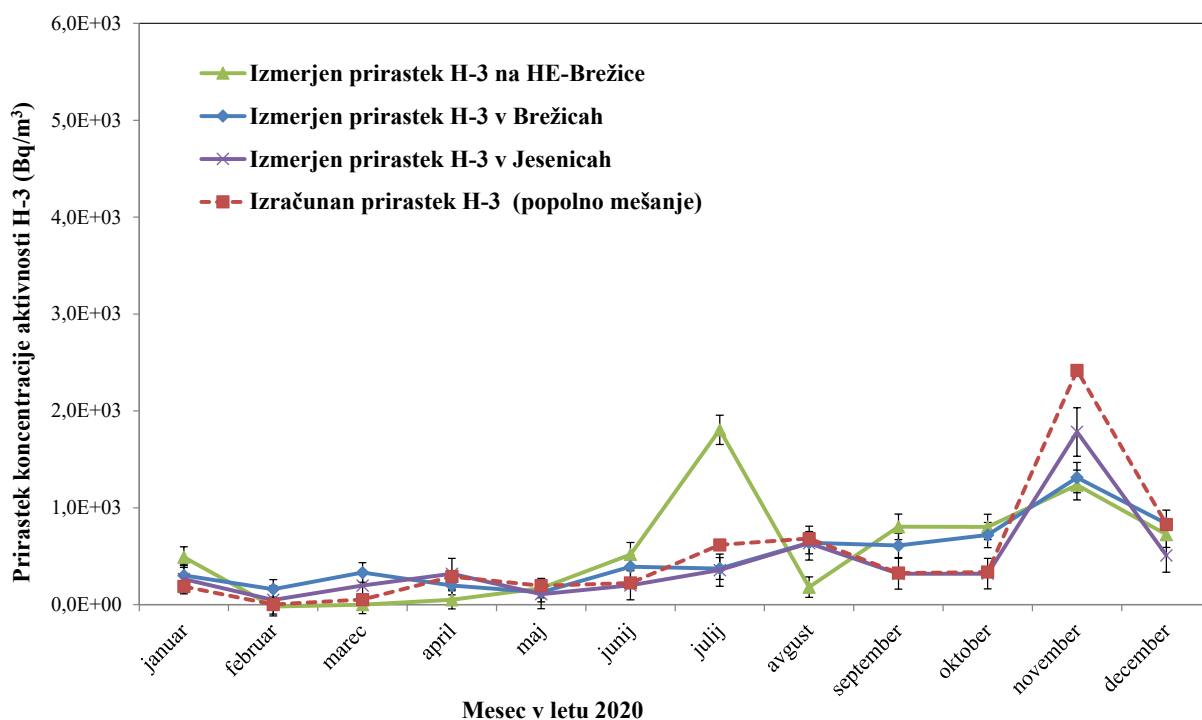
Zaradi nizkih izpustov nismo zaznali povišanih koncentracij aktivnosti H-3 v posamičnih vzorcih nefiltrirane Savske vode na vseh lokacijah nizvodno od NEK (najvišja izmerjena posamična koncentracija aktivnosti je bila $0,87 \text{ kBq/m}^3$). Izstopa razlivno področje ("nadomestni habitat" $1,7 \text{ km}$ nizvodno od NEK), kjer smo zaznali stalno povišanje H-3 v posamičnih vzorcih. Najvišja izmerjena posamična koncentracija aktivnosti je bila $2,9 \text{ kBq/m}^3$. Površinska voda iz razlivnega območja ni neposredno povezana s tekočo vodo iz Save. Sklepamo, da so povišane koncentracije aktivnosti najverjetneje posledica preteklih izpustov.



Slika 1.4: Primerjava koncentracij aktivnosti tritija v savski vodi na lokacijah Krško, HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem. Lokacija Krško je glede na tok Save pred elektrarno in je zato referenčna. Na tej lokaciji je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v letu 2020 $0,63 \text{ kBq/m}^3$.



Slika 1.5: Mesečni tekočinski izpusti H-3 iz NEK



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 vseh letih je tudi redno povišana koncentracija tritija v podzemni vodi v vrtini VOP-4 (blizu levega brega Save, 600 m nizvodno od jezua NEK). V tem letu je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 precej nižje ($1,0 \text{ kBq/m}^3$) kot v preteklem letu ($6,7 \text{ kBq/m}^3$ v letu 2019). Najvišja izmerjena posamična koncentracija aktivnosti $2,7 \text{ kBq/m}^3$ je bila v decembru (glej tudi poglavje *Radioaktivnost v pitni in podzemni vodi*), kar je precej manj kot predhodnem letu (46 kBq/m^3 v letu 2019). V drugih rekah v Sloveniji je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 kot sicer, večinoma pod 1 kBq/m^3 [16].

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. Opazno je predvsem odmikanje izmerjenega prirastka H-3 na HE-Brežice v juliju.

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 jezua 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 jezua HE Brežice so se hidrodinamske razmere nekoliko spremenile.

Po dosednji metodologiji ocenimo razredčitveno razmerje DR (*Dilution Ratio*) na različnih lokacijah pod jezom NEK kot razmerje med prirastkom koncentracije aktivnosti tritija na danem mestu pod izpustom (npr. v Brežicah) in prirastkom koncentracije aktivnosti tritija na mestu s popolnim mešanjem vode:

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

kjer sta $C_{w,L}$ in $C_{w,tot}$ prirastka koncentracij aktivnosti tritija na določeni lokaciji in na mestu popolnega mešanja [23].

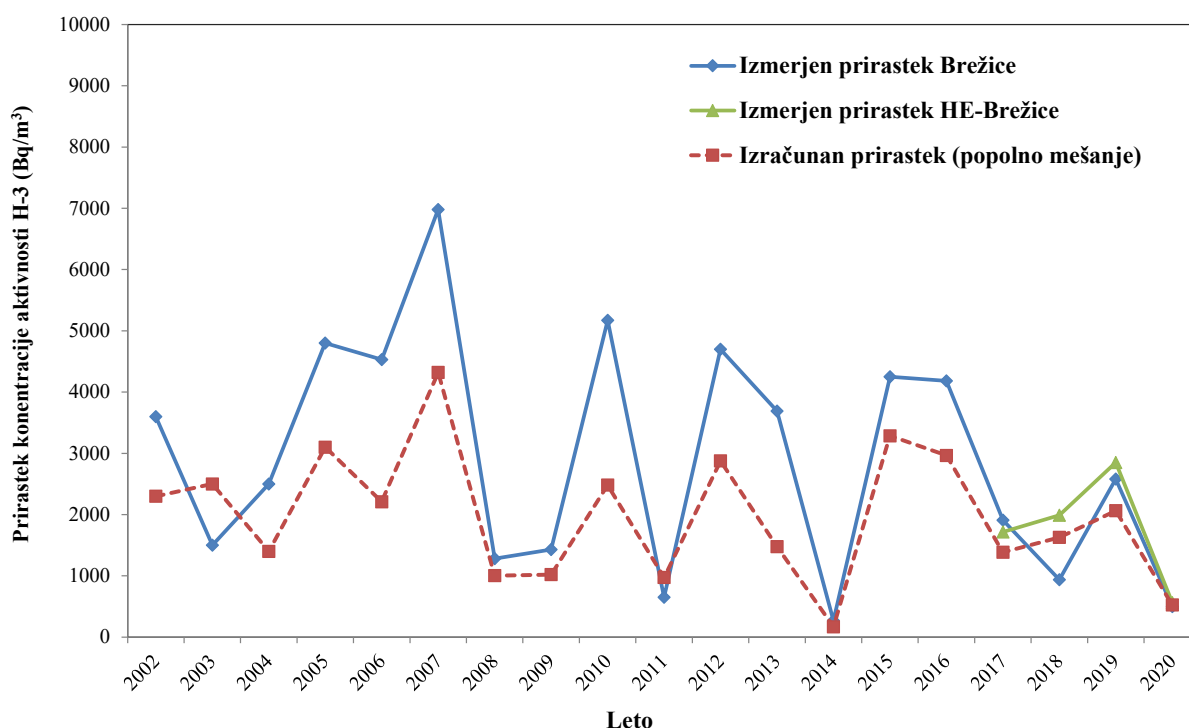
Prirastek koncentracije aktivnosti na mestu popolnega mešanja izračunamo iz izraza:

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

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 povprečnima letnima koncentracijama aktivnosti tritija v Brežicah in v Krškem smo dobili izmerjena prirastka koncentracije aktivnosti v Brežicah $C_{w,L}$ $0,50 \text{ kBq/m}^3$ in nad jezom HE Brežice $0,56 \text{ kBq/m}^3$. Izračunani prirastek koncentracije aktivnosti tritija na mestu popolnega mešanja $C_{w,tot}$ je bil $0,52 \text{ kBq/m}^3$. Oba rezultata meritve se dobro ujemata z izračunanim prirastkom na mestu popolnega mešanja. Na sliki 1.7 sta prikazana časovna poteka prirastka koncentracije aktivnosti v Brežicah in HE Brežice in ter njuna primerjava z izračunanim prirastkom. Tako je bilo v letu 2020 razredčitveno razmerje DR v Brežicah ocenjeno na 1,0 in se dobro ujema z razredčitvenim razmerjem na HE Brežice 1,1. V letu 2020 ponovno ni opaziti bistvenih odklonev med obema lokacijama. Dolgoletno povprečno razredčitveno razmerje (od 2007 do 2020) na vzorčevalni lokaciji ob levem bregu v Brežicah je ocenjeno na $(1,4 \pm 0,5)$.



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

Ni še popolnoma jasno, kakšen učinek ima gradnja HE Brežice na razredčitveno razmerje v Brežicah, zato smo primerjali tudi povprečno razredčitveno razmerje po izgradnji HE-Brežice od leta 2017. Na odvzemnem mestu HE-Brežice je nekajletno razredčitveno razmerje ocenjeno na $(1,2 \pm 0,1)$. Pričakovali bi, da se pred jezo reka dodatno zmeša in je tako razredčitveno razmerje v Brežicah nižje od HE Brežice in zelo blizu $DR = 1$. To potrjujejo tudi meritve, saj je povprečno razredčitveno razmerje v Brežicah pod jezo od leta 2017 $(1,0 \pm 0,4)$.

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 je C-14 sistematično meril v četrtletnih vzorcih tekočinskih efluentov. Meritve je navadno opravil IRB. V tem letu meritve C-14 v izpustih iz WMT niso bile opravljene. Opravljene pa so bile meritve neodvisnega nadzora C-14 v četrtletnih vzorcih WMT. Meritve je opravil IJS. Iz slednjih meritev in volumna izpuščene vode iz WMT (kvartalni izpusti) smo ocenili skupno letno izpuščeno aktivnost C-14 na 0,30 GBq. Skupna letna izpuščena aktivnost je višja kot v letu 2019 (0,09 GBq). Izpusti so skoraj za velikostni red nižji, kot je dolgoletno povprečje (1,7 GBq) od leta 2013.

Izmerjeni 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 [29]). Aktivnost izpuščenega C-14 je navadno 4 velikostne rede nižja kot pri tritiju.

C-14 je bil v letu 2020 merjen tudi v savski vodi in v ribah [20]. Na lokacijah na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice so bili odvzeti posamični četrtletni vzorci. Povprečni četrtletni koncentraciji aktivnosti C-14 na levi in desni obali akumulacijskega jezera sta bili 87 pMC (9,8 Bq/m³ vode) in 86 pMC (9,7 Bq/m³). Izmerjena sta bila tudi dva vzorca rib (klen in krap) v akumulacijskem jezuru HE Brežice. Izmerjene relativne specifične aktivnosti C-14 v ribah so bile 93 in 95 pMC (210 Bq/kg C in



215 Bq/kg C). Vse izmerjene aktivnosti so nižje od trenutnih atmosferskih aktivnosti (103 pMC). V primerjavi z letom 2019 so specifične aktivnosti C-14 v reki Savi in ribah v okviru negotovosti meritev enake.

Glede na letne izpuste v Savo je pričakovati, da bi povprečna koncentracija aktivnosti C-14 v Brežicah narasla na okrog 0,07 Bq/m³. Zaradi prisotnosti naravnega, večinoma kozmogenega C-14 v okolju (okrog 11 Bq/m³) tako nizke koncentracije aktivnosti ni mogoče izluščiti iz naravnega ozadja.

Vnos radioaktivnega ogljika v ribe poteka preko vode in vodnih rastlin, s katerimi se ribe hranijo. Obstaja popolno ravnovesje med raztopljenim anorganskim ogljikom v vodi in v ribi [30]. Iz bioakumulacijskega faktorja C-14 in ocenjenega povprečnega prirastka C-14 v Savi (0,07 Bq/m³) zaradi učinka NEK lahko ocenimo, da se relativna specifična aktivnost C-14 v ribah podobno kot v vodni bioti minimalno poveča (< 0,2 Bq/kg) in je pod mejo detekcije.

Jod (I-131)

Kratkoživi radioaktivni jod (I-131) občasno opazimo v tekočinskih efluentih NEK. Povišane koncentracije joda je bilo mogoče izmeriti takoj po černobilski nesreči. V nekaterih rekah v Sloveniji ga je mogoče najti zaradi uporabe tega radionuklida v medicini. V izpustih iz NEK I-131 v tem letu ni bil zaznan.

I-131 je redno prisoten na vseh nadzornih mestih reke Save, tako vzvodno od elektrarne kot nizvodno v Brežicah in Jesenicah na Dolenjskem. Koncentracija aktivnosti joda zelo niha in je včasih tudi pod mejo detekcije. V posamičnih vzorcih je bila do 8,3 Bq/m³ in je bila najvišja na odvzemnem mestu Brežice (letno povprečje 4,0 Bq/m³).

Če primerjamo rezultate meritev z ločenim nadzorom v življenjskem okolju v RS [16], so bile povprečne koncentracije na reki Savi v Brežicah podobne, kot jih izmerimo v Savi v Ljubljani (3,4 Bq/m³), in so tudi primerljive z dolgoletnim povprečjem 5,1 Bq/m³ v Brežicah.

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

V vzorcih rib iz referenčnega odvzema (v Krškem nad jezom) in tudi v vzorcih iz nadzornih odvzemnih mest pod jezom NEK (meritve ZVD in IRB) ni bila zaznana prisotnost I-131, kar je enako kot v preteklih letih. Glede na koncentracije aktivnosti joda v posamičnih vzorcih nefiltrirane vode (okrog 5 Bq/m³) bi pričakovali, da je specifična aktivnost joda v ribah okrog 0,2 Bq/kg (upoštevajoč bioakumulacijski faktor $B_r = 0,04 \text{ m}^3/\text{kg}$) [23], kar pa je pod mejo detekcije.

Cezij (Cs-137)

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

Letni izpust Cs-137 je bil 0,9 MBq, kar je manj kot v preteklih letih (dolgoročno povpečje 15,1 MBq). Cezij se slabo (le v nekaj odstotkih) veže na grobo suspendirano snov [23]. 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 0,2 mBq/m³. Prirastek je tri velikostne rede nižji od izmerjenih vrednosti, zaradi česar ga ni mogoče ločiti od globalne kontaminacije.

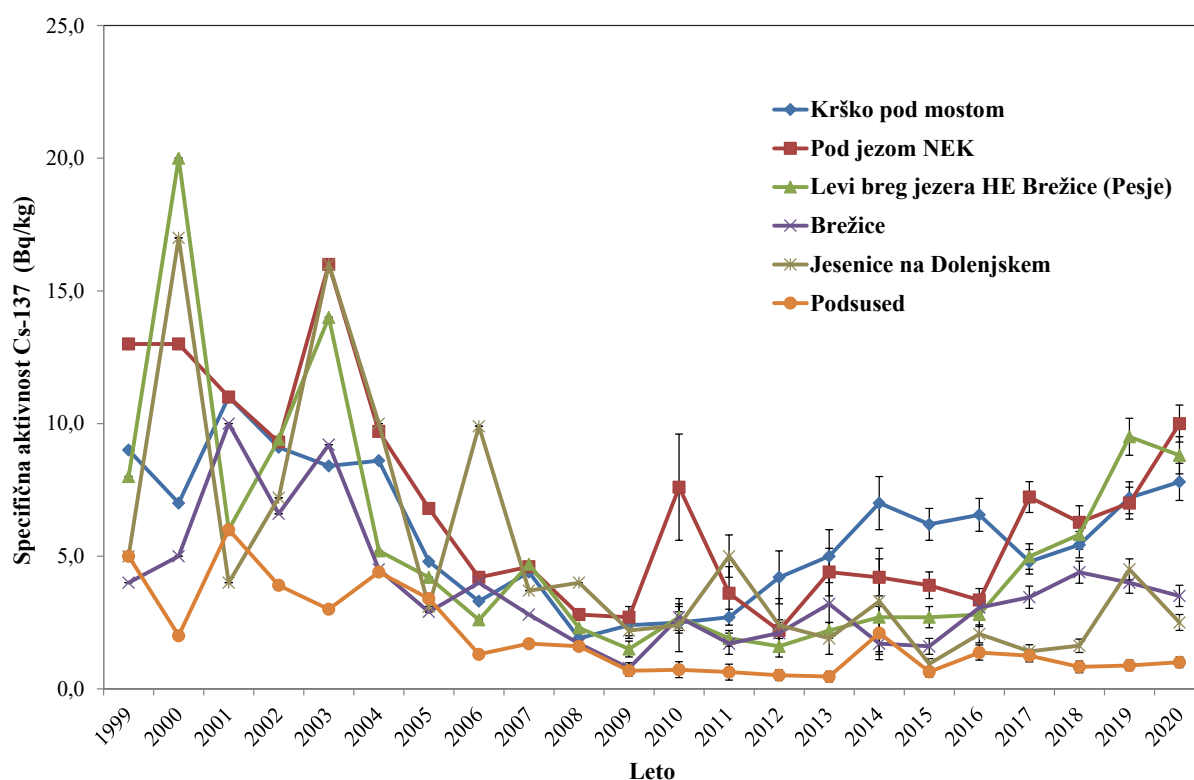
Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti v filtrirani vodi (suhi ostanek po izparevanju vzorca vode) je bilo na referenčnem mestu v Krškem 0,17 Bq/m³, kar je enako kot na odvzemnem mestu Jesenice na Dolenjskem. V Brežicah Cs-137 v vodi ni bil zaznan v nobenem vzorcu. V HE Brežice je bila povprečna letna koncentracija v filtrirani vodi 0,41 Bq/m³ (najvišja v juniju 0,81 Bq/m³). Večina posamičnih izmerjenih koncentracij aktivnosti filtrirane savske vode je bila pod spodnjo mejo detekcije aktivnosti (MDA).

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 tudi v HE Brežice cezij v filtrskem ostanku ni bil zaznan v nobenem vzorcu. Na preostalih lokacijah pa je praviloma pod mejo detekcije aktivnosti (MDA). Najvišja povprečna mesečna koncentracija aktivnosti filterskega ostanka je bila izmerjena v Jesenicah na Dolenjskem $0,26 \text{ Bq/m}^3$ (najvišja v septembru $0,43 \text{ Bq/m}^3$). Zelo primerljivi rezultati meritev so bili izmerjeni tudi v Brežicah (mesečno povprečje $0,24 \text{ Bq/m}^3$, največ v oktobru $0,43 \text{ Bq/m}^3$).

Primerljivi so bili tudi rezultati meritev cezija v posamičnih vzorcih nefiltrirane vode (vodna sušina skupaj s filtrskim ostankom). Na lokacijah Krško (referenčno mesto), Brežice, HE Brežice in Jesenice na Dolenjskem cezij sploh ni bil detektiran. Izmerjen je bil na levem in desnem bregu akumulacijskega jezera HE Brežice (povprečne koncentracije aktivnosti so okrog $0,5 \text{ Bq/m}^3$). Najvišja posamična izmerjena aktivnost je bila $0,86 \text{ Bq/m}^3$ na desnem bregu.

Povprečne koncentracije aktivnosti Cs-137 v drugih rekah po Sloveniji so podobne ali višje od vrednosti, izmerjenih v reki Savi v okolici NEK. Najvišja povprečna koncentracija aktivnosti Cs-137 je bila izmerjena v reki Muri $5,0 \text{ Bq/m}^3$ [16].



Slika 1.8: Primerjava specifičnih aktivnosti Cs-137 v talnem sedimentu reke Save

Specifična aktivnost Cs-137 v sedimentih kaže najvišje povprečne mesečne vrednosti pod jezo NEK ($10,0 \text{ Bq/kg}$), na levem bregu jezera HE Brežice – Pesje ($8,8 \text{ Bq/kg}$) in na referenčni lokaciji Krško – pod mostom ($7,8 \text{ Bq/kg}$). Na ostalih lokacijah so bile specifične aktivnosti cezija v sedimentu nižje (najnižja v kraju Podsused $1,0 \text{ Bq/kg}$). Na sliki 1.8 smo primerjali dolgoletne trende meritev IRB. Opazne so razlike med meritvami na posameznih lokacijah. Med meritvami sedimentov, ki jih je izvedel ZVD, in meritvami IRB opazimo odmikanja, vendar zaradi standardne deviacije (raztresenosti) posamičnih meritev vzorcev po lokacijah kažejo na precejšo negotovost 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



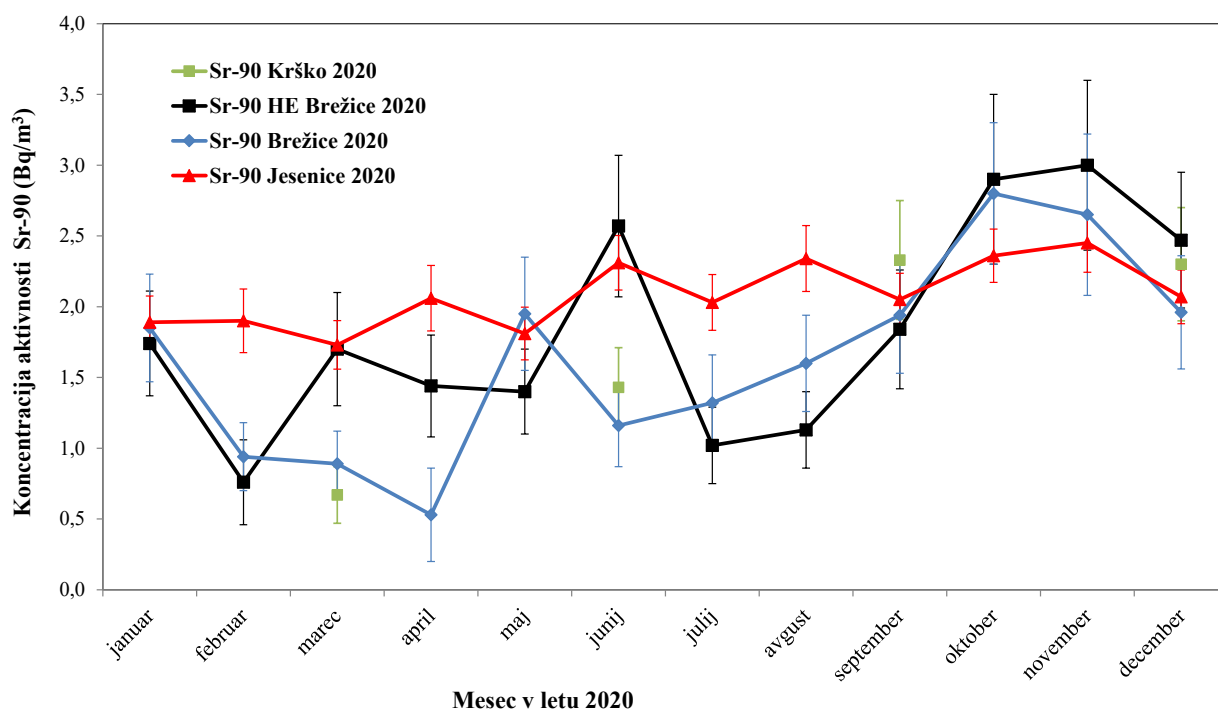
radionuklidov so v sedimentih zaradi izpiranja bistveno nižje kot v vrhnji plasti zemlje (običajna specifična aktivnost cezija v zemlji je namreč nekaj deset Bq/kg). Iz rezultatov meritev je razvidno, da specifična aktivnost Cs-137 v zadnjih letih na večini lokacij (tako na referenčni lokaciji kot v akumulacijskem jezeru) narašča. To je lahko posledica premikanja obrežnega sedimenta in tudi morda 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, ulovljenih na lokacijah, od katerih je referenčna v Krškem, druge pa so nizvodno pod izpustom NEK, kažejo povprečne mesečne specifične aktivnosti Cs-137 v ribah na meji detekcije (okrog 0,05 Bq/kg) in so v okviru merske negotovosti na vseh odvzemnih mestih podobne. Na nekaterih lokacijah cezij v ribah sploh ni bil zaznan (Jesenice na Dolenjskem in Otok na Hrvaškem). Glede na izpuste cezija iz NEK in posledično na povišanje koncentracije aktivnosti Cs-137 v vzorcih nefiltrirane vode (največ 0,0005 Bq/m³) bi pričakovali, da je specifična aktivnost Cs-137 v ribah okrog 0,001 Bq/kg (upoštevajoč koncentracijski faktor $B_r = 2,0 \text{ m}^3/\text{kg}$) [23]. 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 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 stroncij (Sr-90) je redno v tekočinskih izpustih NEK (0,04 MBq v letu 2020), vendar so aktivnosti izpustov precej nižje od aktivnosti izpustov cezija.

Večina stroncija je raztopljena v vodi, saj je koncentracija aktivnosti Sr-90 v vodi vsaj 10-krat večja kot v filtrskem ostanku. Na splošno so koncentracije stroncija v vodi 10-krat višje kot za cezij. Na sliki 1.9 je prikazana primerjava rezultatov meritev Sr-90 v vodi na različnih odvzemnih mestih v letu 2020.



Slika 1.9: Primerjava mesečnih koncentracij aktivnosti Sr-90 v vodi (v suhem ostanku po izparevanju vzorca) reke Save na lokacijah Krško, HE Brežice, Brežice in Jesenice na Dolenjskem. V Krškem so bili izmerjeni kvartalni vzorci, zato na grafu te točke niso povezane.

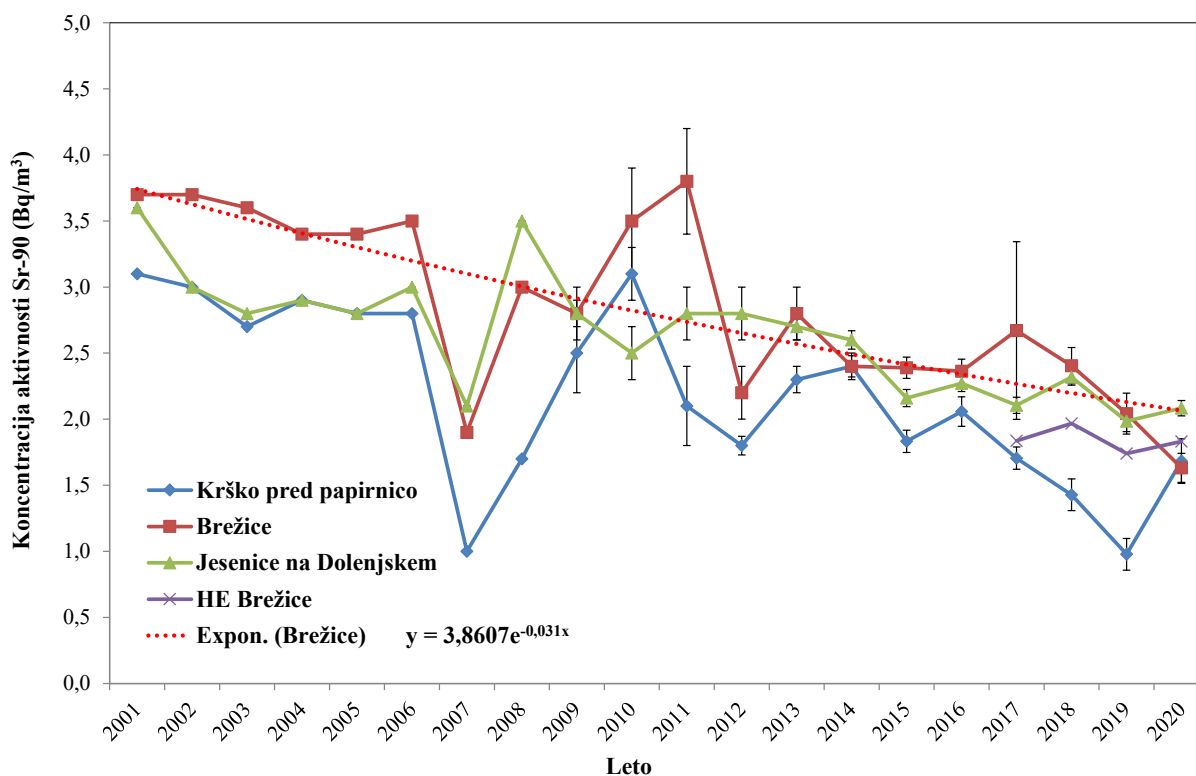


Razlike med lokacijami, kjer se neprekinjeno vzorčuje, so majhne. Na referenčnem mestu Krško je povprečna koncentracija aktivnosti $1,7 \text{ Bq/m}^3$, v merilni postaji HE Brežice $1,8 \text{ Bq/m}^3$, v Brežicah $1,6 \text{ Bq/m}^3$ in v Jesenicah na Dolenjskem $2,1 \text{ Bq/m}^3$. Koncentracije aktivnosti Sr-90 v posamičnih (nefiltriranih) vzorcih vode v okviru merskih in vzorčevalnih negotovosti ne odstopajo od meritev neprekinjeno vzorčenih vzorcev filtrirane vode.

Povprečne koncentracije aktivnosti stroncija v drugih rekah po Sloveniji se ne odstopajo od rezultatov meritev, izmerjenih v Savi v okolici NEK. Povprečna koncentracija, izmerjena v Savi na lokaciji Laze pri Ljubljani, je bila $2,3 \text{ Bq/m}^3$ [16]. 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, ustrezna 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 nižje od specifičnih aktivnosti cezija. Povprečne aktivnosti, ki jih je izmeril ZVD, so večinoma pod spodnjo mejo aktivnosti. Na referenčni lokaciji v Krškem stroncij sploh ni bil zaznan. Na ostalih lokacijah pa so bile povprečne specifične aktivnosti do $0,56 \text{ Bq/kg}$ (največ v Brežicah). Specifična aktivnost stroncija v obrežnem sedimentu je tako primerljiva z rezultati meritev iz predhodnih let. V obrežnih sedimentih je učinek NEK je nemerljiv.

Ugotavljamo tudi, da je specifična aktivnost stroncija v ribah (vodni bioti), ki bi bila lahko posledica delovanja NEK, prav tako nemerljiva, saj v okviru merske negotovosti ni razlik med posameznimi lokacijami. 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 koncentracije aktivnosti stroncija v vzorcih nefiltrirane vode (okrog 3 Bq/m^3) bi pričakovali, da je specifična aktivnost stroncija v ribah okrog $0,2 \text{ Bq/kg}$ (upoštevajoč koncentracijski faktor $B_r = 0,06 \text{ m}^3/\text{kg}$) [23]. Izmerjene povprečne specifične aktivnosti v ribah do $0,24 \text{ Bq/kg}$ (mišice in kosti ribe skupaj, meritve ZVD) se dobro ujemajo z oceno in so podobne kot v preteklih letih.



Slika 1.10: Primerjava povprečnih koncentracij aktivnosti Sr-90 v vodi (vodni sušini) reke Save in eksponeno upadanje zaradi radioaktivnega razpada: razpadna konstanta Sr-90 je 0,024 na leto in se v okviru vseh negotovosti lepo ujema z usmeritvijo na grafu.



Drugi aktivacijski in fisijski produkti

Drugi fisijski in aktivacijski produkti (Co-58, Co-60, Mn-54, Ag-110m, Sb-125, Cs-134) se redno pojavljajo v tekočinskih izpustih NEK. V letu 2020 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 nefiltrirani vodi so bile na vseh odvzemnih mestih koncentracije aktivnosti U-238 do 8 Bq/m³, Ra-226 do 6 Bq/m³, Pb-210 do 39 Bq/m³ in Ra-228 do 3 Bq/m³. Vrednosti so podobne izmerjenim v rekah po Sloveniji. Koncentracije aktivnosti K-40 so okrog 40 Bq/m³. Redno je bil izmerjen tudi kozmogeni radionuklid Be-7. V sedimentih so bile na vseh odvzemnih mestih specifične aktivnosti U-238, Ra-226, Ra-228 in Th-228 do 50 Bq/kg, specifične aktivnosti Pb-210 pa so značilno višje, tudi do 140 Bq/kg.

Vsebnosti naravnih radionuklidov so primerljive z vrednostmi v drugih rekah po Sloveniji. Za K-40 je značilno izrazito nihanje, ki je povezano predvsem z onesnaženostjo rek, v manjši meri pa tudi z geološko sestavo tal. Najvišja koncentracija aktivnosti K-40 je bila izmerjena v Savinji 470 Bq/m³ [16].

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

OCENA UČINKOV

Izpostavitev 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 [22], revidirana pa v letu 2009 (*Izpostavitev referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo – Nova referenčna lokacija* [23]). V metodologiji so prepoznane glavne prenosne poti, načini izpostavitve in referenčne skupine (referenčne osebe) za Slovenijo in Hrvaško. Za modelno oceno obremenitev, ki bi jih lahko prinesle zgolj po Savi potekajoče prenosne poti, je bila izbrana kot referenca skupina brežiških športnih ribičev in članov njihovih družin. To so referenčne osebe, ki prejmejo dozo, značilno za bolj izpostavljene posameznike iz prebivalstva.

Zaradi gradnje HE Brežice 7,2 km nizvodno od NEK in nastanka akumulacijskega jezera je verjetno prišlo do sprememb pri načinih in poteh izpostavitve prebivalstva sevanju. Sedanja ocena učinkov izpuščenih radionuklidov, ki je opisana v nadaljevanju, temelji na starih predpostavkah in ne vključuje spremenjenih hidravličnih parametrov.

Prvotne ocene, ki so bile narejene v letu 2003, so predpostavljale, da so referenčna skupina ribiči, ki ribarijo pri Brežicah, kjer naj bi bilo mešanje izpuščenih radioaktivnosti v reko Savo popolno. Kasnejša analiza v letu 2009 je ugotovila, da ribiči pogosto ribarijo znatno bližje NEK, kjer je mešanje še nepopolno. V revidiranem modelu je dodana nova lokacija za ribiče (levi del struge, 350 m pod jezo NEK), ki je prikazana na sliki 1.11. Za to skupino uporabljamo drugo razredčitveno razmerje *DR*, saj na tem mestu ne prihaja do popolnega mešanja s savsko vodo.

V tabeli 1.1 je inventar letnih tekočinskih izpustov NEK, kar je vhodni podatek pri oceni letne efektivne doze. Navedeni so tudi vsi pomembni radionuklidi, ki bi potencialno lahko bili v izpustnih vodah. Iz tabele je razvidno, da je največ izpuščenega H-3 (tritija), vendar je ta radionuklid z vidika radiotoksičnosti malo pomemben. Pomembna sta aktivacijska produkta Co-60 in Co-58 ter fisijski produkti Cs-134, Cs-137 in Sr-90. Pomemben je tudi C-14, ki sicer nima visoke radiotoksičnosti, vendar je po izpustih takoj za tritijem. Pri izračunu letne efektivne doze nismo upoštevali prispevka žlahtnih plinov Xe-131m, Xe-133, Xe-133m, Xe-135, Kr-85m in drugih zelo kratkoživih radionuklidov, ker pri vnosu v telo niso pomembni.



Tabela 1.1: Inventar tekočinskih izpustov v letu 2016, 2017, 2018, 2019 in 2020 [5]

Radionuklid	2016 (Bq na leto)	2017 (Bq na leto)	2018 (Bq na leto)	2019 (Bq na leto)	2020 (Bq na leto)
H-3	1,99E+13	8,64E+12	1,05E+13	1,36E+13	2,95E+12
C-14	9,20E+09	1,25E+08	4,1E+07	8,76E+07	2,98E+08
Na-24	—	—	—	—	—
Cr-51	—	—	—	—	—
Mn-54	—	—	4,57E+05	4,01E+04	4,28E+05
Fe-55	2,95E+06	2,02E+06	3,96E+06	4,25E+06	2,97E+06
Fe-59	—	—	—	—	—
Co-57	—	—	—	—	—
Co-58	2,22E+06	5,97E+05	3,40E+06	7,33E+06	1,18E+06
Co-60	2,36E+06	1,38E+06	2,00E+06	3,70E+06	2,37E+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
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
Sn-113	—	—	—	—	—
Sb-124	—	—	—	—	—
Sb-125	—	7,04E+05	2,45E+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
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	—	—	—	—	—



Slika 1.11: Lokacija, kjer se računa modelska doza za referenčno skupino (ribiči) 350 m od jezua. Stara lokacija je bila 7,7 km nizvodno od jezua NEK.

Za izračun letne efektivne doze v letu 2020 so bili uporabljeni naslednji vhodni podatki:

- letni izpust radionuklidov iz poročil NEK (tabela 1.1);
- povprečni pretok Save v Brežicah v tem obdobju ($178 \text{ m}^3/\text{s}$);
- razredčitveno razmerje DR na lokaciji 350 m nizvodno od jezua NEK je (3 ± 2) in v Brežicah $(1,4 \pm 0,5)$; dolgoletno povprečno razredčitveno razmerje od 2007 do 2020, dobljeno iz primerjave meritev tritija v izpustih in v Brežicah;
- povprečna koncentracija suspendiranega sedimenta (8 g/m^3 , povprečje meritev v Brežicah);
- 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 upoštevano 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 informacijah gospodarja ribiške družine morda tretjina ribičev uživa ujete ribe. Ti ribiči so referenčna skupina, ki šteje 36 ljudi. V tabeli 1.2 so podane značilnosti referenčne skupine, 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).



Tabela 1.2: Značilnosti referenčne skupine (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	–

Ocenjena letna efektivna doza za posamezno skupino, narejena iz realnih izpustov NEK in ob predpostavkah največje izpostavitve (ekstremna poraba in maksimalni čas zadrževanja na obrežju, tabela 1.3), je za odraslo osebo v Brežicah 0,006 μSv . Na bližji lokaciji (350 m nizvodno od NEK) pa je izračunana letna efektivna doza za odraslo osebo (maksimalna poraba) 0,014 μSv (tabela 1.4). Če bi upoštevali povprečne navade referenčne osebe, bi bile prejete efektivne doze še nekajkrat nižje. Največja negotovost izračuna letnih efektivnih 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.

Tabela 1.3: Ocenjena efektivna letna doza posameznika iz referenčne skupine prebivalstva v Brežicah, pri čemer upoštevamo maksimalno izpostavljenega posameznika (ekstremna poraba)

Starostna skupina	Brežice
	Rečni breg in uživanje rib (zelo verjetna prenosna pot)
	Efektivna doza (μSv na leto)
odrasli (> 17 let)	0,0063 μSv Prispevek zunanjega sevanja: < 0,001 μSv Prispevek zaužitja rib: 0,0056 μSv
otroci (od 7 do 12 let)	0,002 μSv Prispevek zunanjega sevanja: < 0,001 μSv Prispevek uživanja rib: 0,0017 μSv
dojenčki (1 leto)	0 μSv



Tabela 1.4: Ocenjena efektivna letna doza posameznika iz referenčne skupine prebivalstva na lokaciji 350 m pod jezo, pri čemer upoštevamo maksimalno izpostavljenega posameznika (ekstremna poraba)

Starostna skupina	350 m pod jezo NEK
	Rečni breg in uživanje rib (zelo verjetna prenosna pot)
	Letna efektivna doza (μSv)
odrasli (> 17 let)	0,014 μSv Prispevek zunanjega sevanja: < 0,001 μSv Prispevek zaužitja rib: 0,012 μSv
otroci (od 7 do 12 let)	0,004 μSv Prispevek zunanjega sevanja: < 0,001 μSv Prispevek uživanja rib: 0,0036 μSv
dojenčki (1 leto)	0 μSv

Druge starostne skupine (otroci in dojenčki) v skladu s to oceno prejmejo še nižjo efektivno dozo. Vzporedno je narejena tudi ocena efektivne letne doze ob predpostavki pitja rečne vode (odrasla oseba v Brežicah 0,01 μSv). V poročilu *IJS-DP-10114* [23] je bilo ugotovljeno, da je prenosna pot pitja rečne vode malo verjetna in jo zato nismo upoštevali pri končnem vrednotenju izpostavljenosti.

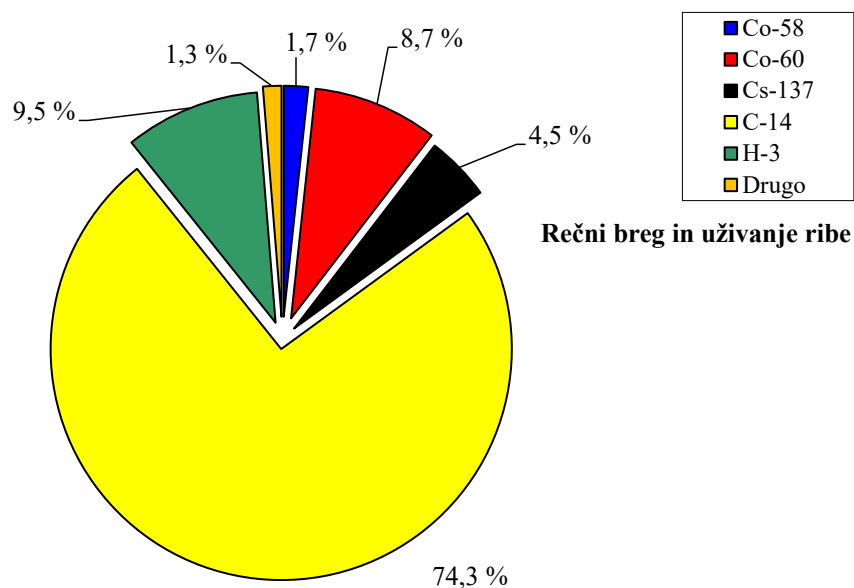
Na slikah 1.12, 1.13 so deleži prispevkov posameznih radionuklidov, ki največ prispevajo k prejeti dozi pri zelo verjetni prenosni poti (zadrževanje na rečnem bregu in uživanje rib).

C-14 največ prispeva k celotni dozi iz vseh prispevkov (74 %, dominantno je zaužitje rib). V prispevku zadrževanja na bregu je praktično celotna obremenitev zaradi Co-60 in Co-58, in sicer 89 %. 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 0,02 μSv .

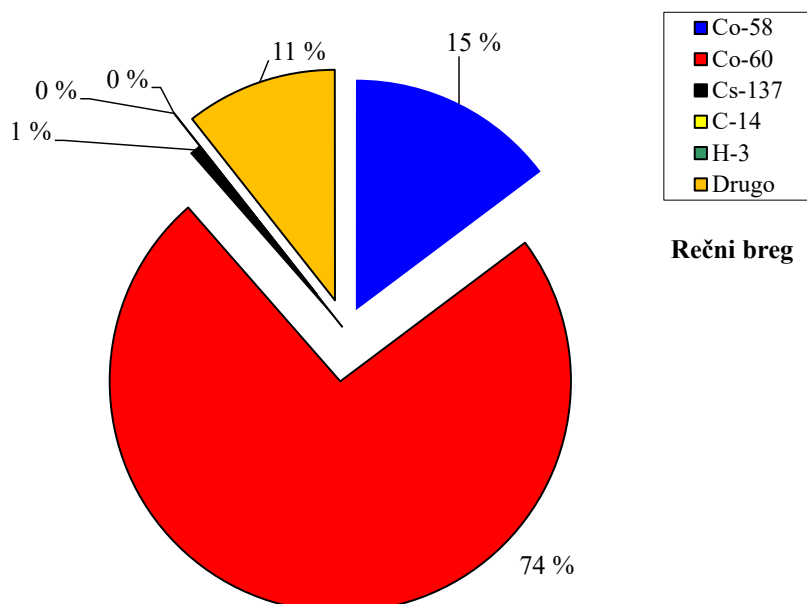
SKLEPI

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 2020 bistveno nižji kot v preteklih letih (najnižji v preteklih šestih letih) in skoraj red velikosti nižji od dolgoletnega povprečja. Tako so bile povprečne letne koncentracije H-3 na vseh odvzemnih mestih okrog 1 kBq/m³, kar je dvakrat več od običajnega ozadja (okrog 0,6 kBq/m³), vendar bistveno manj kot smo lahko običajno izmerili v predhodnih letih. Navkljub merljivim vrednostim pa H-3 zaradi nizke radiotoksičnosti le malo prispeva k efektivni dozi.

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 izvir, 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. Skupna letna izpuščena aktivnost C-14 v Savo je vsaj 4 velikostne rede nižja kot pri H-3. Izpuščena aktivnost ostalih radionuklidov je dva velikostna reda nižja od C-14. Izpusti Sr-90 pa so bili še bistveno nižji.



Slika 1.12: Prispevki posameznih radionuklidov k skupni dozi (zadrževanje na rečnem bregu in zaužitje rib na lokaciji 350 m nizvodno od NEK). Največ prispeva C-14.



Slika 1.13: Prispevki posameznih radionuklidov k zunanji dozi pri zadrževanju na rečnem bregu 350 m nizvodno od NEK. Največ prispevata Co-60 in Co-58.



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 neodvisnega nadzora v četrletnih vzorcih WMT, ki jih je opravil IJS. Predlagamo, da se ponovno vzpostavijo redne kontrolne meritve C-14 v imisijskih vzorcih.

V letu 2020 I-131 v izpustih NEK ni bil zaznan, 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 2020 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). Povečane koncentracije 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.

Iz izmerjenih izpustov NEK za leto 2020 in upoštevanja ustreznih razredčitev, ki smo jih uporabili v modelni oceni, lahko sklenemo, da je izračunana letna efektivna doza referenčne skupine, na kateri koli lokaciji nizvodno od NEK zaradi savske prenosne poti zanemarljiva (nižja ali enaka 0,014 μ Sv na leto).





2 RADIOAKTIVNOST V PITNI IN PODZEMNI VODI

POVZETEK

V poglavju obravnavamo radioaktivnost v podzemni vodi na krško-brežiškem polju: ta 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 2020 ter na podlagi rezultatov meritev iz preteklih let ugotavljamo učinek izpustov NEK na pitno vodo in podtalnico v občinah Krško in Brežice. V letu 2020 se je nadaljevalo vzorčenje na vseh lokacijah, ki so bile v rabi tudi v letu 2019. Vzorcena je bila voda iz vodovodov in črpališč v Brežicah in Krškem, iz vrtine znotraj ograje NEK ter iz podtalnice na Hrvaškem. V letu 2020 se je nadaljevalo vzorčenje v treh vrtinah v neposredni bližini akumulacijskega jezera HE Brežice. V odvzetih vzorcih so bile izmerjene koncentracije aktivnosti naravnih in umetnih radionuklidov. Tako kot že tudi v letu 2019 sta bila tudi v letu 2020 med umetnimi radionuklidi največkrat zaznana H-3 in Sr-90, Cs-137 je bil večinoma pod mejo kvantifikacije, I-131 ni bil zaznan v nobenem vzorcu, drugi umetni radionuklidi prav tako ne. 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 0,25 % v brežiškem in 1,17 % 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 2020 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]. Vodovod Ljubljana je referenčna lokacija in se redno analizira v okviru republiškega nadzora radioaktivnosti v pitni vodi v Sloveniji [17]. Izračun izpeljanih vrednosti koncentracij (IK) umetnih radionuklidov v pitni vodi je v Uredbi o mejnih dozah, referenčnih ravneh in radioaktivni kontaminaciji (UV2) [9]. Z analizami ugotavljamo koncentracije aktivnosti naravnih in umetnih radionuklidov ter iz tega 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.

Nadzorni jedrski poskusi ter nesreči v Černobilu in Fukushimi so od sredine preteklega stoletja vplivali na izpostavljenost prebivalstva antropogenim virom radioaktivnosti. V letu 2020 iz sveta ni bilo poročil o jedrskih neizodah, ki bi lahko vplivale na koncentracijo radioaktivnih snovi v pitni vodi v okolici NEK. Redni nadzor ni zaznal nenavadnih odmikov. Kontrolirani izpusti iz jedrskih in sevalnih objektov ter uporaba virov v medicini so naša realnost in glavni viri antropogenih snovi v okolju in s tem tudi v pitni vodi.

Med radionuklidi umetnega izvora je bil v letu 2020 v okviru merilnega nadzora, tako kot prejšnja leta, v vodi iz črpališč in vrtin poleg tritija izmerjen 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 mersko 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, ki se ga v vzorcih vod ne meri.

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 uporabljan 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 [33]. Kalij je namreč sestavni del umetnih gnojil. Prisotnost kozmogenega Be-7 v vzorcih podzemne vode lahko kaže na mešanje med padavinami in podtalnico oz. 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 2020 potekalo v skladu s postopkom *Izvedba programov Rednega nadzora radioaktivnosti v okolici NE Krško in v Republiki Sloveniji (LMR-OP-02)* 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).



4. Posamično letno vzorčenje na referenčni lokaciji

- vodovod Ljubljana (Osrednjeslovenska regija, republiški nadzor radioaktivnosti pitne vode [17]).

V črpališčih Brege, Rore, Brežice – Glogov Brod in na odvzemnem 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. Vzorčenje na Hrvaškem se opravlja na dveh vzorčevalnih mestih v bližini Zagreba. Posamična mesečna vzorčenja na začetku meseca in spektroskopske analize opravijo na IRB.

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 radiokemično 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 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 štejem (SDN-O2-STC(01))*, *Vzorčevanje in priprava vzorcev za določitev tritija (LSC-DN-06)*, *Analiza in izračun vsebnosti tritija (LSC-DN-07)* in *Določanje tritija s tekočinskim scintilacijskim štejem (SDN-O2-STC(02))*.

REZULTATI MERITEV IN TIPIČNI ČASOVNI POTEKI

V tabelah od T-28 do T-36 ter T-V1, T-V2, T-HE 12, T-HE 13, T-HE 14 v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462, marec 2021*, 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. Delitev vodovodnih vod krško-brežiškega polja v tri različne razrede v letu 2020 ni tako jasna, kot je bila v obdobju med marcem 2017 in marcem 2020.

Spremenjena delitev vod v razrede se kaže pri vzorcih s črpališč Brege in Spodnji Stari Grad. Na obeh vzorčevalnih mestih so se koncentracije aktivnosti znižale že v začetku leta 2019, v letu 2020 sta povprečni vrednosti še nižji kot leto poprej, kar vidimo tudi v tabeli 2.1. Še vedno sta to črpališči z najvišjimi koncentracijami aktivnosti tritija v Sloveniji, vseeno pa dosejata manj kot dva odstotka mejne vrednosti 100 Bq/L, ki je predpisana v *EU direktivi za pitne vode* [32]. Najvišja vrednost analiziranih pitnih vod Slovenije je bila izmerjena v vzorcu za mesec april s črpališča Brege (1860 ± 220 Bq/m³). Poletni maksimum je nakazan v nizu rezultatov za vodovod Spodnji Stari Grad, medtem ko ga v nizu za črpališče Brege ne opazimo. Najvišje vrednosti torej niso korelirane z običajnim naravnim potekom koncentracij aktivnosti tritija, ko beležimo najvišje vrednosti v poletnih mesecih. Medtem ko so bile vrednosti za koncentracije aktivnosti vzorcev s črpališča Brege in vodovoda Spodnji Stari Grad obenem z njhovima

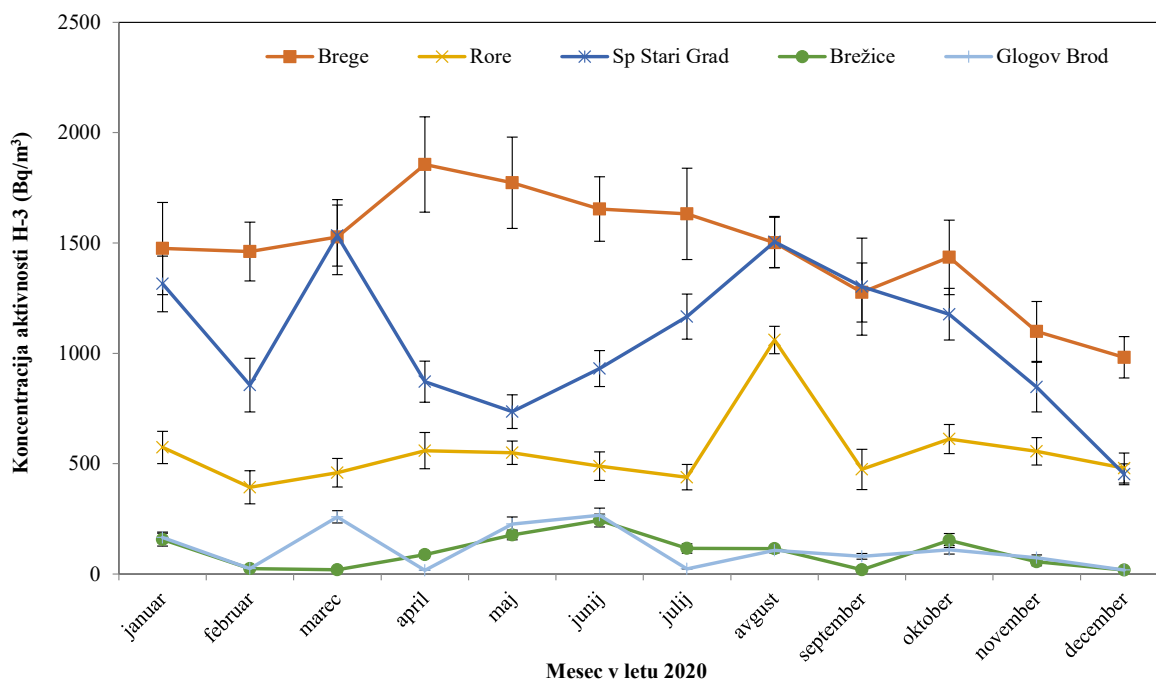


potekoma od marca 2017 do marca 2020 zelo podobne, se vrednosti od aprila do julija 2020 razhajajo tudi za faktor dva. Od septembra dalje se koncentracije aktivnosti za obe vzorčevalni mesti zmanjšujejo. V vodovodu Spodnji Stari Grad so decembra 2020 vrednosti praktično enake kot za črpališče Rore, medtem ko so se na primer od februarja do oktobra 2018 razlikovale tudi za faktor tri.

Najnižje in praktično konstantne vrednosti so bile tudi v letu 2020 izmerjene v vzorcih s črpališča Glogov Brod in iz vodovoda Brežice. Vrednosti na teh dveh vzorčevalnih mestih se le malo spreminjajo že vse od sredine leta 2008. Tako tudi za leto 2020 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 2019 in prej. Manjši odklon na črpališču Glogov Brod smo opazili samo v marcu 2020.

Tudi vrednosti za vzorce s črpališča Rore bolj ali manj nadaljujejo potek, ki velja čez celotno obdobje od junija 2015 dalje, ko je bilo to črpališče vključeno v redni radiološki nadzor. Vpliva letnih časov ni videti, kar pomeni, da nimamo opraviti z večjim deležem meteornih vod. Opazno spremembo smo ugotovili samo v avgustu, ko je bila v vzorcu izmerjena dvakratna povprečna vrednost koncentracije aktivnosti ostalih enajstih mesecev (508 Bq/m^3). Podoben odmik smo opazili tudi avgusta 2019 in v nekoliko manjši meri še junija 2015 in maja 2016. Seveda je bil najprej preverjen celotni postopek od vzorčenja do analize, z neodvisno ponovno analizo na dodatnem arhivskem vzorcu, ki je namenjen razreševanju takih in podobnih zadreg. Postopek smo izvedli za oba avgustovska vzorca v zadnjih dveh letih. Ponovljeni analizi sta potrdili prvotna rezultata.

V črpališču Rore se pitna voda zajema iz vrtin V-6 in V-7. Vrtini imata prekrivajoče se vplivno območje, v katerem je tudi reka Sava, ki z infiltracijo deloma napaja karbonatni vodonosnik. Do sedaj opaženi odmiki od povprečnih koncentracij aktivnosti sovpadajo z dvomesečnim zamikom z lokalnim maksimumom pretoka Save in lokalnim maksimumom talnega useda H-3. Z drugimi besedami se delovna hipoteza glasi: če sovpadata sorazmerno visok pretok Save in sorazmerno izdatne padavine z višjimi koncentracijami tritija, potem obstaja precejšnja verjetnost, da bomo na črpališču Rore izmerili nekoliko višje vrednosti tritija, ki bodo istega reda velikosti kot vrednosti tritija v Bregah v vrtini V-12/77 oziroma pri padavinah v Krškem.



Slika 2.1: Mesečna koncentracija aktivnosti H-3 v vzorcih pitne vode iz črpališč in vodovodov za leto 2020



Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti tritija za mesečne vzorce z neprekinjenim vzorčenjem od leta 2017 do leta 2020 so zbrana v tabeli 2.1. Tu še vedno opazimo tri kategorije: črpališče Brege in vodovod Spodnji Stari Grad, vodovod Brežice in črpališče Glogov Brod ter črpališče Rore. Medtem ko se srednje vrednosti za črpališče Rore, črpališče 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.

Poleg rednih mesečnih odvzemov vode na črpališčih in vodovodih v občinah Krško in Brežice je bila tudi v letu 2020 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 45 Bq/m^3 . V vzorcih krškega vodovoda so vrednosti drugega velikostnega reda, v povprečju okrog 510 Bq/m^3 . Obe vrednosti sta primerljivi s koncentracijami aktivnosti tritija v ljubljanskem vodovodu ($(530 \pm 30) \text{ Bq/m}^3$) ali celo pod njimi. Rezultati posamičnih vzorcev so primerljivi z mesečnimi vrednostmi matičnih vodovodov. Krški Petrol je v dneh vzorčenja očitno prejemal vodo iz črpališča Rore. Vsi štirje rezultati za četrletne posamične vzorce (tabeli T-28 in T-29) na obeh vzorčevalnih lokacijah so med seboj statistično primerljivi.

Tabela 2.1 Srednja vrednost koncentracije aktivnosti H-3 v črpališčih in vodovodih v okolici NEK za obdobje od leta 2017 do 2020

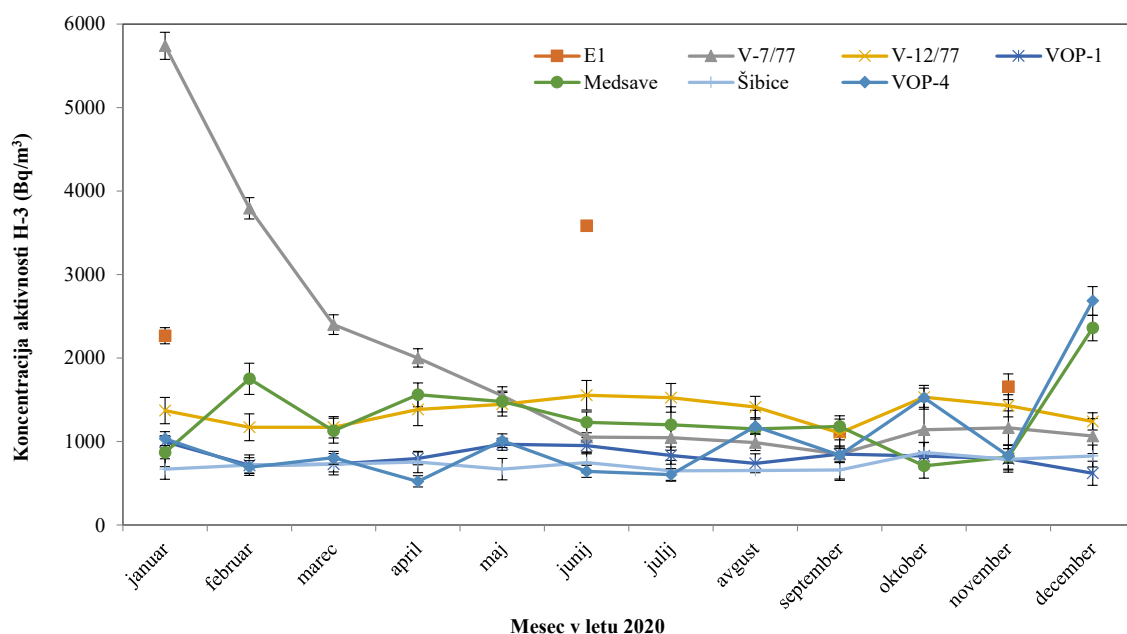
	2020	(Bq/m ³)	2019	(Bq/m ³)	2018	(Bq/m ³)	2017	(Bq/m ³)
ČRPALIŠČE BREGE	1473	± 48	1319	± 46	2043	± 67	1846	± 64
ČRPALIŠČE RORE	554	± 18	620	± 24	600	± 20	580	± 22
VODOVOD SP. STARI GRAD	1058	± 35	1177	± 41	2010	± 61	1746	± 59
VODOVOD BREŽICE	99	± 8	77	± 8	83	± 8	125	± 11
ČRPALIŠČE BREŽICE	114	± 27	81	± 18	250	± 52	125	± 21

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. Te vrtine niso namenjene oskrbi prebivalcev s pitno vodo, ampak služijo le 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. Mesečne koncentracije aktivnosti so prikazane na sliki 2.2. Vrednosti koncentracij aktivnosti za VOP-4 so bile v letu 2020 sorazmerno konstantne, s povprečno vrednostjo 940 Bq/m^3 za prvih enajst mesecev, kar je primerljivo z mesečnim povprečjem za isto obdobje za reko Savo v Brežicah, 1000 Bq/m^3 . Podobne vrednosti in potek opazimo tudi za ostale obravnavane vrtine. Izjema je vrtina V-7/77, kjer padejo vrednosti koncentracije aktivnosti na primerljivo vrednost z ostalimi vrtinami šele maja 2020, ko izzveni povišanje iz leta 2019, ki je v vrtinah VOP-4 in Medsave doseglo najvišje vrednosti v septembru, v vrtini V-7/77 pa s trimesečnim zamikom. Trimesečni zamik pomeni tudi širši vrh, ki se vrne na osnovno vrednost bistveno kasneje kot pri obeh vrtinah, ki sta veliko bližje reki.

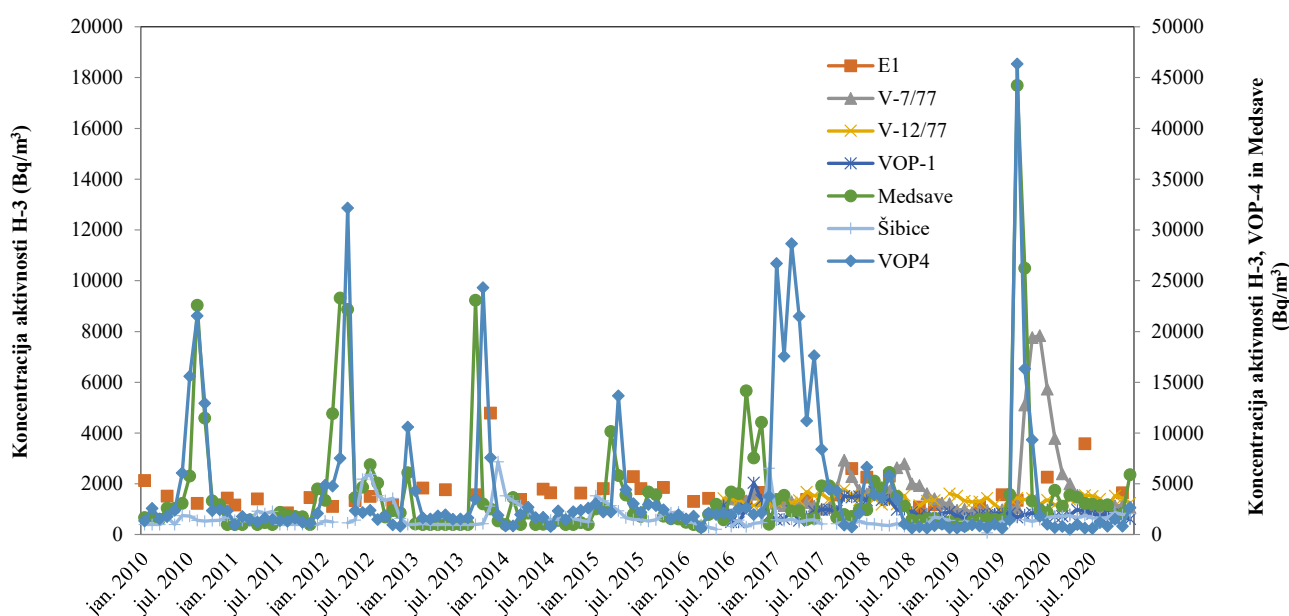
Medtem ko smo v letu 2019 govorili o zelo jasni korelaciji med izpustom NEK in koncentracijami aktivnosti za vzorce iz vrtin VOP-4 in Medsave, tega ne moremo trditi za leto 2020 (slika 2.4). Razlog morda tiči v količini in številnosti izpustov – če so izpusti manj aktivni, korelacija s koncentracijami aktivnosti ni tako izrazita. V zadnjih dvajsetih letih je bilo samo v letu 2014 nekoliko manj izpustov kot v letu 2020, ko jih je bilo le za okoli 3 TBq, medtem ko jih je bilo v letu 2019 za skoraj 14 TBq. Skoraj 60 % aktivnosti tritija je bilo v Savo izpuščenih v zadnjih dveh mesecih, kar se je takoj pokazalo na vsebnosti tritija v vrtini VOP-4 in v Medsavah. Vsi ostali mesečni izpusti so bili tri- do štiridesetkrat manjši kot novembra 2020, ko je bilo izpustov skoraj 1 TBq. Izjema je februar, ko je bilo izpustov občutno manj, le 10 MBq. Predpostavko iz prejšnjih dveh let, ko smo na podlagi meritev sklepali, da so korelacije med



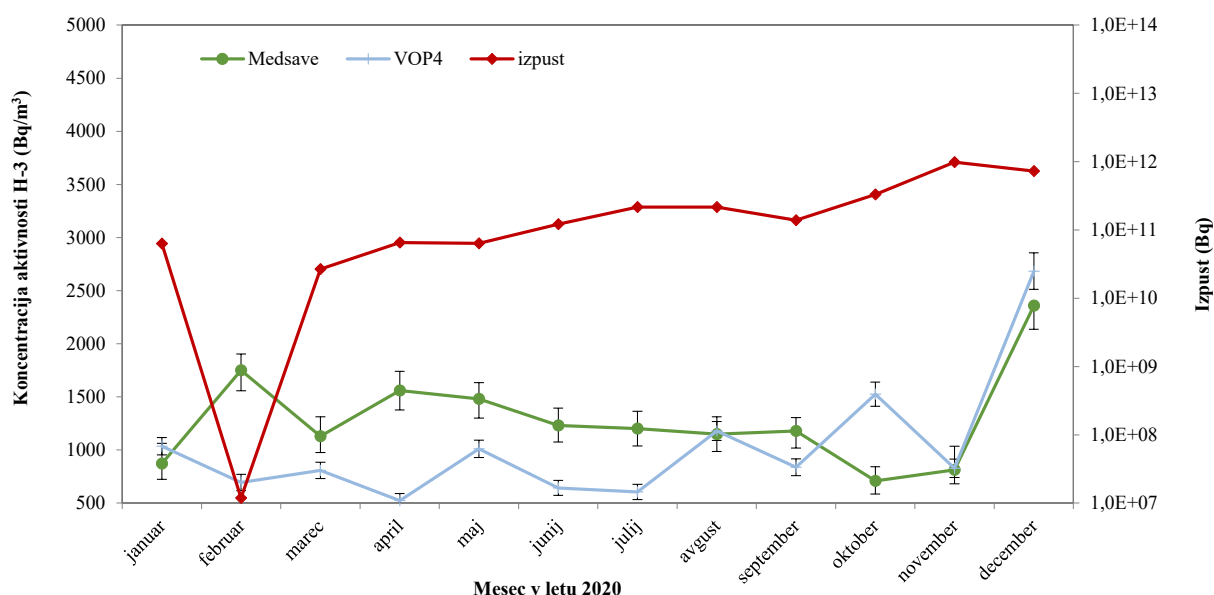
izpusti in koncentracijami aktivnosti v Savi najbližjih vrtinah izrazitejše zaradi stabilnega vodostaja, moramo dopolniti s pristavkom, da za to obstaja prag aktivnosti, kar smo potrdili z letošnjimi meritvami. Na sliki 2.3 so prikazani večletni rezultati za vse vrtine. Medtem ko je bila korelacija med vrtinama VOP-4 in Medsave od februarja 2018 do decembra 2019 velika, to ne drži za leto 2020, ko je korelacija med koncentracijami aktivnosti v obeh vrtinah neznatna.



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



Slika 2.3: Koncentracije aktivnosti tritija za obdobje 2010–2020 za vse vrtine, ki so vključene v nadzor



Slika 2.4: Koncentracije aktivnosti tritija v vrtinah VOP-4 in Medsave ter izpust NEK v letu 2020 (leva ordinatna os je v linearni skali, desna pa v logaritemski)

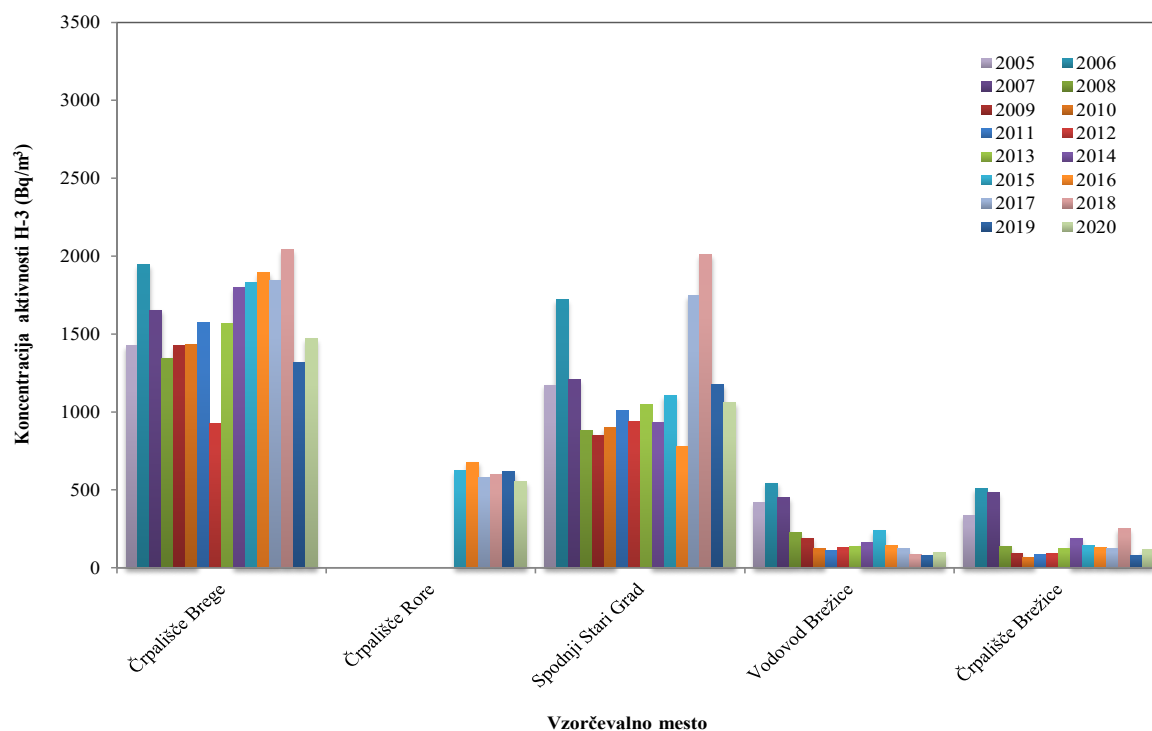
Sliki 2.5. in 2.6 prikazujeta povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v vodovodih in podtalnici od leta 2005 do 2020 v Sloveniji in na Hrvaškem. Obe sliki sta v enakem merilu, da jasno vidimo razlike med pitnimi vodami in podzemnimi vodami iz vrtin. Vrednosti za leto 2020 so istega reda velikosti kot v letu 2019, nekoliko odstopa le vrtina E1, kjer je srednja vrednost za leto 2020 nekoliko višja kot v prejšnjih letih. Za črpališče Rore je bilo povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti v letu 2019 bistveno višje kot leto poprej, v letu 2020 se je vrednost vrnila v ustaljeni tir. Pri obeh slikah vidimo najbolj enakomeren upad aktivnosti od leta 2007 do 2020 pri vodovodu Krško, kjer je vrednost za leto 2020 v grobem približno dvakrat manjša kot leta 2008, kar ustreza razpolovnemu času za tritij. Sklepamo lahko, da se vodovod Krško napaja iz stabilnega vodnega vira z le malo povezavami z meteornimi vodami in da tritijevi izpusti iz NEK nanj neposredno ne vplivajo. Na prvi pogled morda preseneča dejstvo, da upad ni tako gladek za vodovod Ljubljana, do kamor vpliv NEK gotovo ne seže. Razlike med posameznimi leti pripišemo dejstvu, da je vodovod Ljubljana velik sistem, ki se napaja iz različnih vodnih virov z različnimi koncentracijami aktivnosti tritija.

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

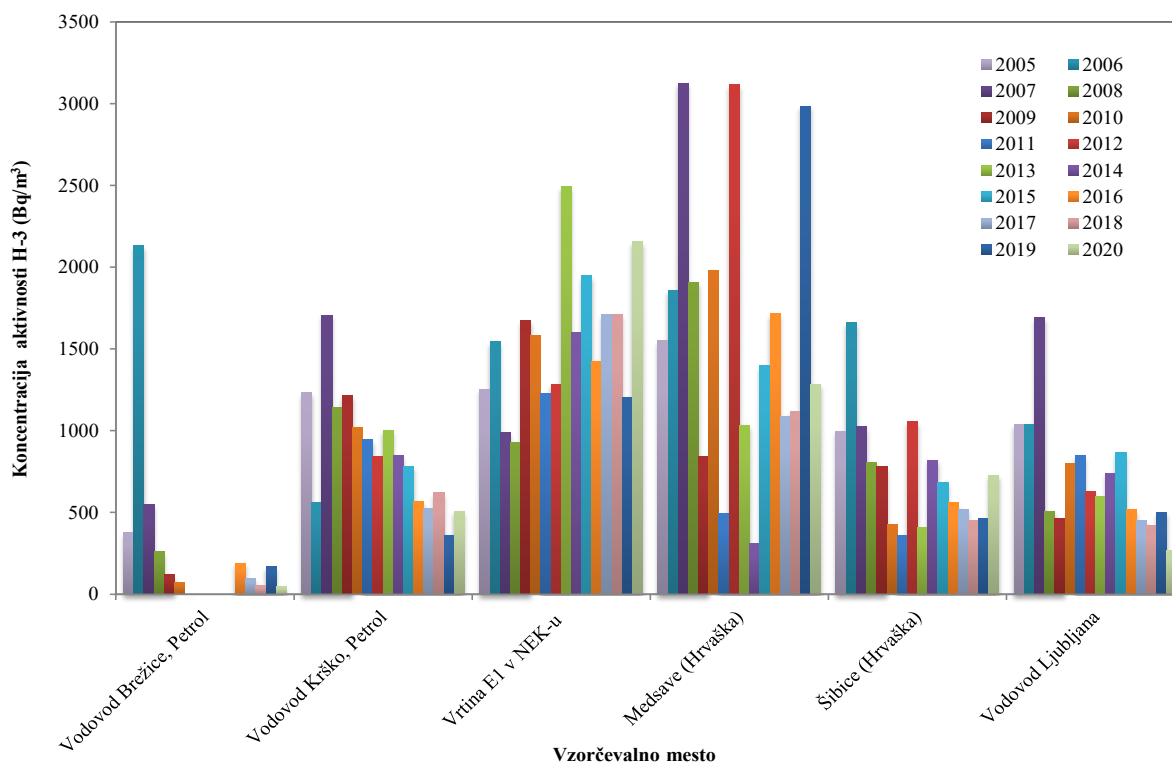
Med umetnimi radionuklidi smo pozorni predvsem na vsebnost cezija Cs-137 in stroncija Sr-90. Oba sta nehomogeno razširjena tudi na naših tleh, pripisujemo ju predvsem črnobilski nesreči in nadzemnim jedrskim poskusom. V majhnih količinah se pojavljata tudi v izpustih NEK. Oba lahko uporabimo kot sledilca za študij transportnih procesov. V tabeli 2.2 so prikazani deleži vzorcev, v katerih sta bila radionuklida izmerjena. Cs-137 se pojavlja samo še v 17 % vzorcev, kar je približno enak delež kot v letu 2019. Stroncij je bil izmerjen v približno 72 % vzorcev, kar je več kot leta 2019, ko je bil delež 53 %. Rezultati za Sr-90 so prikazani na slikah od 2.7 do 2.10. Metodologija se v zadnjem letu ni spremenila.

Sliki 2.9 in 2.10 sta narisani v enakem merilu in tako jasno vidimo, da so koncentracije aktivnosti za vrtine tri do štirikrat višje od najvišjih vrednosti za pitne vode. Letno povprečje koncentracije aktivnosti Sr-90 v krških črpališčih in vodovodu je bilo 0,61 Bq/m³, kar je več kot 2019 in primerljivo z letom 2018. V brežiškem vodovodnem sistemu je bila večina izmerjenih vrednosti pod mejo kvantifikacije. Vrednost za brežiški vodovod 0,14 Bq/m³ je izpeljana iz detekcijskih mej. Za ljubljanski vodovod je bila v letu 2020 izpeljana vrednost okrog 0,05 Bq/m³, kar je manj kot v vzorcih s krško-brežiškega polja. V posamično odvzetih četrtnih vzorcih vode iz vodovoda Brežice so bile vse vrednosti okoli 0,20 Bq/m³, v Krškem pa 0,59 Bq/m³, kar je v primeru Brežic manj, v primeru krškega vodovoda pa več kot v zadnjih dveh letih.

Korelacij z izpusti, pretoki ali padavinami ni opaziti.



Slika 2.5: Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti H-3 v vodovodih in črpališčih od leta 2005 do 2020 v okolici NEK



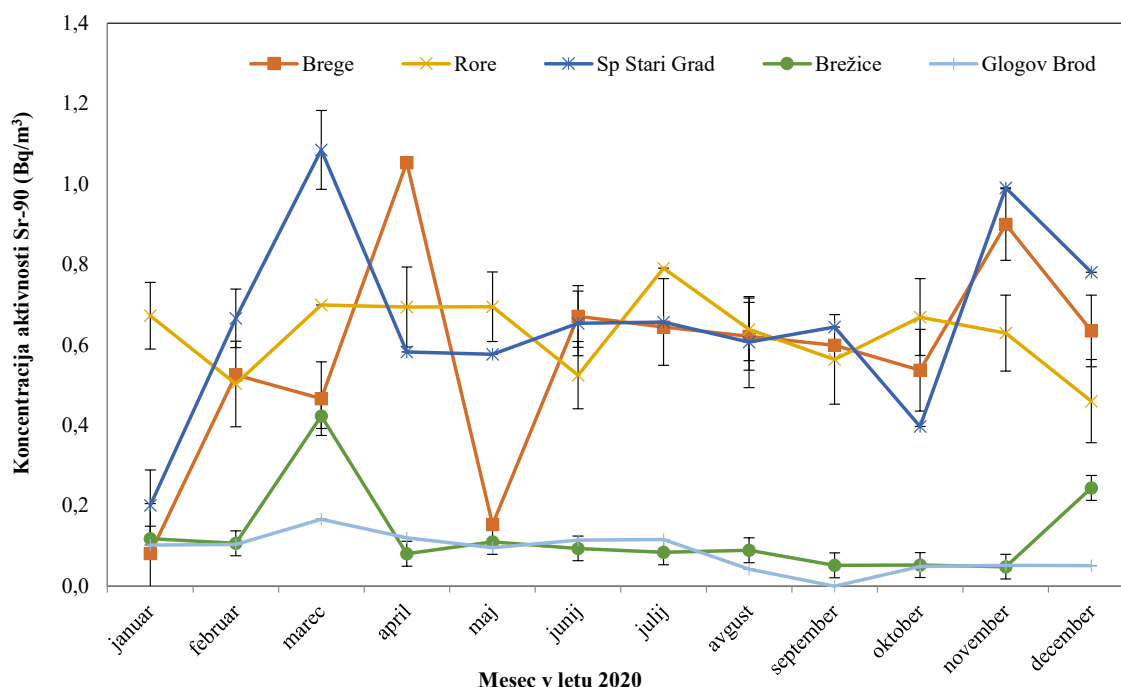
Slika 2.6: Povprečne letne koncentracije H-3 v vodovodih in podtalnici od leta 2005 do 2020 v Sloveniji in na Hrvaškem



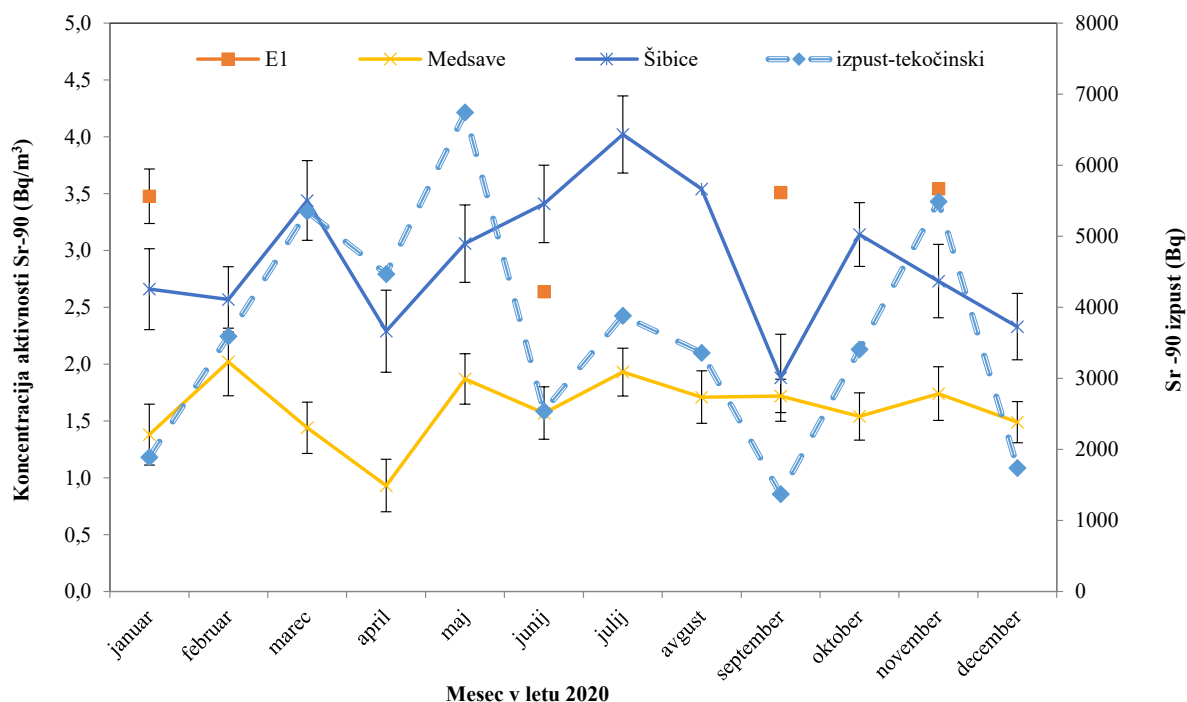
Tabela 2.2: Število vseh vzorcev, v katerih smo v okviru merilnega nadzora določali Cs-137 in Sr-90, in delež tistih, kjer so bile izmerjene vrednosti nad detekcijsko mejo

	št. mest	št vzorcev na leto	skupno število vzorcev	Cs-137	delež	Sr-90	delež
črpališča	5	12	60	5	0,08	35	0,58
vodovodi	2	4	8	1	0,13	6	0,75
vtine SLO	1	4	4	1	0,25	4	1,00
vtine HR	2	12	24	9	0,38	24	1,00
skupaj	10		96	16	0,17	69	0,72

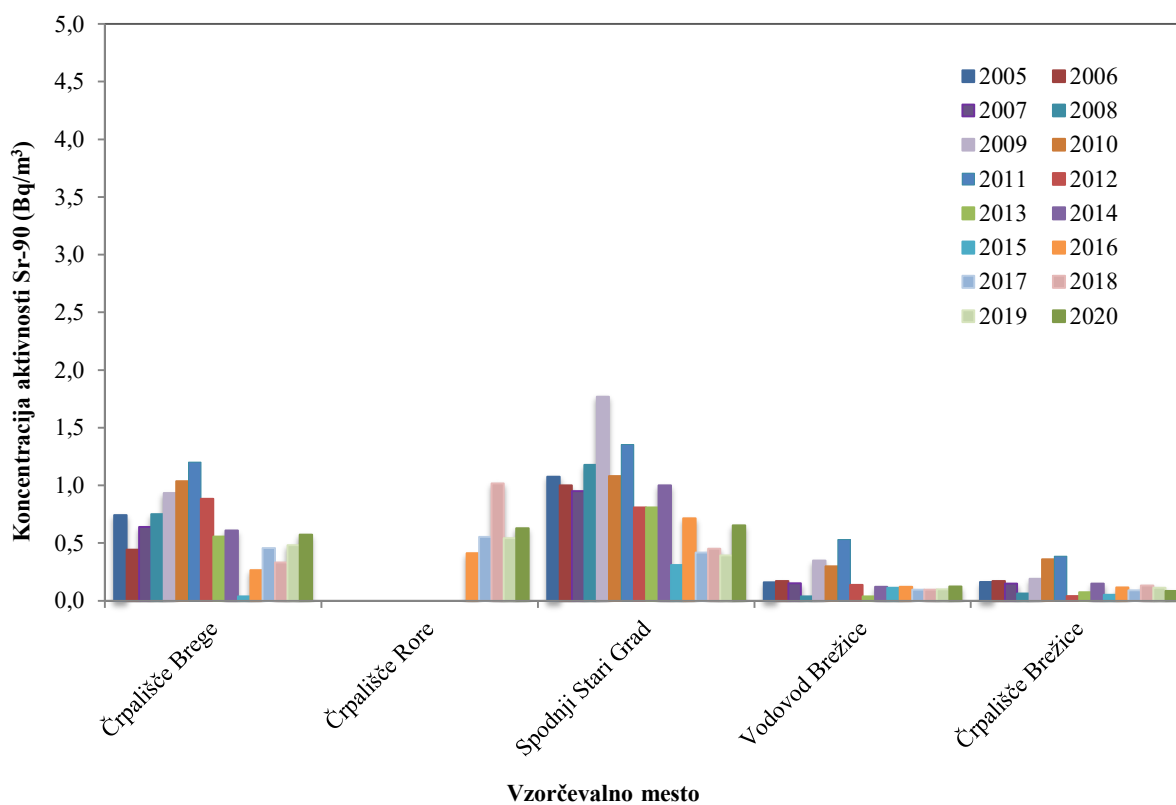
Na sliki 2.7 so prikazane koncentracije Sr-90 v mesečnih vzorcih vode črpališč in vodovodov za leto 2020. V grobem lahko rečemo, da vzorce iz petih vzorčevalnih mest lahko razdelimo v dve skupini. V brežiškem vodovodu in črpališču Glogov Brod so vrednosti v večini vzorcev pod mejo kvantifikacije in je vrednost definirana kot četrtna detekcijske meje. V drugi skupini so vsa ostala črpališča oziroma vodovodi, z večinoma merljivimi koncentracijami aktivnosti med $0,2 \text{ Bq/m}^3$ in $1,1 \text{ Bq/m}^3$. Koncentracija aktivnosti Sr-90 v pitni vodi je bila najvišja februarja v vodovodu Spodnji Stari Grad, mesec kasneje pa primerljiva vrednost v črpališču Brege. Podobni vrednosti sta bili na istih vzorčevalnih mestih izmerjeni še novembra. Vrednosti za vzorce iz črpališča Rore so bile stabilnejše kot v črpališču Brege in vodovodu Spodnji Stari Grad. Jasne korelacije s tekočinskimi izpusti NEK 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.



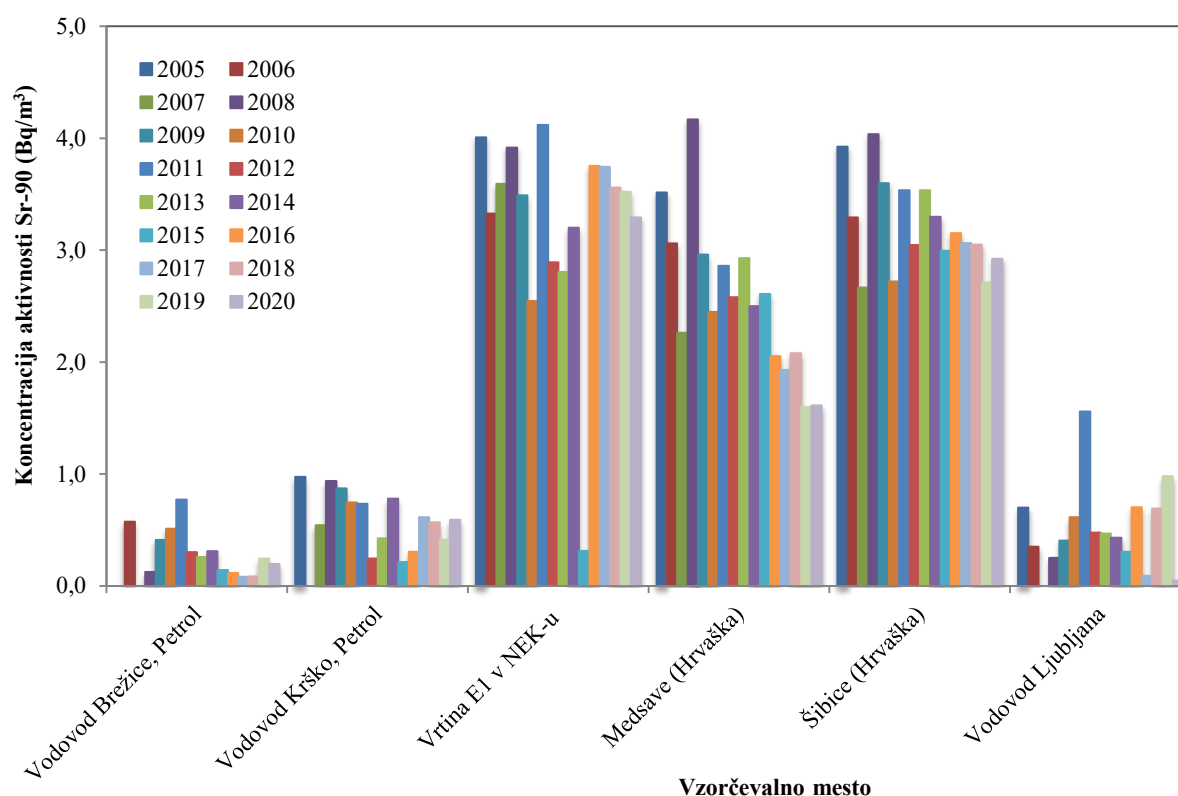
Slika 2.7: Koncentracija aktivnosti Sr-90 v mesečnih sestavljenih vzorcih iz črpališč in vodovodov v okolici NEK v letu 2020



Slika 2.8: Koncentracija aktivnosti Sr-90 v mesečnih posamičnih vzorcih vrtin ter mesečni tekočinski izpusti Sr-90 v Savo v letu 2020



Slika 2.9: Povprečne letne koncentracije aktivnosti Sr-90 v vodovodih in črpališčih v okolici NEK od leta 2005 do 2020



Slika 2.10: Povprečne letne koncentracije aktivnosti Sr-90 v vodovodih, črpališčih in podtalnici od leta 2005 do 2020 v Sloveniji in na Hrvaškem

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. Najnižje vrednosti so bile izmerjene v vzorcih iz vrtine Medsave, najvišje v vrtini Šibice. Vrednosti v vrtinah Šibice in E1 so enakega velikostnega reda. Poteki vrednosti v vrtinah se najboljše ujemajo z izpusti NEK od januarja do oktobra. Vrednosti so najbolj konstantne za vrtino Medsave. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Sr-90 na sliki 2.10 je v vseh treh vrtinah primerljivo z vrednostmi iz leta 2019.

Jod (I-131) in aktivacijski ter fisijski produkti

Jod I-131 in drugi aktivacijski in fisijski produkti v letu 2020 v vzorcih vodovodov, črpališč in vrtin niso bili zaznani.

Naravni radionuklidi

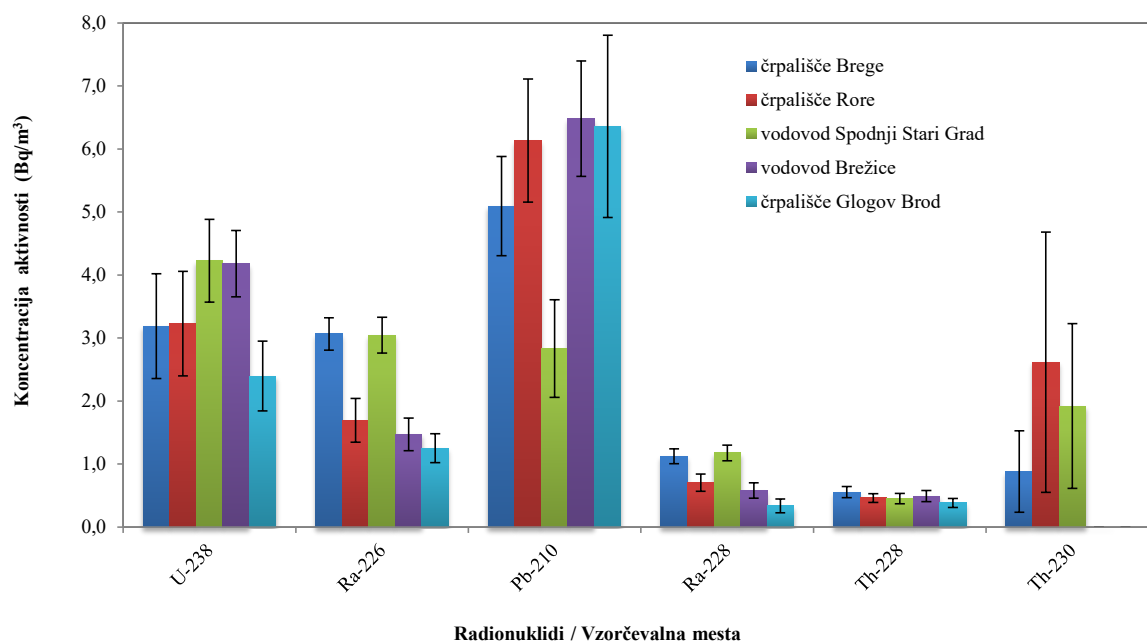
Koncentracije aktivnosti naravnega radionuklida K-40 so bile leta 2020 izmerjene na vseh vzorčevalnih mestih. Mesečne koncentracije aktivnosti K-40 v vseh črpališčih in obeh vodovodih so zelo podobne vrednostim iz leta 2019. Glede na K-40 lahko vodovode in črpališča razdelimo v dve skupini: v prvi sta črpališče Brege in Spodnji Stari Grad z vrednostmi okrog 70 Bq/m³, v drugi skupini pa preostala tri vzorčevalna mesta s povprečno vrednostjo okrog 25 Bq/m³. Višjo koncentracijo aktivnosti K-40 si razlagamo z večjim vnosom kalija ob gnojenju kmetijskih površin nad območji vodonosnikov [34] in z neposrednim vplivom padavinskega useda in višjih vodostajev Save.

Na sliki 2.11 so povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti nekaterih naravnih radionuklidov v krško-brežiških vodovodih in črpališčih. Če izvzamemo K-40, je v vzorcih ugotovljenega največ Pb-210 s povprečno vrednostjo okrog 5,4 Bq/m³, sledita mu U-238 s približno 3,4 Bq/m³ in Ra-226 z 2,1 Bq/m³.



Ra-228 in obeh torijevih radionuklidov je znatno manj. Najvišje povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti za Pb-210 je bilo izračunano na vodovodu Brežice ($6,5 \pm 3$) Bq/m³, za U-238 pa v vodovodu Spodnji Stari Grad ($4,2 \pm 0,7$) Bq/m³. Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-226 se gibljejo od 1,3 Bq/m³ (črpališče Glogov Brod) do 3,1 Bq/m³ (črpališče Brege). Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Ra-228 na črpališču Glogov Brod je bilo ($0,34 \pm 0,11$) Bq/m³, na vodovodu Spodnji Stari Grad pa ($1,2 \pm 0,1$) Bq/m³. Minimalne in maksimalne vrednosti se ne pojavljajo na istih vzorčevalnih mestih kot prejšnje leto.

Be-7 je bil izmerjen v vseh črpališčih in vodovodih v Krškem in Brežicah. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti Be-7 je bilo od 1,8 Bq/m³ v vodovodu Brežice do 4,9 Bq/m³ v vodovodu Spodnji Stari Grad, v povprečju približno 3,5 Bq/m³.



Slika 2.11: Povprečne letne koncentracije aktivnosti naravnih radionuklidov v vodovodih in črpališčih v letu 2020

OCENA UČINKOV

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. V tekočih in plinastih izpustih NEK je največ H-3 v obliki vode ali vodne pare. Pregledali smo vse morebitne korelacije tako s tekočinskimi kot plinastimi izpusti. Povezave s tekočinskimi izpusti v letu 2020 niso bile tako očitne kot leto poprej, obravnavamo jih v podpoglavjih o tritiju in stronciju. Izpusti so bili eni najnižjih v zadnjih 20 letih: v letu 2020 je bila skupna količina tekočinskih izpustov H-3 iz NEK 2,9 TBq, kar je približno petina izpusta v letu 2019 in manj kot 30 % desetletnega povprečja. Letni izpust H-3 v Savo je bil manj kot 7 % letne omejitve izpusta, postavljenega na 45 TBq. Največji tekočinski izpust H-3 je bil novembra (0,98 TBq).



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 v vzorcih vode iz črpališč in vodovodov v okolici NEK od leta 2005 do 2020 je prikazana na slikah 2.5 in 2.6. Povprečna letna koncentracija aktivnosti tritija v vodovodih in črpališčih v okolici NEK je tudi v letu 2020 enakega velikostnega reda kot v preteklih letih.

V tabelah 2.3 in 2.4 so prikazane izračunane letne efektivne doze zaradi vnosa umetnih radionuklidov 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 oseba) popije na leto 0,75 m³ vode, desetletni otrok 0,35 m³ vode in enoletni otrok 0,26 m³ vode na leto. Te predpostavke so v rabi že vrsto let, povzete so po priporočilih Svetovne zdravstvene organizacije in privzete tudi pri pripravi Pravilnikov po 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 m³), 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. 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 in K-40. Slednji ne prispeva k dozi zaradi homeostatskega uravnavanja količine kalija v telesu.

Tabela 2.3: Izračunane letne efektivne doze za odraslo referenčno osebo, otroka in dojenčka zaradi umetnih in naravnih radionuklidov v vodovodih ter črpališčih pitne vode in podtalnice v letu 2020 za krške vodovode in črpališča.

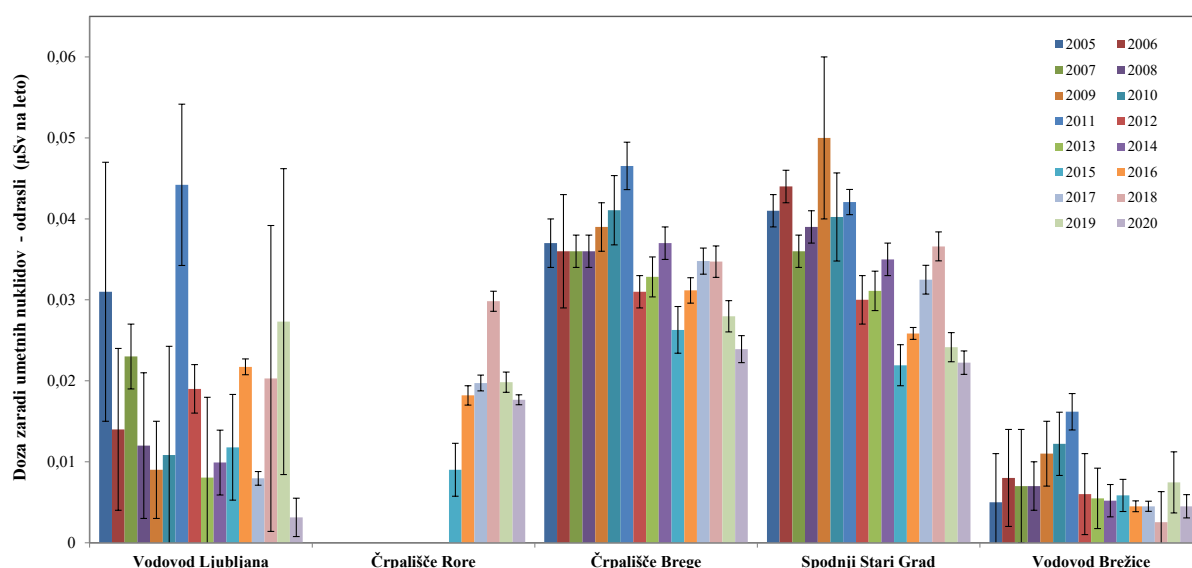
STAROSTNA SKUPINA	vrsta radionuklidov	vodovod Krško	Črpališče Brege	Črpališče Rore	Vodovod Krško (Spodnji Stari Grad)
		Letna efektivna doza (μSv)			
ODRASLI	umetni	0,019 ± 0,001	0,032 ± 0,002	0,021 ± 0,001	0,028 ± 0,001
	naravni	1,6 ± 0,2	4,4 ± 0,5	4,3 ± 1,5	3,2 ± 0,4
	vsota	1,6 ± 0,2	4,5 ± 0,5	4,3 ± 1,5	3,3 ± 0,4
OTROCI	umetni	0,016 ± 0,001	0,024 ± 0,002	0,018 ± 0,001	0,022 ± 0,001
	naravni	2,6 ± 0,4	6,4 ± 0,6	5,9 ± 2,0	4,9 ± 0,6
	vsota	2,6 ± 0,4	6,4 ± 0,6	5,9 ± 2,0	4,9 ± 0,6
DOJENČKI	umetni	0,044 ± 0,003	0,059 ± 0,005	0,047 ± 0,002	0,057 ± 0,004
	naravni	12,5 ± 1,6	26,8 ± 2,1	23,2 ± 6,6	21,8 ± 2,1
	vsota	12,5 ± 1,6	26,9 ± 2,1	23,2 ± 6,6	21,9 ± 2,1



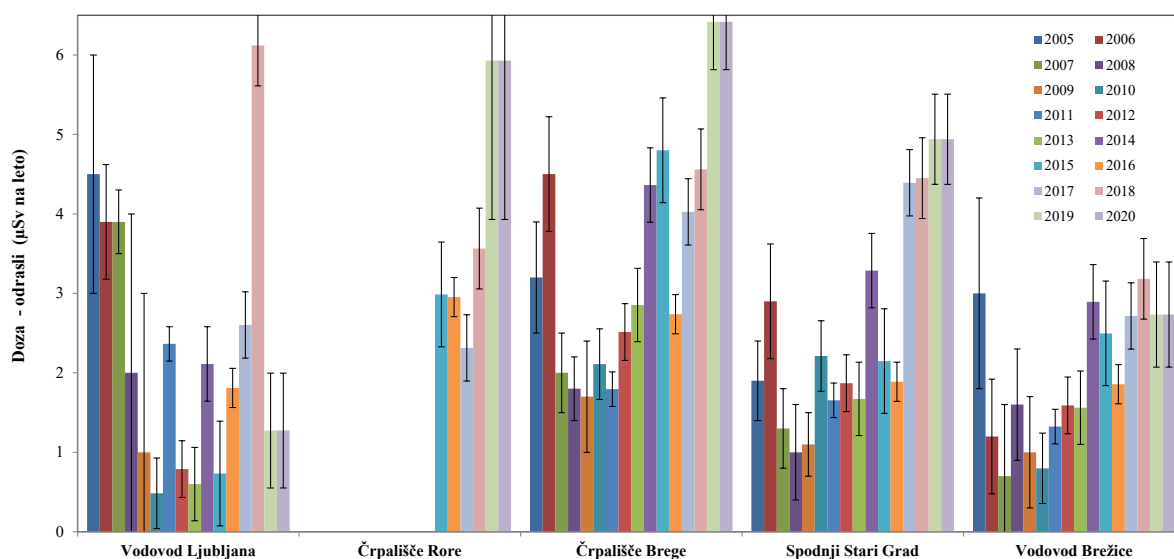
Tabela 2.4: Izračunane letne efektivne doze za odraslo referenčno osebo, otroka in dojenčka zaradi umetnih in naravnih radionuklidov v vodovodih ter črpališčih pitne vode in podtalnice v letu 2020 za brežiške vodovode in črpališča.

STAROSTNA SKUPINA	vrsta radionuklidov	vodovod Brežice	Vodovod Brežice (Volčanšek)	Črpališča Brežice (Glogov Brod)
		Letna efektivna doza (μSv)		
ODRASLI	umetni	$0,0048 \pm 0,0014$	$0,004 \pm 0,0007$	$0,003 \pm 0,000$
	naravni	$1,9 \pm 0,5$	$4,4 \pm 1,4$	$4,0 \pm 1,0$
	vsota	$1,9 \pm 0,5$	$4,4 \pm 1,4$	$4,0 \pm 1,0$
OTROCI	umetni	$0,0045 \pm 0,0014$	$0,0034 \pm 0,0007$	$0,003 \pm 0,000$
	naravni	$2,7 \pm 0,7$	$6,0 \pm 1,8$	$5,4 \pm 1,3$
	vsota	$2,7 \pm 0,7$	$6,0 \pm 1,8$	$5,4 \pm 1,3$
DOJENČKI	umetni	$0,0125 \pm 0,0041$	$0,009 \pm 0,002$	$0,007 \pm 0,001$
	naravni	$11,1 \pm 2,4$	$22,8 \pm 5,8$	$19,9 \pm 4,3$
	vsota	$11,1 \pm 2,4$	$22,8 \pm 5,8$	$19,9 \pm 4,3$

V tabelah 2.3 in 2.4 so ocene letnih efektivnih doz za odrasle, otroke in dojenčke zaradi pitja vode iz krških in brežiških vodovodov oziroma črpališč. Poglejmo si nekaj povprečij za odraslo referenčno osebo. Zaradi prisotnosti umetnih radionuklidov v krškem vodooskrbnem sistemu prejme referenčna oseba $0,027 \mu\text{Sv}$. Od naravnih radionuklidov k celotni dozi največ prispeva Pb-210. V brežiškem vodovodnem sistemu je ocenjena povprečna letna efektivna doza v letu 2020 za referenčno osebo zaradi prisotnosti umetnih radionuklidov $0,004 \mu\text{Sv}$. Celotna povprečna ocenjena letna doza za referenčno osebo zaradi prisotnosti umetnih in naravnih radionuklidov v pitni vodi je $1,9 \mu\text{Sv}$ v vodovodu Brežice in $4,0 \mu\text{Sv}$ na črpališču Glogov Brod. Od naravnih radionuklidov tudi tu k celotni dozi največ prispeva Pb-210. V krškem vodovodnem sistemu je prispevek umetnih radionuklidov približno sedemkrat višji kot v brežiškem vodovodu, kar je bilo opaženo tudi v preteklih letih. Razlog je črpanje krške pitne vode iz vodonosnika, ki se delno napaja iz Save in Krke. V ljubljanskem vodovodu je bil prispevek umetnih radionuklidov ocenjen na $0,05 \mu\text{Sv}$ na leto za odraslo referenčno osebo, kar je manj kot $0,6 \%$ celotne ocenjene letne doze zaradi prisotnosti umetnih in naravnih radionuklidov ($0,83 \mu\text{Sv}$) v pitni vodi. Celotna ocenjena letna doza je za Ljubljančane podobna kot za prebivalce Brežic in nižja kot za prebivalce 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).



Slika 2.12: Ocenjeni prispevek umetnih radionuklidov k letni dozi za odraslo osebo od leta 2005 do 2020 na različnih vzorčevalnih lokacijah



Slika 2.13: Ocenjena letna doza zaradi prisotnosti umetnih in naravnih radionuklidov za odraslo osebo od leta 2005 do 2020 na različnih vzorčevalnih lokacijah

Na sliki 2.12 je prikazana primerjava ocenjenih letnih efektivnih doz za odraslo referenčno osebo zaradi prisotnosti umetnih radionuklidov v črpališčih Brege in Rore ter vodovodu Spodnji Stari Grad, ki so blizu NEK, v primerjavi z vodovodom Ljubljana in vodovodom Brežice. 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 Ra-226, Pb-210 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.

SKLEPI

Med umetnimi radionuklidi sta bila v pitni vodi in podtalnici v letu 2020 izmerjena H-3 in Sr-90. Cs-137 je bil večinoma zaznan, ne pa tudi izmerjen, ker so bile vrednosti pod mejo kvantifikacije. I-131 v letu 2020 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 v Bregah in Spodnjem Starem Gradu so najvišje v Sloveniji in so nedvomno posledica učinka delovanja NEK, vendar tudi najvišje vrednosti še vedno dosegajo le slaba 2 % mejnih vrednosti direktive EU za pitne vode. Tudi v teh dveh vodovodih oziroma črpališčih so se vrednosti v zadnjem letu znatno znižale.

V letu 2020 je bil tekočinski izpust po aktivnosti eden nižjih v zadnjih dvajsetih letih. Korelacij med vrtinami blizu reke Save in izpusti tudi zato najbrž nismo opazili oziroma niso bile tako izrazite kot prejšnji dve leti, ko smo spremenjene vrednosti v nekaterih vrtinah povezovali s spremenjenim hidrološkim režimom na krško-brežiškem polju zaradi napolnitve akumulacije HE Brežice. Leto 2020 je bilo glede na razlike v koncentracijah aktivnosti v vrtinah mirno leto, saj so bile najvišje izmerjene koncentracije praktično istega velikostnega razreda kot koncentracije aktivnosti v reki Savi. Koncentracije aktivnosti tritija v VOP-4 in vrtini Medsave v letu 2020 niso bile korelirane med seboj in z izpusti iz NEK. V vrtini V-7/77, ki načeloma sledi izpustom NEK z večjo zakasnitvijo kot vrtini VOP-4 in Medsave, smo v letu 2020 opazili le relaksacijo in upad aktivnosti po večjih izpustih v letu 2019, ki so izzveneli v prvi polovici leta 2020.

Največja ocenjena letna efektivna doza v okolici NEK v letu 2020 zaradi pitja vodovodne vode je bila na krško-brežiškem polju izračunana za črpališče Brege (4,5 μSv za odraslo referenčno osebo, 6,4 μSv za otroke in 26,9 μSv za dojenčke). Vrednosti so nekoliko višje kot v letu 2019. Praktično vsa obremenitev gre na račun naravnih radionuklidov. Umetni radionuklidi prispevajo k obremenitvi kvečjemu delež 1,2 %. Za otroke in dojenčke je ta delež še manjši.

Ocenjena letna doza v ljubljanskem vodovodu v letu 2020 je 0,8 μSv za odraslo referenčno osebo, 1,3 μSv za otroka in 5,9 μSv za dojenčka, kar je skoraj trikrat manj kot v letu 2019 in dvakrat manj kot za vodovod Krško. Obremenitev z umetnimi radionuklidi iz ljubljanskega vodovoda je ocenjena na 0,6 % celotne izračunane letne doze zaradi radionuklidov v pitni vodi za odraslo referenčno osebo.

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 mejnimi koncentracijami aktivnosti, ki so izračunane ob upoštevanju, da je vrednost mejne efektivne doze 100 μSv na leto [9].



3 RADIOAKTIVNOST V USEDIH

POVZETEK

Pregledali smo merske rezultate s treh lokacij za padavine in z osmih mest za suhe usede v okolici NEK ter jih primerjali z vrednostmi z referenčne točke v Ljubljani. Tudi v letu 2020 je bilo izmerjenih po 48 padavinskih vzorcev in vzorcev vazelinskih plošč. Uporabljene so bile tri različne analize 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, Sr-90, U-238, Ra-226, Ra-228, Pb-210, Th-228 in K-40. Izmerjene koncentracije aktivnosti usedov se ne odlikujejo 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 odmiške od dolgoletnih povprečij. V splošnem ni opaziti korelacije med izpusti jedrske elektrarne in vsebnostjo radionuklidov v okolju, razen pri H-3. Pri tritiju se opazi, da je koncentracija aktivnosti H-3 v Bregah in v Krškem na vsakoletni ravni višja kot na referenčnih mestih v Ljubljani in Dobovi, kar lahko pripišemo izpustom iz NEK. To sklepamo na podlagi korelacijskih koeficientov med izmerjeno koncentracijo H-3 in zračnimi izpusti, ki v letu 2020 za vzorčevalni mesti Brege in Krško kažejo na korelacijo, za referenčno vzorčevalno mesto v Ljubljani pa ne.

Izračunali smo efektivno dozo zaradi zunanjega sevanja useda in zaradi zaužitja rastlin z usedlimi radionuklidi za referenčno osebo v okolici jedrske elektrarne in na referenčni točki v Ljubljani. Prispevek umetnih radionuklidov v okolici NEK k skupni dozi je zanemarljiv. 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, 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 pridejo z užitnimi deli v prehrano 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 2020 so bili v vzorcih padavin in vazelinskih plošč izmerjeni H-3, umetni radionuklidi Cs-137, Sr-90, kozmogena Be-7 in Na-22 ter naravni radionuklidi K-40, U-238, Th-228, Th-230, Ra-226, Ra-228 in Pb-210.

OKOLJSKI VZORCI

Značilnosti vzorčenja

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

Lovilniki padavin so postavljeni v Krškem, Bregah, Dobovi in na referenčni lokaciji v Ljubljani (IJS). Instrument sestavljata lijak in neprozoren 50-litrski plastični sod, ki sta povezana z neprozorno plastično cevjo. Lijak iz polirane nerjavne pločevine, ki zajema padavine na efektivni površini 0,25 m², je opremljen s kovinsko mrežico za prestrezanje listja in drugih predmetov. Oblikovan je tako, da so izgube padavin zaradi pršenja vode iz lijaka minimalne. Ob lovilniku padavin v Krškem in Dobovi je tudi merilnik količine padavin, ki se odčitava dnevno, za lokaciji Brege in Ljubljana pa uporabljamo meritve ARSO.

Zbrani tekočinski vzorec padavin se razdeli na dva dela: v 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 2020, IJS-DP-13462*, marec 2021.

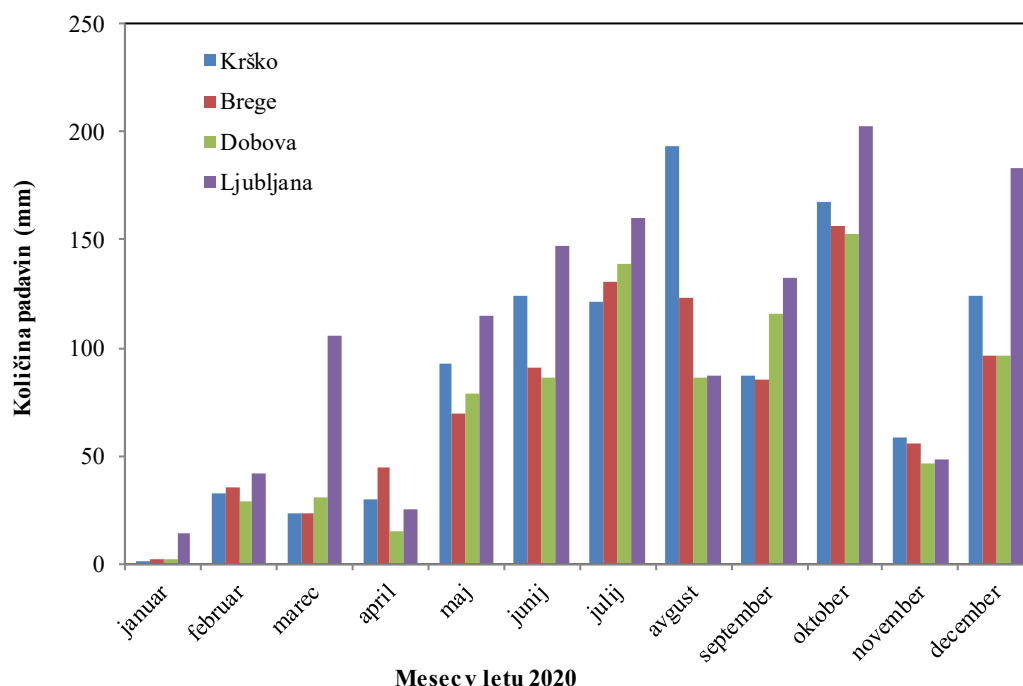
V vzorcih padavin so bili ugotovljeni H-3, Be-7, K-40, Cs-137, Sr-90 ter potomci uranove in torijeve razpadne vrste. Analiza Y-90 ni bila opravljena, zato so v merskih tabelah podane koncentracije aktivnosti Sr-89/Sr-90, čeprav praktično ni možnosti, da bi bil v vzorcju tudi Sr-89, saj ta kratkoživi radionuklid v izpustih NEK v letu 2020, podobno kot v prejšnjih letih, ni bil zaznan.



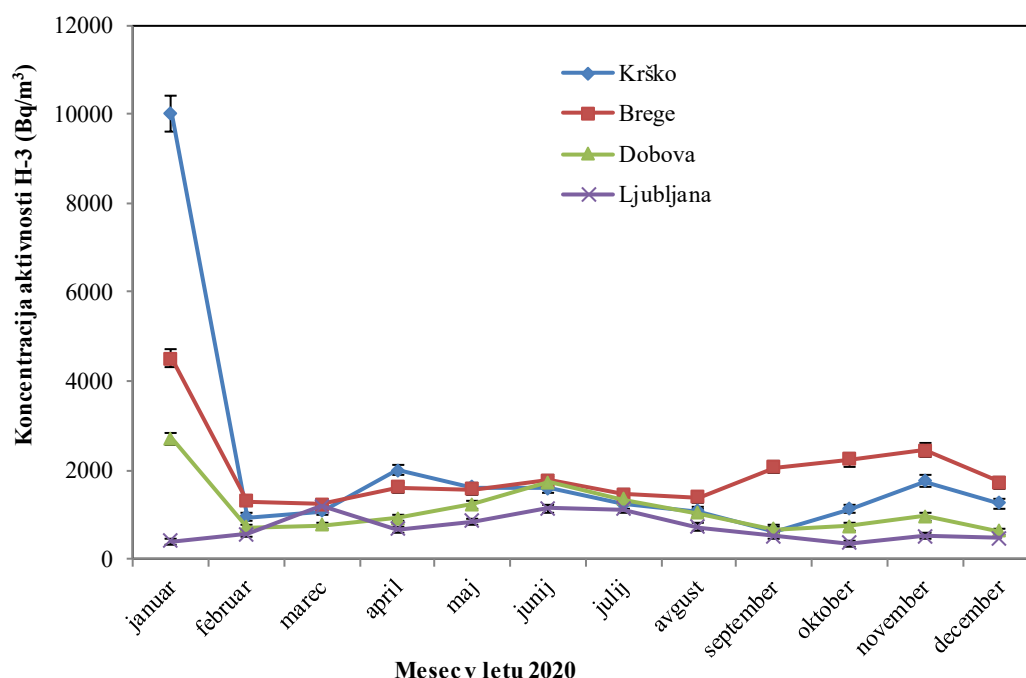
V tabeli 3.1 so izpisani meseci, v katerih smo izmerili maksimalno koncentracijo aktivnosti za posamezen radionuklid. Mesec januar je izvzet iz statističnih primerjav zaradi majhnih količin padavin in posledično majhne količine vzorca. Na vzorčevalnih mestih v okolici NEK je bil najvišji izmerek za tritij meseca novembra v Bregah, sledita mu izmerka v Krškem v aprilu in v Dobovi v marcu. V Ljubljani je bila najvišja vrednost za tritij v mesecu marcu. Največ, kar 7 od 16 vzorcev z maksimalnimi koncentracijami drugih štirih obravnavanih radionuklidov, je iz zimskih mesecev. Na lokacijah v Ljubljani in Krškem so bile najvišje koncentracije aktivnosti Be-7 izmerjene v poletnem času, v Bregah v aprilu in v Dobovi v februarju. Sr-90 je v letu 2020, kot tudi leto poprej, izvzet iz obravnave, saj so praktično vse izmerjene vrednosti pod mejo detekcije.

Tabela 3.1: Pojavljanje najvišjih izmerjenih mesečnih koncentracij aktivnosti za H-3, Cs-137, Be-7, K-40 in Pb-210 v vzorcih padavin v Bregah, Krškem, Dobovi in Ljubljani v letu 2020

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



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



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.

V letu 2020 je bila količina padavin na letni ravni v Ljubljani primerljiva s količino padavin v letu 2019. Količina padavin v Bregah (meteorološka merilna postaja na letališču Cerklje na Dolenjskem), Krškem in Dobovi pa je bila za približno 25 % nižja od leta poprej. Največ dežja na vzorčevalnih mestih v okolici NEK je padlo v Krškem, najmanj v Dobovi. V celem letu je največ padavin padlo v Ljubljani (1 263 mm), kar je približno 30 % več od povprečja v okolici NEK. Mesec januar je bil izrazito suh na večini vzorčevalnih mest. Mesečne količine padavin v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani so prikazane na sliki 3.1. Periode izračuna količin padavin so usklajene s termini vzorčenj.

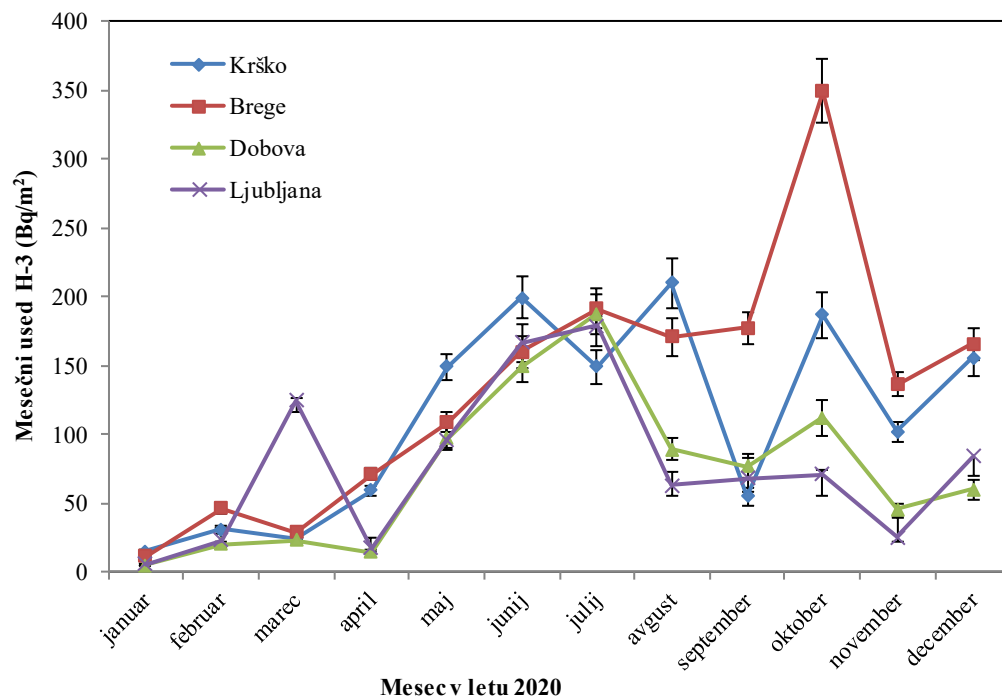
Tritij (H-3)

Koncentracije aktivnosti tritija v padavinah so prikazane na sliki 3.2. Povprečja mesečnih koncentracij aktivnosti, z izjemo januarskih vrednosti, so primerljiva s povprečji mesečnih koncentracij v letu 2019. Koncentracije aktivnosti tritija v januarju so na vseh vzorčevalnih mestih v okolici NEK povišane. Ker je bilo padavin malo, se je tritij iz zraka spral z manjšo količino padavin in je v vzorcu koncentriran. Zračni izpusti v letu 2020 so bili za četrtno višji kot v letu 2019 in za 30 % nižji od leta 2018. Največji zračni izpust tritija, 21 % celoletnega izpusta, je bil v mesecu novembru.

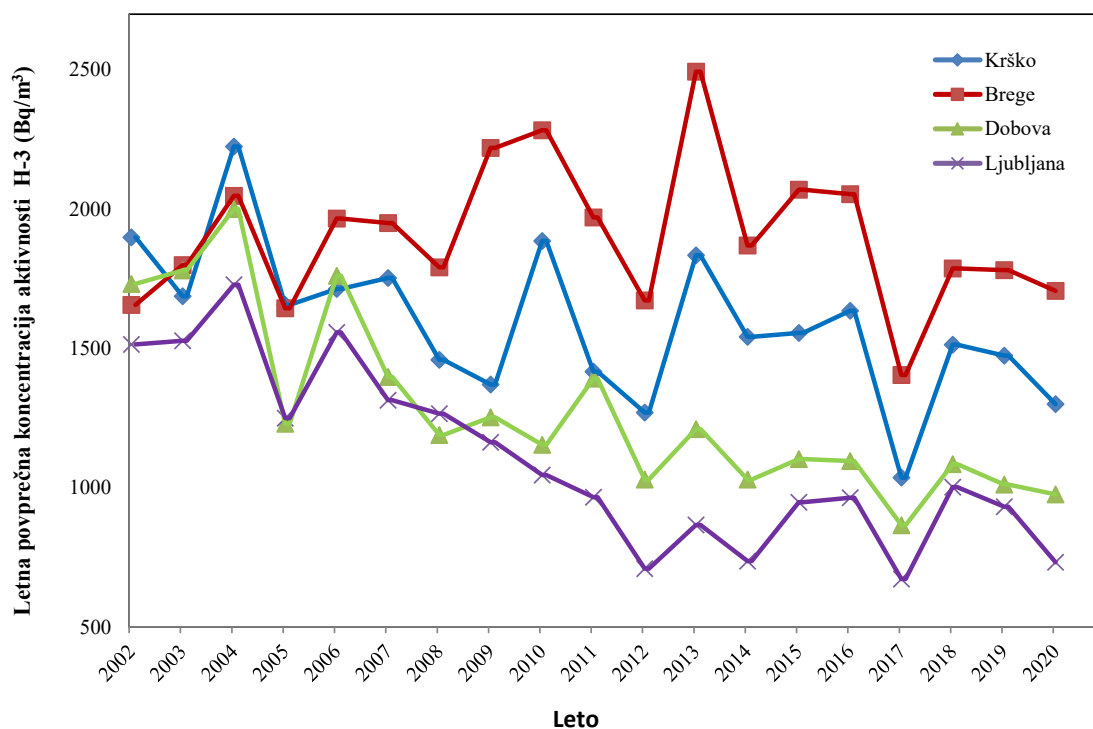
V novembru je bila koncentracija tritija v Bregah višja od povprečne vrednosti, kar se sklada z zračnimi izpusti, ki so bili v zadnjem štirimesečju večji od letnega povprečja. Zveza med zračnimi izpusti in izmerjeno koncentracijo aktivnosti H-3 je letos zaznana v Bregah in v Krškem, merilo za korelacijo je vzorčni korelacijski (Pearsonov) koeficient [35], ki ima na obeh lokacijah vrednost malo čez 0,6. Na ostalih dveh vzorčevalnih mestih je koeficient korelacije negativen oziroma blizu ničle, kar kaže na to, da ni povezave. Najvišja mesečna koncentracija tritija v padavinskih vzorcih v okolici NEK je bila v mesecu novembru izmerjena v Bregah, najnižja pa decembra v Dobovi. Na referenčni lokaciji v Ljubljani so bile vrednosti primerljive z izmerjenimi vrednostmi v Dobovi. 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 v Bregah in 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 2006–2020



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.

V Bregah in tudi Krškem je vzorec koncentracij aktivnosti tritija nekoliko drugačen kot v Dobovi, kar je lepo razvidno iz dolgoletnih letnih povprečij na sliki 3.4. Povprečje mesečnih koncentracij aktivnosti za leto 2020 je bilo na vseh lokacijah nižje kot v letu 2019; najnižje v Ljubljani, najvišje v Bregah, kar je že ustaljen večletni vzorec.

Učinek delovanja NEK na koncentracije aktivnosti tritija v neposredni bližini elektrarne je opazen, če pogledamo letna povprečja, ki so v Bregah in 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, ne nujno 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, so poleti ti koeficienti višji kot pozimi, kar pomeni, da je prenos tritija iz ozračja v padavinske usede učinkovitejši poleti kot pozimi.

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 3.6).

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 2020

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

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 [36], [37]. 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.

Ogljik (C-14)

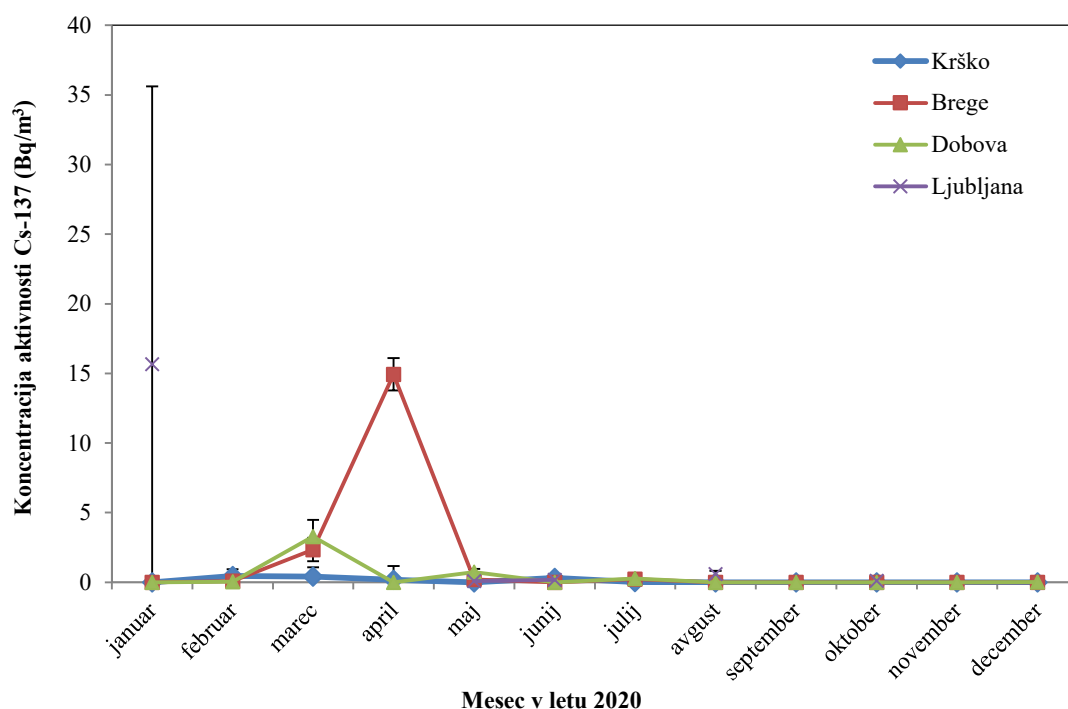
C-14 ni vključen v program meritev padavinskih vzorcev.

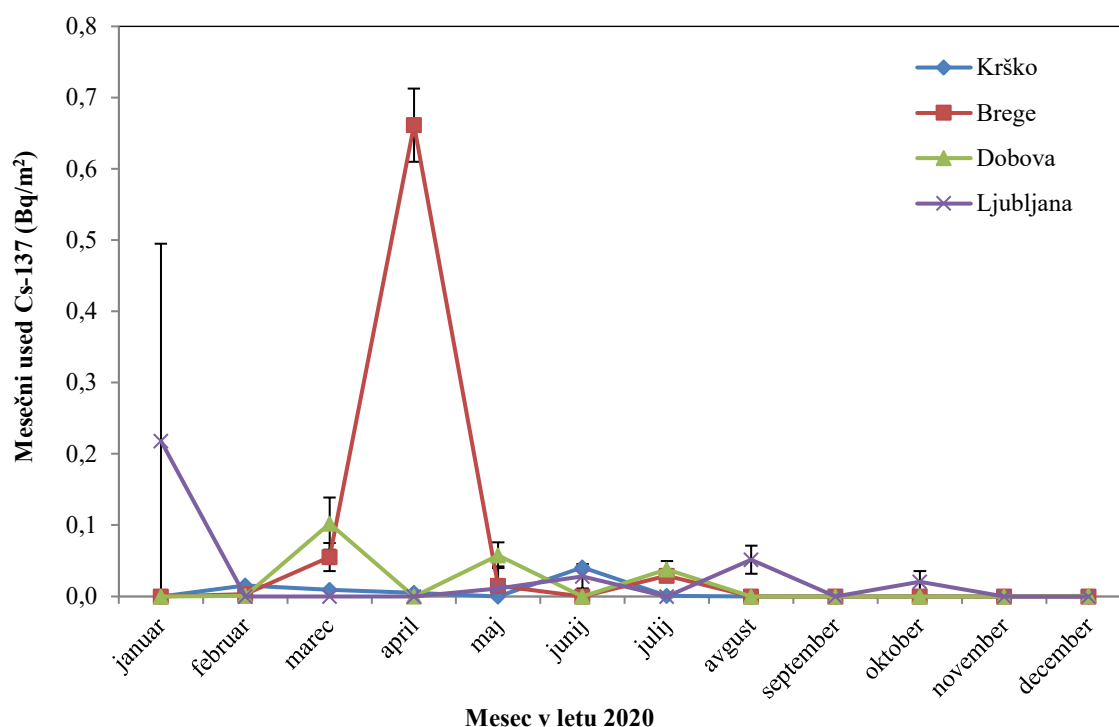

Tabela 3.3: Povprečni letni padavinski used Be-7

Vzorčevalno mesto	Letno povprečje padavinskega useda Be-7 (Bq/m ²)
Ljubljana	42 ± 1
Brege	21 ± 1
Krško	58 ± 2
Dobova	30 ± 1

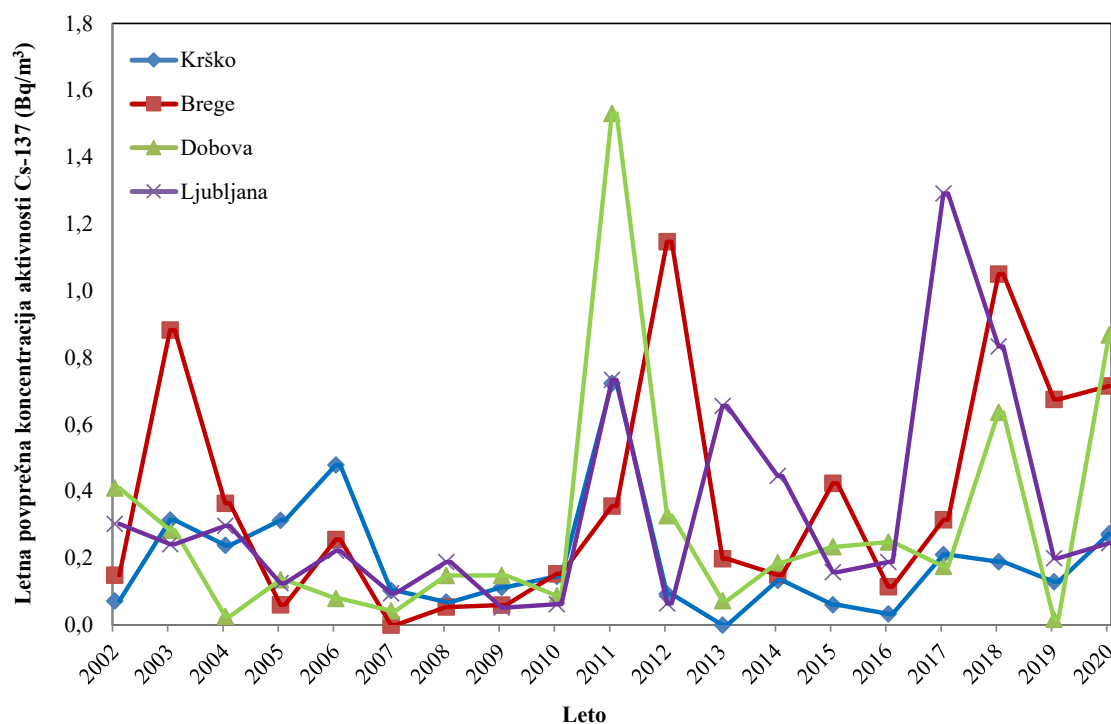
Cezij (Cs-137)

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 2020 je bila največja vrednost izmerjena na vzorčevalni lokaciji v Ljubljani (16 ± 20) Bq/m³, za njo po vrsti v aprilu v Bregah (15 ± 1) Bq/m³, v marcu v Dobovi (3 ± 1) Bq/m³ in v februarju v Krškem ($0,5 \pm 0,5$) Bq/m³. V okviru negotovosti je večina vrednosti zelo podobnih. Večji odmike, na primer v aprilu v Bregah, bi lahko pripisali vetrovni resuspenziji s tal, v januarju v Ljubljani pa majhni količini vzorca. Ti dve vrednosti nista bili upoštevani pri statističnih primerjavah in izračunu letnih prejetih doz. 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 [16]. 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, in se to pokaže na vseh vzorčevalnih mestih (slika 3.7).

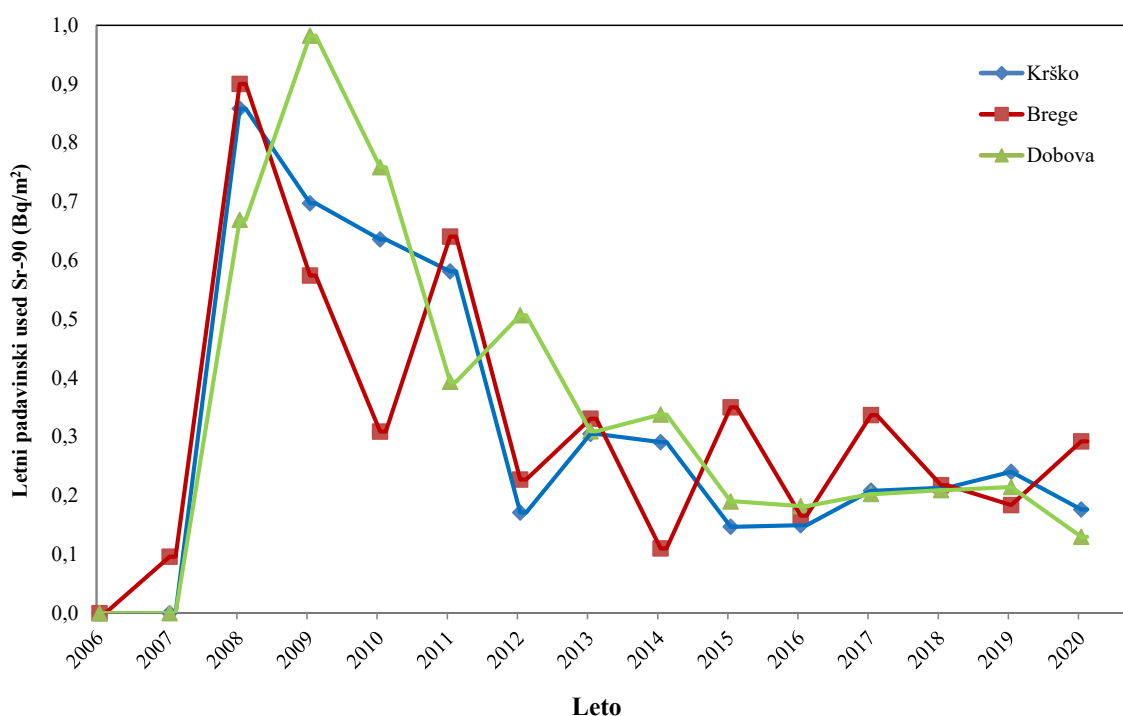

Slika 3.5: Mesečne koncentracije aktivnosti Cs-137 v padavinah v Krškem, Bregah, Dobovi in Ljubljani



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 2006–2020. Izrazito povišanje v letu 2011 na vseh vzorčevalnih mestih je posledica nesreče v Fukušimi.



Slika 3.8: Letni padavinski used Sr-90 za obdobje 2006–2020

Stroncij (Sr-90)

V letu 2020 so bile vse vrednosti za Sr-90 pod mejo detekcije, razen aprila v Bregah, kjer je bila mesečna koncentracija aktivnosti (3 ± 1) Bq/m³. Ostale vrednosti v tabelah so izpeljane iz detekcijskih mej, kjer predpostavimo vrednost četrtnine 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 2020. Usedi oziroma njihove predvidene vrednosti so v letu 2020 primerljive z vrednostmi iz prejšnjih let.

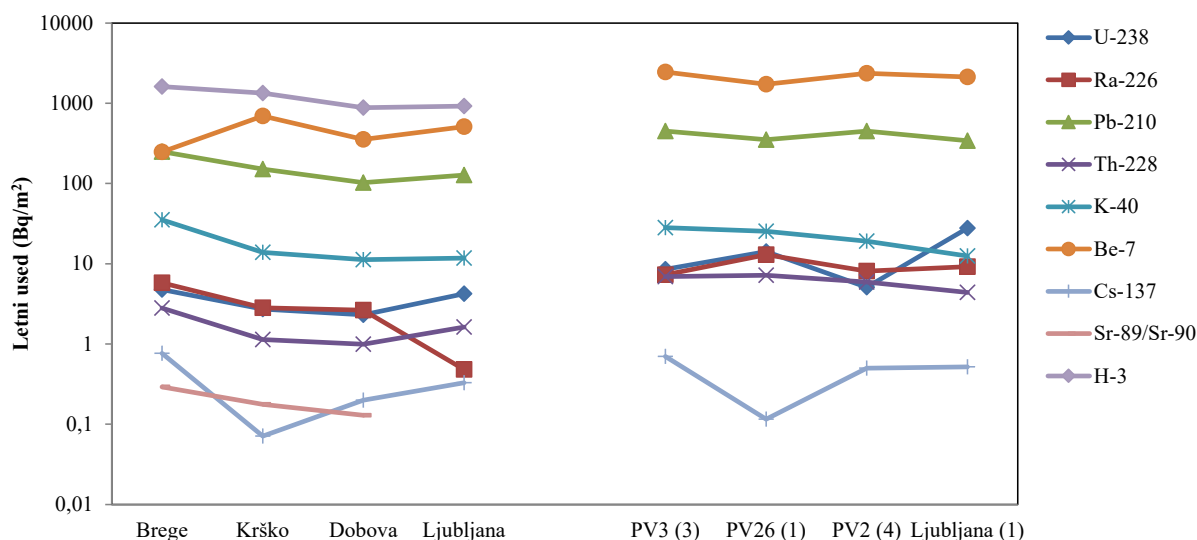
Jod (I-131)

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

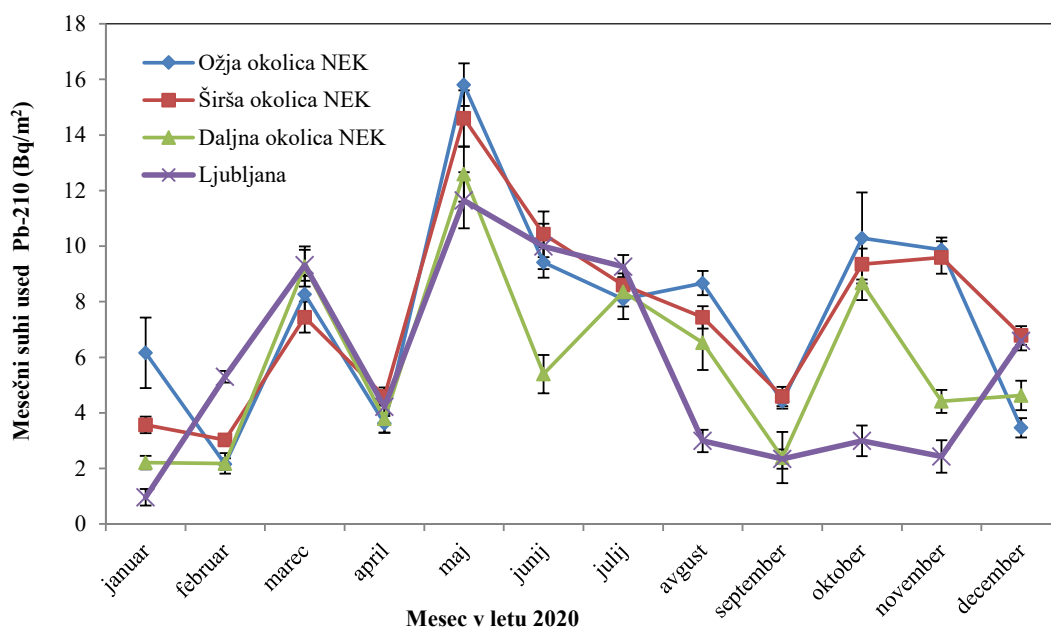
Suhi used

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 zgoščenki v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško - Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462*, marec 2021.

V vzorcih suhega useda so bili v letu 2020 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.



Slika 3.9: Letni usedi v padavinah, zbranih v lovilnikih deževnice (leva stran grafa) in na vazelinskih ploščah na različnih lokacijah okrog NEK (desna stran grafa)



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 (daljnja okolica NEK)

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 kot tudi v Ljubljani so bile izmerjene v mesecu maju.



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 z ingestijsko dozo. 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 58 % in 82 %. Celotna efektivna doza zaradi zunanjega sevanja useda za umetne radionuklide v okolici NEK je v letu 2020 v okviru razsutja podatkov primerljiva z letom 2019.

Tabela 3.4: Efektivne doze zaradi zunanjega sevanja iz useda v letu 2020 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 prebivalec zadržuje 20 % časa na prostem in da je faktor ščitenja pri zadrževanju v hiši 0,1.

Starostna skupina	Radionuklidi	Okolica NEK (povprečje lokacij)	Ljubljana
		doza (μSv)	
ODRASLI OTROCI DOJENČKI	UMETNI	$(2 \pm 1) \text{ E-4}$	$(5 \pm 4) \text{ E-4}$
	VSI	$0,06 \pm 0,02$	$0,07 \pm 0,003$

Tabela 3.5: Efektivne doze zaradi zaužitja rastlin z usedlimi radionuklidi v letu 2020 za odrasle, otroke in dojenčke.

Starostna skupina	Masa zaužitega rastlinja (kg)	Radionuklidi	Okolica NEK (povprečje lokacij)	Ljubljana
			doza (μSv)	
ODRASLI	25	UMETNI	$0,011 \pm 0,002$	$0,008 \pm 0,001$
		VSI	41 ± 8	35 ± 1
OTROCI	15	UMETNI	$0,009 \pm 0,001$	$0,006 \pm 0,001$
		VSI	69 ± 13	58 ± 2
DOJENČKI	2,5	UMETNI	$0,028 \pm 0,003$	$0,015 \pm 0,003$
		VSI	309 ± 55	262 ± 10



Efektivna doza zaradi zunanjega sevanja umetnih radionuklidov prispeva v okolici NEK približno 0,3 % in v Ljubljani približno 0,7 % 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 2020 zanemarljivi in višji v Ljubljani kot v okolici NEK.

Efektivno dozo zaradi zaužitja rastlin z usedlimi radionuklidi izračunamo s produktom koncentracije aktivnosti radionuklidov v masi 1 kg sveže rastline, ki jo zaužije človek, mase zaužitega rastlinja (25 kg za odraslo osebo, 15 kg za otroke in 2,5 kg za dojenčke) in doznega faktorja [4], [9], [47]. Pri tem šteje le used na zeleni del rastlin in posledični vnos radionuklidov v rastlino, medtem ko prevladujoči transport radionuklidov iz zemlje ni vštet. Zajet 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 2020 je primerljiva z letom 2019: prispevek od umetnih radionuklidov je za približno 30 % manjši, prispevek od naravnih radionuklidov pa med 25 % in 41 % večji. Efektivna doza je bila v letu 2020 za umetne in naravne radionuklide v okolici NEK primerljiva z referenčno lokacijo v Ljubljani. Ugotovitev velja za vse starostne skupine. K skupni efektivni dozi zaradi zaužitja rastlin tako v Ljubljani kot v okolici NEK največ prispeva naravni izotop Pb-210, in sicer kar 98 % pri otrocih in odraslih in 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 0,03 %, v Ljubljani pa 0,02 %, kar je primerljivo, oziroma celo manjše kot v letu 2019. Za otroka in dojenčka je prispevek še manjši. Umetni radionuklidi so torej pri računanju zunanjih doz v letu 2020 zaradi vnosa s hrano zanemarljivi.

SKLEPI

V letu 2020 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 v Bregah in Krškem (Stara Vas). Po splošno uporabljani metodologiji sicer praktično ne vpliva na dozno obremenitev zaradi zunanjega sevanja.

Med umetnimi radionuklidi je bil v padavinah občasno ugotovljen Cs-137. Zaznan je bil v 42 % vzorcev padavin in v 31 % vazelinskih plošč. Letna povprečna koncentracija aktivnosti za Cs-137 je bila v letu 2020 v primerjavi z izmerjenimi vrednostmi iz leta 2019 višja na vseh merilnih mestih, razen na Bregah, kjer je bila podobna kot prejšnje leto. Vzrok za detekcijo Cs-137 v padavinah je najverjetneje talna resuspenzija in kurjenje trdih goriv v zimskih mesecih. Sr-90 je bil v letu 2020 detektiran samo v enem padavinskem vzorcu in sicer v aprilu v Bregah, kjer je bila mesečna koncentracija aktivnosti $(3 \pm 1) \text{ Bq/m}^3$. 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 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 6,6 nSv, na ograji NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja) pa 7,9 nSv, in zajema vse izpuščene radionuklide. Lokacije vzorčenja imisij so bile v okviru rednega nadzora radioaktivnosti zraka v okolici NEK v letu 2020 enake kot prejšnja leta. Za primerjavo ocenjujemo tudi efektivne doze zaradi koncentracij aktivnosti radionuklidov v okolju, t.i. okoljsko dozo, bodisi naravnih bodisi umetnih radionuklidov, ki so posledica globalne kontaminacije zaradi jedrskih poskusov in nesreč. Ocenjene letne efektivne okoljske doze prebivalcev na podlagi meritev radioaktivnosti z aerosolnimi filtri zaradi inhalacije (vdihavanja) in imerzije (zunanjega sevanja) umetnih radionuklidov (0,27 nSv) so zanemarljive in več velikostnih redov nižje od letne efektivne doze, ki jo zaradi inhalacije povzročajo naravni radionuklidi (34 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 aktivnosti radionuklidov na izviru oziroma emisij so vhodni podatki za modelne izračune, s katerimi se napoveduje njihova 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 imisij se uporabljajo izmerjene koncentracije na okoliških zračnih črpalkah, medtem ko so pri oceni doz zaradi emisij privzete modelsko določene koncentracije. 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 odvzemajo vzorci za meritve joda (I-131), tritija (H-3), ogljika (C-14), aerosolov (aerosolni filtri v monitorju RM-24) ter opravljajo meritve žlahtnih plinov. Njihove koncentracije aktivnosti na izbranih lokacijah v okolici NEK se ugotavljajo z uporabo Lagrangeevega disperzijskega modela Spray [40]–[42], 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 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 doze³) torej

³ 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

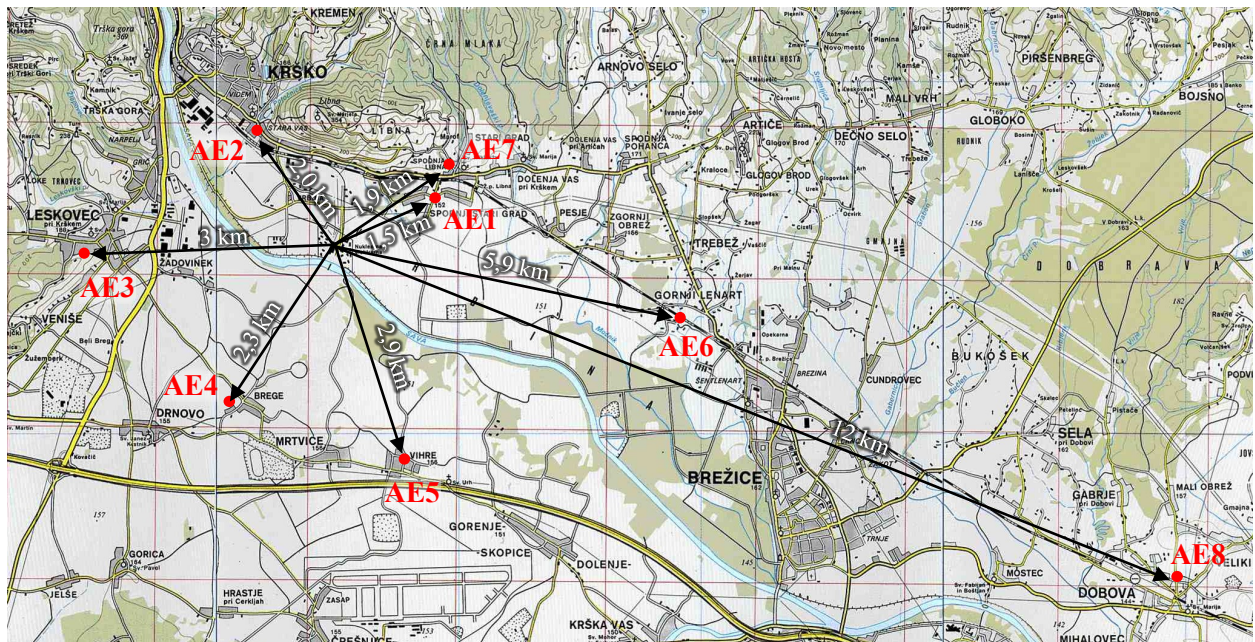
Značilnosti vzorčenja

Vzorčenje in meritve radioaktivnosti zraka v okolici Nuklearne elektrarne Krško se izvajajo v okviru obratovalnega nadzora radioaktivnosti. Tega mora v skladu s 124. členom *Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti* (ZVISJV-1) [7] zagotavljati upravljavec 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 [48].

Vzorčenje zračnih emisij - aerosolov in I-131 (radioaktivnost zraka v okolju)⁴ je v letu 2020 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 le v Dobovi. 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 [16].



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

⁴ Radioaktivnost zraka v okolju združuje prispevke imisij 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 se prečrpa najmanj 10 000 m³ zraka mesečno. V Dobovi in na dvorišču IJS v Ljubljani (slika 4.2) poteka vzorčenje z 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 molekulski 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 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 2020 [16]. 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 2020, IJS-DP-13462*, marec 2021. 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 2020 ni bilo remonta NEK, zadnji je bil od 1. 10. 2019 do 29. 10. 2019, ko se je začel 31. gorivni cikel. V času med in po remontu v NEK 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 ($47 \text{ m}^3/\text{s}$ oziroma $4\,059\,000 \text{ m}^3$ 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 2020 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 2020 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]). Iz tabele 4.1 lahko razberemo, da so bile povprečne koncentracije aktivnosti Cs-137 na lokacijah v okolici NEK v letu 2020 nižje od dolgoletnih povprečij. Povprečje po vseh lokacijah v okolici NEK za leto 2020 je dvakrat nižje kot drugod po Sloveniji. Večletno povprečje v 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 2020

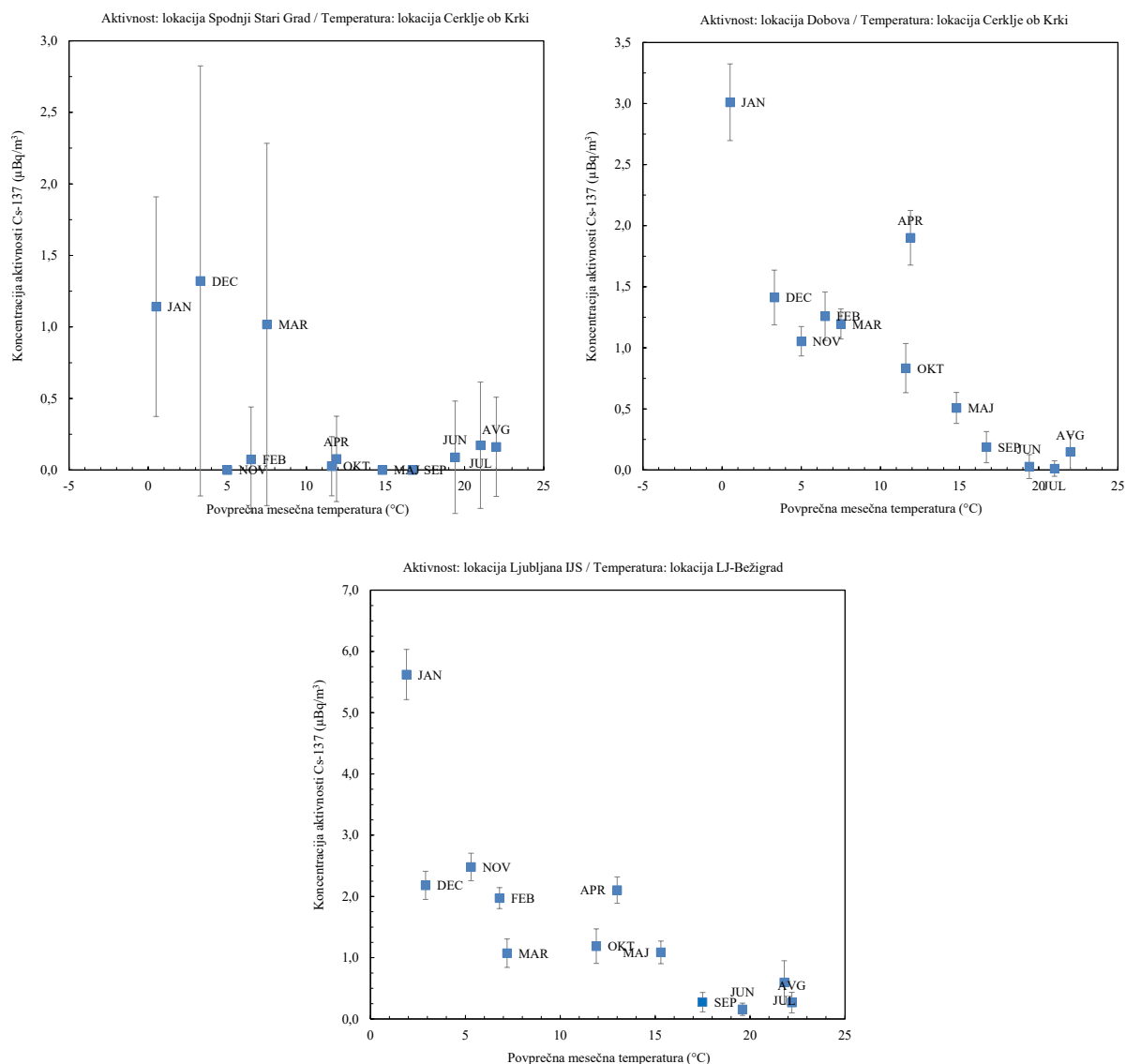
Lokacija	Od 2005 do 2019	2020
	Koncentracija aktivnosti (Bq/m ³)	
Spodnji Stari Grad	1,5E-06 ± 2E-07	3,4E-07 ± 2E-07
Stara vas	1,6E-06 ± 2E-07	6,5E-07 ± 2E-07
Leskovec	1,7E-06 ± 1E-07	6,1E-07 ± 2E-07
Brege	2,2E-06 ± 2E-07	3,8E-07 ± 3E-07
Vihre	1,4E-06 ± 3E-07	4,3E-07 ± 2E-07
Gornji Lenart	1,3E-06 ± 2E-07	1,7E-07 ± 2E-07
Spodnja Libna	1,2E-06 ± 3E-07	3,0E-07 ± 2E-07
Dobova	1,4E-06 ± 2E-07	9,6E-07 ± 5E-08
Povprečje NEK	1,3E-06 ± 2E-07	4,8E-07 ± 9E-08
Ljubljana	1,9E-06 ± 7E-08	1,6E-06 ± 7E-08
Murska Sobota	1,1E-06 ± 8E-07*	7,0E-07 ± 4E-07
Predmeja	2,4E-06 ± 8E-07	5,1E-06 ± 4E-07

* 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 2020

Vzorč.mesto	MURSKA SOBOTA*	PREDMEJA*	LJUBLJANA	POVPREČJE KRAJEV V OKOLICI NEK
IZOTOP	Povprečne mesečne koncentracije aktivnosti (Bq/m ³)			
Na-22			2,5E-07 ± 5E-08	7,3E-08 ± 4E-08
U-238	1,9E-06 ± 2E-06	2,1E-05 ± 3E-05	2,7E-06 ± 9E-07	9,8E-06 ± 1E-06
Ra-226	2,6E-06 ± 2E-06	1,9E-05 ± 9E-06	1,4E-08 ± 2E-06	6,7E-06 ± 2E-06
Pb-210	4,2E-04 ± 2E-04	3,5E-04 ± 2E-04	7,9E-04 ± 1E-05	5,5E-04 ± 7E-05
Ra-228	1,2E-06 ± 1E-06	9,8E-06 ± 2E-05	4,4E-07 ± 2E-07	5,8E-06 ± 9E-07
Th-230				1,4E-06 ± 2E-06
Th-228	1,4E-05 ± 4E-05	4,0E-06 ± 7E-06	2,3E-06 ± 2E-07	6,2E-06 ± 7E-07
K-40	2,3E-04 ± 6E-05	1,9E-03 ± 1E-03		
Be-7	3,4E-03 ± 1E-03	4,2E-03 ± 2E-03	4,6E-03 ± 6E-05	3,4E-03 ± 4E-04
I-131				
Cs-134				
Cs-137	7,0E-07 ± 4E-07	5,1E-06 ± 4E-06	1,6E-06 ± 7E-08	4,8E-07 ± 9E-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	6,9E-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 filterjih vzorčevalnih črpalk je samo majhen del posledica resuspenzije Cs-137 iz zemlje. Iz literature ([49], [50], [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). V toplejših mesecih pa je prispevek kurjenja manj izrazit in je aktivnost najverjetneje posledica več dejavnikov: v največji meri resuspenzije s tal in lebdenja delcev v ozračju, v manjši meri pa prometa in industrije. Takšna 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 imisij. V okviru rednega nadzora življenskega okolja v RS v letu 2020 smo vzorčili domače pelete oziroma brikete ali tiste iz uvoza (Avstrija, Bosna in Hercegovina, Srbija, Ukrajina) ([13], [15]). Specifične aktivnosti Cs-137 so bile od 1,5 Bq/kg do 253 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 6,3 Bq/kg za 7 vzorcev iz programa, brez najbolj aktivnega osamelca iz Ukrajine, ([13], [15]) lahko ugotovimo, da je skupna letna izpuščena aktivnost Cs-137 v lesnih kurivih na gospodinjstvo 41 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) [16] in konstantnega izpusta s hitrostjo aktivnosti 5,5 10⁻³ mBq/s (predpostavili smo, da se peleti skurijo v 3 mesecih), dobimo oceno za koncentracijo aktivnosti Cs-137 v zraku 0,5 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 2020, ki je 1,9 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 le v Dobovi, in sicer na trimesečnih sestavljenih vzorcih. Objavljena povprečna koncentracija aktivnosti v letu 2020 je 0,07 μBq/m³, vendar so bile vse meritve pod mejo detekcije. Večletno povprečje koncentracije aktivnosti za Sr-90 je 0,6 μBq/m³. V zračnih izpustih NEK je bil v letu 2020 zaznan Sr-89/Sr-90.

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 2020 zaznani izpusti Co-60, Te-125m, 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.

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 2020 v okolici NEK je bila 3 390 μBq/m³, Pb-210 pa 550 μBq/m³. V Ljubljani sta bili ustrezni vrednosti 4 640 μBq/m³ in 790 μBq/m³, v Murski Soboti 3 400 μBq/m³ in 420 μBq/m³ in na Predmeji 4 180 μBq/m³ in 350 μBq/m³. Za kozmogeni Be-7 ugotavljamo, da je bila v okviru negotovosti povprečij na vseh vzorčevalnih mestih v okolici NEK, Murski Soboti, 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 30 % nižja kot v Ljubljani, kot kaže 10-letno povprečje [73]: v letu 2020 pa jih je bilo okrog 35 % 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], [13]).

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 2020 je bila v Ljubljani povprečna koncentracija aktivnosti Na-22 $0,25 \mu\text{Bq/m}^3$.

Tabela 4.3: Zračni izpusti iz ventilacijskega izpusta NEK v letu 2020 na višini 60 m

	Radionuklid	Letni izpust (Bq)
Pare, plini	I-131	–
	I-132	–
	I-133	–
	I-135	–
	HTO	$3,0\text{E}+12$
	HT + CHT	$5,0\text{E}+11$
	C-14 v CO ₂	$1,1\text{E}+10$
	C-14 v CH ₄	$8,5\text{E}+09$
Aerosoli	Mn-54	–
	Co-57	–
	Co-58	–
	Co-60	$1,8\text{E}+03$
	Nb-95	–
	Zr-95	–
	Ru-103	–
	Ag-110m	–
	Sb-125	–
	Te-123m	–
	Te-125m	$8,3\text{E}+03$
	Te-127m	$1,9\text{E}+04$
	Cs-137	$2,0\text{E}+03$
	Fe-55	–
	Sr-89/Sr-90	$2,5\text{E}+03$
	Se-75	–
Žlahtni plini	Xe-131m	$9,2\text{E}+11$
	Xe-133	$1,6\text{E}+08$
	Xe-133m	–
	Xe-135	$8,4\text{E}+05$
	Xe-135m	–
	Ar-41	$1,1\text{E}+10$
	Kr-85	$1,8\text{E}+10$
	Kr-85m	–
Skupna izpuščena aktivnost za pare, pline in aerosole		$3,5\text{E}+12$
Skupna izpuščena aktivnost žlahtnih plinov		$9,5\text{E}+11$
Skupna izpuščena aktivnost		$4,4\text{E}+12$



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, ki so 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, temveč kot področje 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 ventikacijskega sistema, ter glede na vremenske razmere, kjer se delci nahajajo. Dimnega dviga model ne računa eksplicitno, temveč kot povprečje dvigov posameznih delčkov.

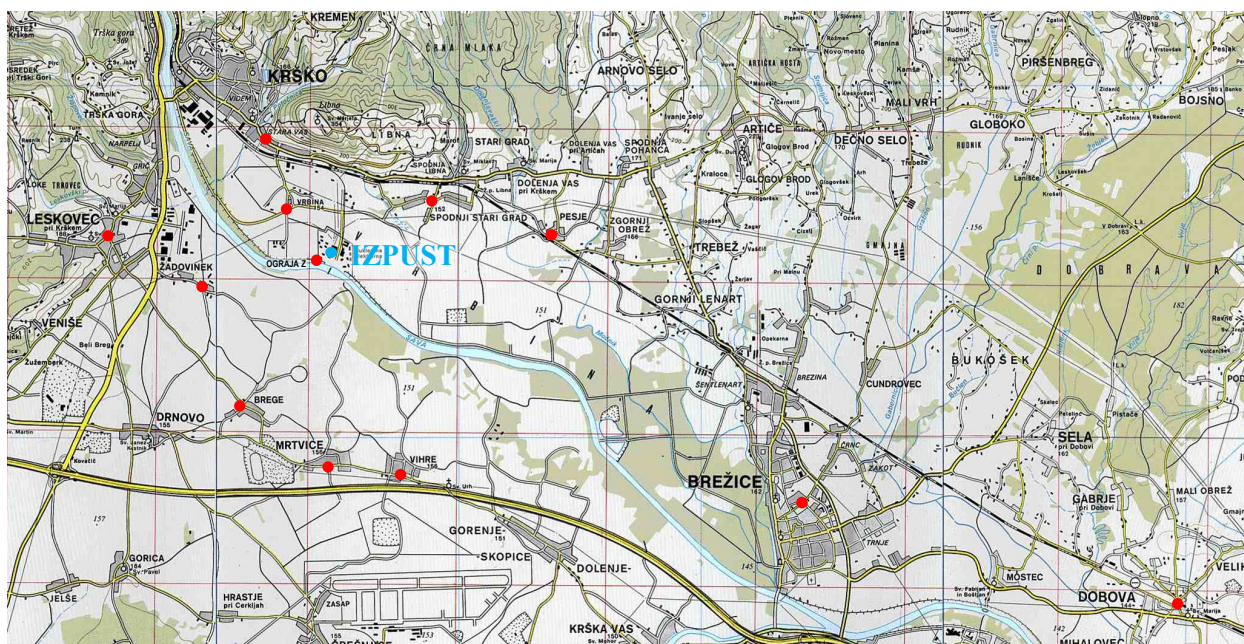
Koncentracije aktivnosti izpuščenih snovi v zunanjem zraku (imisije) na določeni lokaciji stran od izpusta ocenimo na podlagi razredčitvenih koeficientov (χ/Q) iz modela širjenja. Razredčitveni koeficient je normirano merilo za redčenje v ozračju in nam pove, kolikšna je koncentracija izpuščene snovi 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 2020 za naselja v okolici NEK, ki jih je izračunalo in posredovalo podjetje MEIS storitve za okolje z uporabo Lagrangeevega modela

2020	Sp. Stari Grad 1,5 km	Vrbina 0,8 km	Brežice 7,1 km	Vihre 3,1 km	Mrtvice 2,8 km	Brege 2,3 km	Žadovinek 1,7 km	Leskovec 2,9 km	Krško - Stara vas 1,7 km	Pesje 3,0 km	Dobova 12,1 km	Ograja NEK 0,2 km
Januar	3,80E-07	3,07E-07	5,16E-08	3,96E-08	7,20E-08	1,85E-07	3,71E-07	4,15E-07	1,53E-07	3,68E-07	5,99E-08	4,96E-07
Februar	2,75E-07	1,51E-07	7,40E-08	6,10E-08	8,96E-08	1,12E-07	1,14E-07	9,91E-08	1,01E-07	3,82E-07	9,43E-09	1,36E-07
Marec	1,66E-07	1,36E-07	6,66E-08	3,31E-08	5,91E-08	1,69E-07	1,61E-07	9,48E-08	8,83E-08	1,45E-07	2,49E-08	1,12E-07
April	2,16E-07	2,85E-07	5,29E-08	2,97E-08	5,74E-08	2,16E-07	2,37E-07	9,06E-08	1,31E-07	2,41E-07	1,65E-08	3,04E-07
Maj	2,97E-07	2,86E-07	8,90E-08	5,89E-08	8,50E-08	2,13E-07	2,04E-07	1,03E-07	1,19E-07	2,85E-07	1,42E-08	2,02E-07
Junij	5,35E-07	2,26E-07	7,56E-08	6,77E-08	9,64E-08	1,15E-07	1,69E-07	7,13E-08	5,39E-08	4,49E-07	1,05E-08	5,06E-07
Julij	2,97E-07	4,24E-07	2,00E-07	1,01E-07	1,19E-07	2,23E-07	2,95E-07	1,68E-07	1,33E-07	2,84E-07	1,01E-08	1,28E-06
Avgust	2,79E-07	5,41E-07	1,50E-07	1,38E-07	1,99E-07	3,40E-07	4,22E-07	2,07E-07	2,02E-07	2,92E-07	1,86E-08	1,51E-06
September	3,76E-07	3,29E-07	1,43E-07	7,47E-08	9,53E-08	2,54E-07	3,20E-07	1,36E-07	1,13E-07	4,54E-07	1,70E-08	6,79E-07
Oktober	5,74E-07	2,77E-07	9,63E-08	5,07E-08	8,18E-08	2,00E-07	2,57E-07	1,61E-07	1,52E-07	4,86E-07	1,67E-08	4,34E-07
November	4,93E-07	3,08E-07	9,87E-08	7,26E-08	9,81E-08	1,86E-07	3,27E-07	3,38E-07	2,63E-07	3,84E-07	4,33E-08	3,68E-07
December	2,50E-07	1,96E-07	3,24E-08	3,19E-08	3,98E-08	1,02E-07	4,34E-07	2,89E-07	1,65E-07	1,95E-07	8,52E-08	1,47E-07

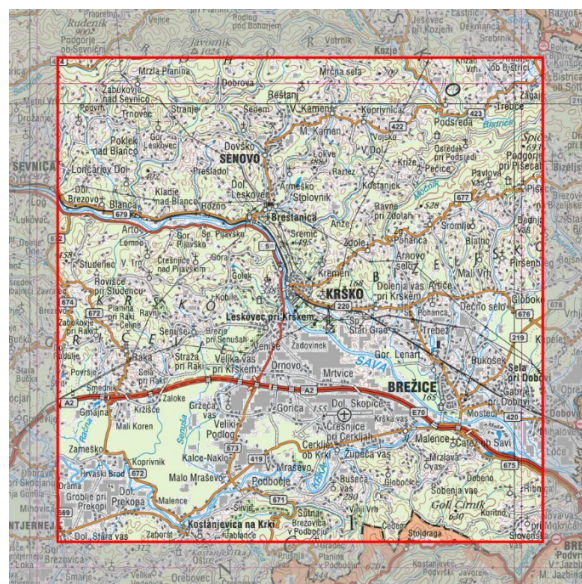
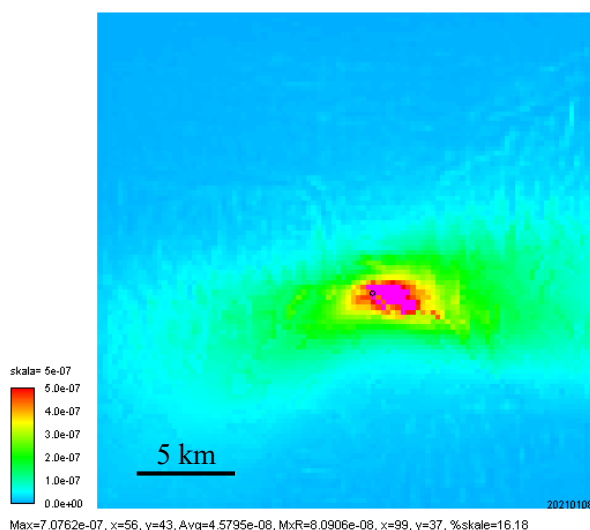
* Drsniiki v posameznih celicah pomenijo relativno velikost razredčitvenega faktorja, posebej za ograjo NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja) (rdeče), in za vse druge lokacije skupaj (sivo). Tako so hitro razvidne morebitne sezone/meteorološke variacije.



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

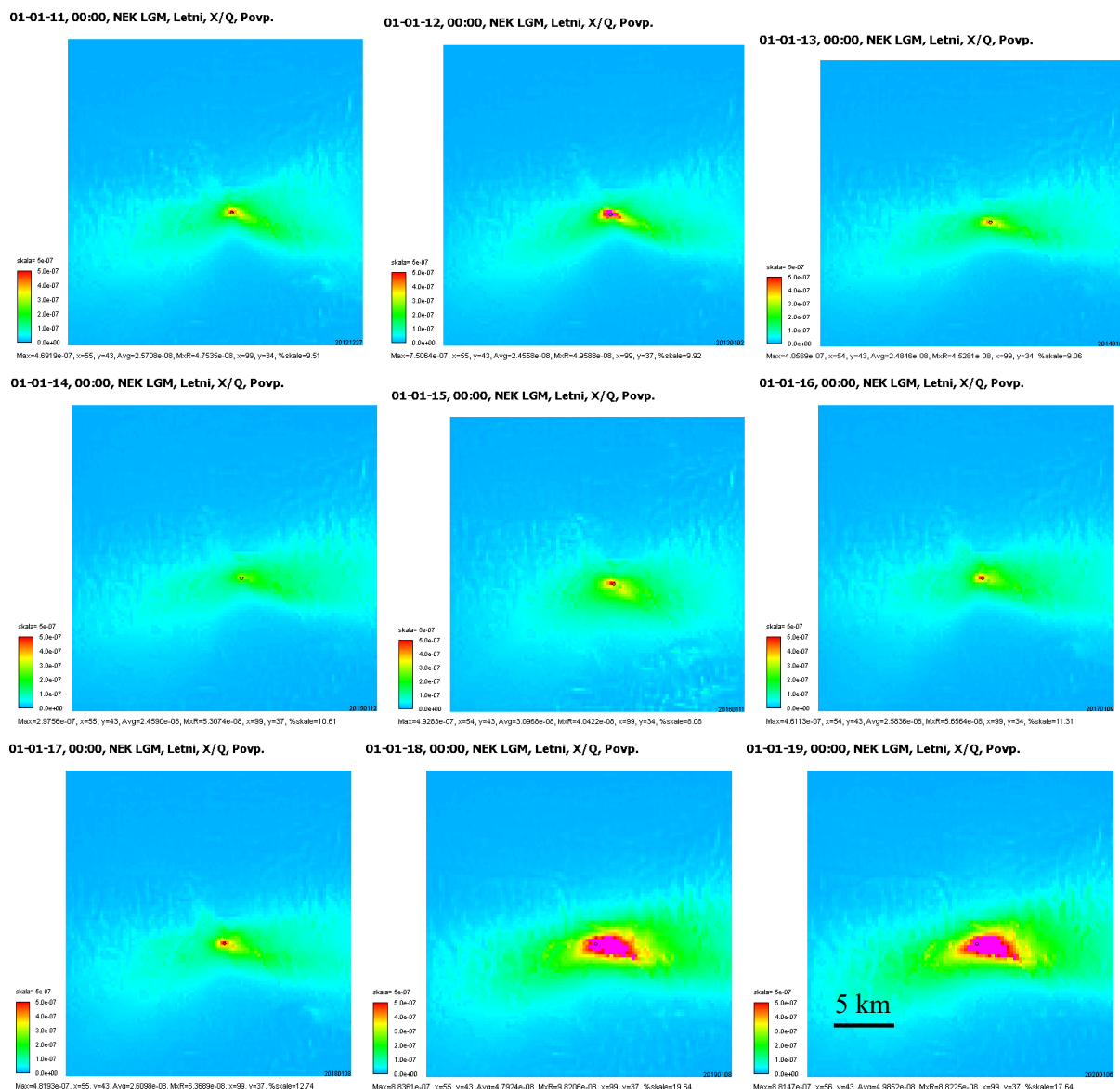
Na slikah 4.5a in 4.5b so predstavljeni povprečni letni razredčitveni koeficienti (χ/Q), na osnovi izračunanih mesečnih koeficientov χ/Q , tako za leto 2020 (slika 4.5a) in za primerjavo še iz prejšnjih let od 2011 do 2019 (slika 4.5b). Na slikah je vidno, da sta prevladujoči smeri, v katerih se v povprečju gibljejo izpusti NEK, jugozahod in jugovzhod.

01-01-20, 00:00, NEK LGM, Letni, χ/Q , Povp.



a) Leto 2020

Slika 4.5a: Povprečni letni razredčitveni koeficienti (χ/Q) z enoto s/m^3 , izračunani po Lagrangeevem modelu za izpust z višine 60 m za okolico NEK za leto 2020 (območje modeliranja je v rdečem okviru, $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$) [74]. Podatke je izračunal in posredoval MEIS, storitve za okolje.



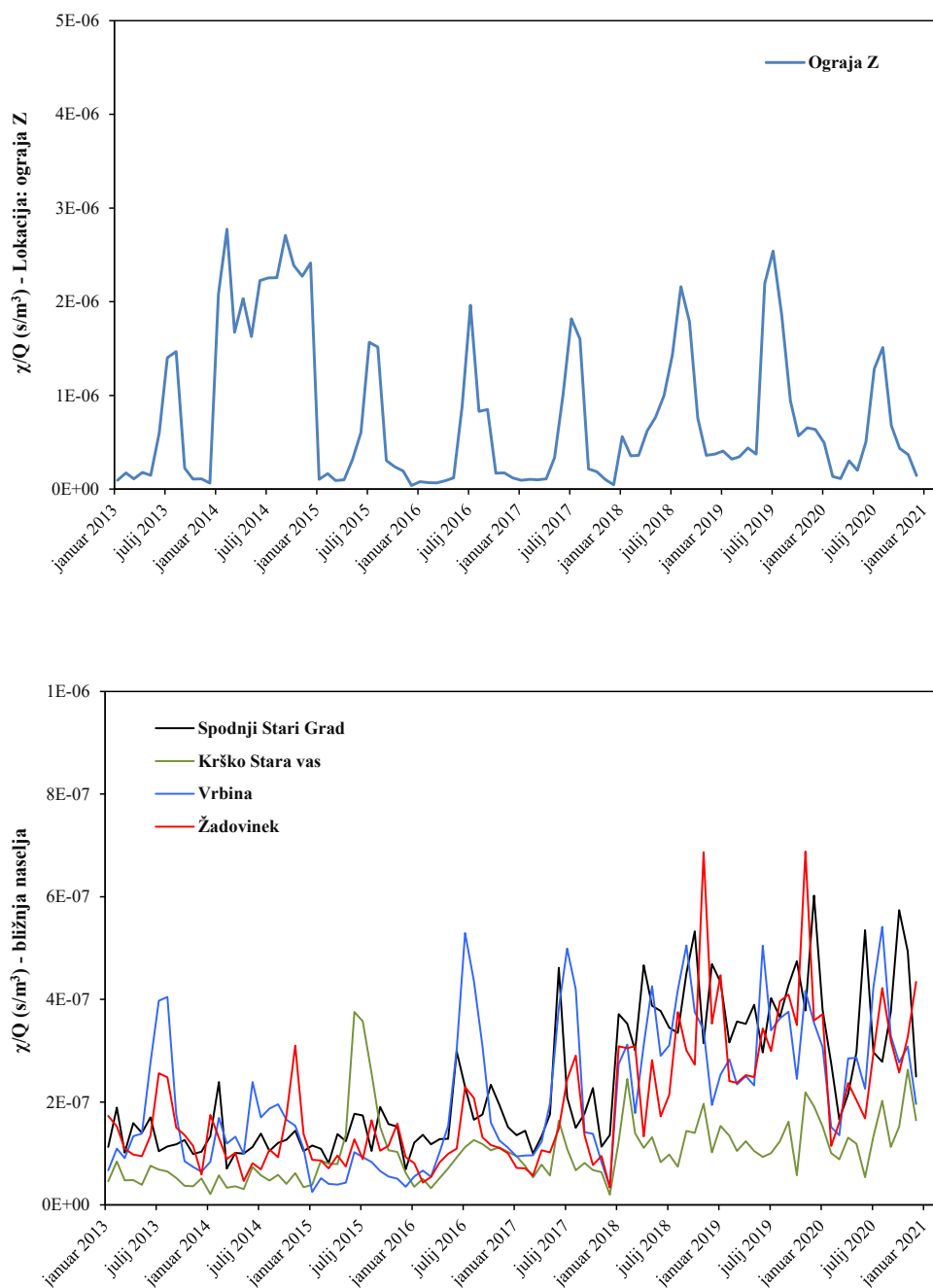
b) Leta od 2011 do 2019

Slika 4.5b: Povprečni letni razredčitveni koeficienti (χ/Q) z enoto s/m^3 , izračunani po Lagrangeevem modelu za izpust z višine 60 m za okolico NEK za leta 2011–2019
Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje

Na sliki 4.6 je prikazan časovni potek 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.

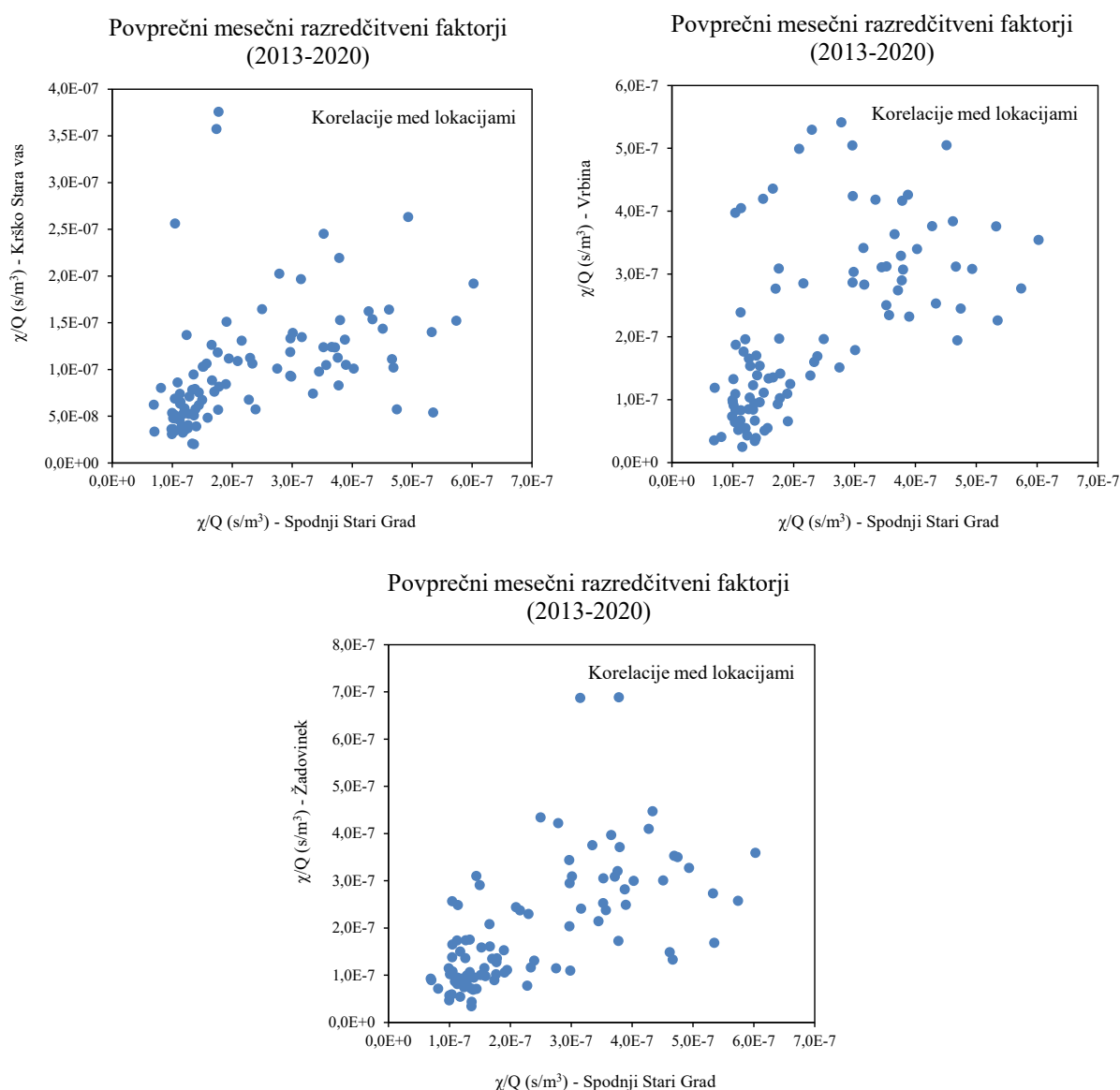


V časovnem poteku povprečnih mesečnih razredčitvenih faktorjev je opazen dvig faktorjev od vključno leta 2018 dalje na lokacijah Spodnji Stari Grad, Vrbina in Žadovinek. Kakšnih posebnih pojasnil nimamo, najverjetneje so bile meteorološke razmere takšne, da je bilo vreme v povprečju stabilnejše in posledično 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 2013–2020. Podatke je izračunal in posredoval MEIS, storitve za okolje.

Kot je bilo ugotovljeno in 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–Vrbina, 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/m³, na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad in v bližnjih naseljih za leta 2013–2020.

Podatke je izračunal in posredoval MEIS storitve za okolje.



Meritve emisij na izpuhu NEK opravljata NEK in IJS, v tabeli 4.3 so pri aerosolih predstavljene vrednosti, ki so dobljene tako, da v primeru izmerkov pri obeh 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 efektivni 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 [46], ki določa, da se navede četrtina meje detekcije 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. Na primer, v letu 2015 se je 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 ($11 \times 0,25 MDA + 1 MDA$). Tako sta tudi ocenjeni efektivni 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 [43].

Metodologija izračuna efektivne 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 efektivne 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 efektivne doze upoštevati imerzijo oziroma zunanje sevanje, ki pa je za red velikosti nižja od efektivne doze zaradi vdihavanja hlapov, plinov in partikulatov, 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 efektivna 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 $h(g)_{j, \text{inh}}$ efektivna doza na enoto vnosa j -tega radionuklida zaradi vdihavanja, izražena v Sv/Bq , in $A_{j, \text{inh}, \text{mes}}$ posamezni mesečni vnos j -tega radionuklida z vdihavanjem, izražen v Bq . V našem primeru mesečni vnos j -tega radionuklida $A_{j, \text{inh}, \text{mes}}$ izračunamo kot:

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

kjer je $a_{jl, \text{mes}}$ koncentracija/specifična aktivnost j -tega radionuklida iz enačbe (4.1) in $V(g)$ letna hitrost dihanja za določeno starostno skupino g . V enačbi (4.3) smo privzeli, da je hitrost dihanja enakomerna celo leto. Z upoštevanjem ustreznih doznih pretvorbenih faktorjev $h(g)_{j, \text{inh}}$ ([9], [26]) za posamezne radionuklide in posamezno starostno skupino dobimo oceno za mesečni prispevek posameznega radionuklida k letni dozi. Letna efektivna doza zaradi vdihavanja za posamezno starostno skupino je potem vsota mesečnih efektivnih doz, ki jih izračunamo iz enačbe (4.2).



Efektivno dozo zaradi imerzije (zunanjega sevanja) izračunamo ob predpostavki zanemarljivega prispevka inhalacije (vdihavanja) žlahtnih plinov v primerjavi z zunanjim sevanjem, ki ga povzroča polneskončni oblak žlahtnih plinov. Mesečno efektivno dozo zaradi imerzije na lokaciji l izračunamo kot:

$$E_{l,im,mes} = \sum_j h_{j,im} A_{jl,im,mes} \quad (4.4)$$

pri čemer je $h_{j,im}$ efektivna doza $((Sv/d)/(Bq/m^3))$ j -tega radionuklida, prejeta v enem dnevu na enoto koncentracije aktivnosti v zraku ([9], [26]). 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) emisij. Tako lahko ugotovimo na primeru tipično merljivega umetnega radionuklida Cs-137 v okolju, da izmerjene mesečne koncentracije aktivnosti, ki so na aerosolnih filtrih v okolici NEK nekaj $\mu Bq/m^3$, niso posledica izpustov iz NEK, temveč posledica imisij oziroma 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 2020 je bil tako med izpusti NEK radionuklid Cs-137 prisoten le v majhnih aktivnostih (2 kBq), meritve na filtrih v okolici NEK pa so pokazale koncentracije, primerljive s preteklimi leti. Iz meritev izpustov v preteklih letih pa 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 emisijskih doz, tj. preko 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 2020 v Spodnjem Starem Gradu in nato v Pesju, kjer so stopnje razredčitve najnižje.

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 [9] in [26] in hitrosti dihanja 17 L/min (9 000 m³ na leto) za odraslega posameznika, 10,6 L/min za otroka (5 585 m³ na leto) in 2,0 L/min (1 044 m³ na leto) za dojenčka. Metodologija sledi priporočilom ICRP 101 [26] in daje konservativnejšo oceno doze kot določbe uredbe UV2 [9].



Tabela 4.5: Predvidene letne efektivne doze zaradi inhalacije (vdihavanja) in imerzije (zunanje sevanje) posameznih radionuklidov zaradi izpustov NEK za odraslega prebivalca 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 (0,2 km) – prispevki v letu 2020

	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		
	I-132		
	I-133		
	I-135		
	HTO	5,7E-03	6,4E-03
	HT + CHT	1,1E-05	1,3E-05
	C-14 v CO ₂	7,5E-06	1,2E-05
	C-14 v CH ₄	5,5E-04	9,2E-04
Aerosoli (inhalacija - vdihavanje)	Mn-54	–	–
	Co-57	–	–
	Co-58	–	–
	Co-60	2,6E-09	1,7E-09
	Zr-95	–	–
	Nb-95	–	–
	Ru-103	–	–
	Ag-110m	–	–
	Sb-125	–	–
	Te-123m	–	–
	Te-125m	4,9E-10	3,8E-10
	Te-127m	2,6E-08	2,0E-08
	Cs-137	5,9E-09	3,3E-09
	Fe-55	–	–
	Sr-89/90	3,9E-08	5,1E-08
	Se-75	–	–
Žlahtni plini (imerzija - zunanje sevanje)	Xe-131m	1,2E-04	1,9E-04
	Xe-133	8,1E-08	1,2E-07
	Xe-133m	–	–
	Xe-135	5,0E-09	4,7E-09
	Xe-135m	–	–
	Ar-41	2,3E-04	3,7E-04
	Kr-85	1,8E-06	2,3E-06
	Kr-85m	–	–
Inhalacijska doza		6,3E-03	7,3E-03
Imerzijska doza		3,6E-04	5,6E-04
DOZA – SKUPAJ		6,6E-03	7,9E-03



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 na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad in na najbližji lokaciji na ograji NEK (okvirno tudi za razdaljo 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

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 2020 posledica zračnih emisij tritija, 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) in v mesecih, ko lahko neugodne vremenske razmere sovpadajo z remontom in bistveno višjimi izpusti. Inhalacijska doza po mesecih v letu 2020 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 2020 so bili izpusti tritija relativno nizki v primerjavi z izpusti v spomladanskih ali jesenskih mesecih.

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 posledično večjimi izpusti v obliki CH₄ je prispevek C-14 k dozi zaradi inhalacije višji (na primer v letih 2013, 2017, 2018 in 2019) [52]. V letu 2020 so bili izpusti C-14 v obliki CH₄ manjši (podobno tudi v letih 2011, 2012 in 2015).

Prispevki obeh radionuklidov k letni inhalacijski dozi in celotni letni dozi v letih od 2011 do 2020 so prikazani v tabeli 4.6. Kot je razvidno iz tabele 4.6, so doze v 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.

V letu 2020 v izpustih ni bilo izmerjenega prispevka joda, kar kaže, da je bila integriteta goriva v 31. gorivnem ciklu (2019–2021) 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 so bile izmerjene nizke aktivnosti joda v izpustih 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 2020 predvsem posledica izpustov žlahtnih plinov različnih izotopov ksenona in Ar-41. Celotna letna imerzijska doza za Spodnji Stari Grad za leto 2020 je bila 0,4 nSv, za ograjo NEK (in okvirno za razdaljo 500 m od osi reaktorja), pa 0,6 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 in po remontu (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 8 nSv (ograja NEK, okvirno tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja) (tabela 4.7). Razlike med lokacijami so posledica razredčitve, kar upoštevamo s povprečnimi mesečnimi razredčitvenimi koeficienti χ/Q [40]–[42].

Tabela 4.7: Ocene inhalacijskih in imerzijskih doz zaradi atmosferskih izpustov v okolici NEK v letu 2020 z uporabo Lagrangeevega modela – imisijske doze NEK. Uporabljeni so podatki za dozne pretvorbene faktorje iz referenc [9] in [26] 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	6,3E-03	5,0E-03	1,9E-03	3,6E-04	6,6E-03	5,0E-03	1,9E-03
Vrbina	0,8	4,8E-03	3,9E-03	1,5E-03	3,1E-04	5,1E-03	3,9E-03	1,5E-03
Brežice	7,1	1,5E-03	1,2E-03	4,4E-04	9,6E-05	1,5E-03	1,2E-03	4,4E-04
Vihre	3,1	1,0E-03	8,0E-04	3,1E-04	6,5E-05	1,1E-03	8,0E-04	3,1E-04
Mrtvice	2,8	1,4E-03	1,1E-03	4,4E-04	9,4E-05	1,5E-03	1,1E-03	4,4E-04
Brege	2,3	3,1E-03	2,5E-03	9,5E-04	2,0E-04	3,3E-03	2,5E-03	9,5E-04
Žadovinek	1,7	4,8E-03	3,9E-03	1,5E-03	2,9E-04	5,1E-03	3,9E-03	1,5E-03
Leskovec	2,9	3,5E-03	2,8E-03	1,1E-03	2,0E-04	3,7E-03	2,8E-03	1,1E-03
Krško - Stara vas	1,7	2,6E-03	2,1E-03	7,9E-04	1,5E-04	2,7E-03	2,1E-03	7,9E-04
Pesje	3,0	5,6E-03	4,5E-03	1,7E-03	3,4E-04	6,0E-03	4,5E-03	1,7E-03
Dobova	12,1	5,5E-04	4,4E-04	1,7E-04	2,9E-05	5,8E-04	4,4E-04	1,7E-04
Ograja NEK (zahod)	0,2	7,3E-03	5,8E-03	2,2E-03	5,6E-04	7,9E-03	5,8E-03	2,2E-03

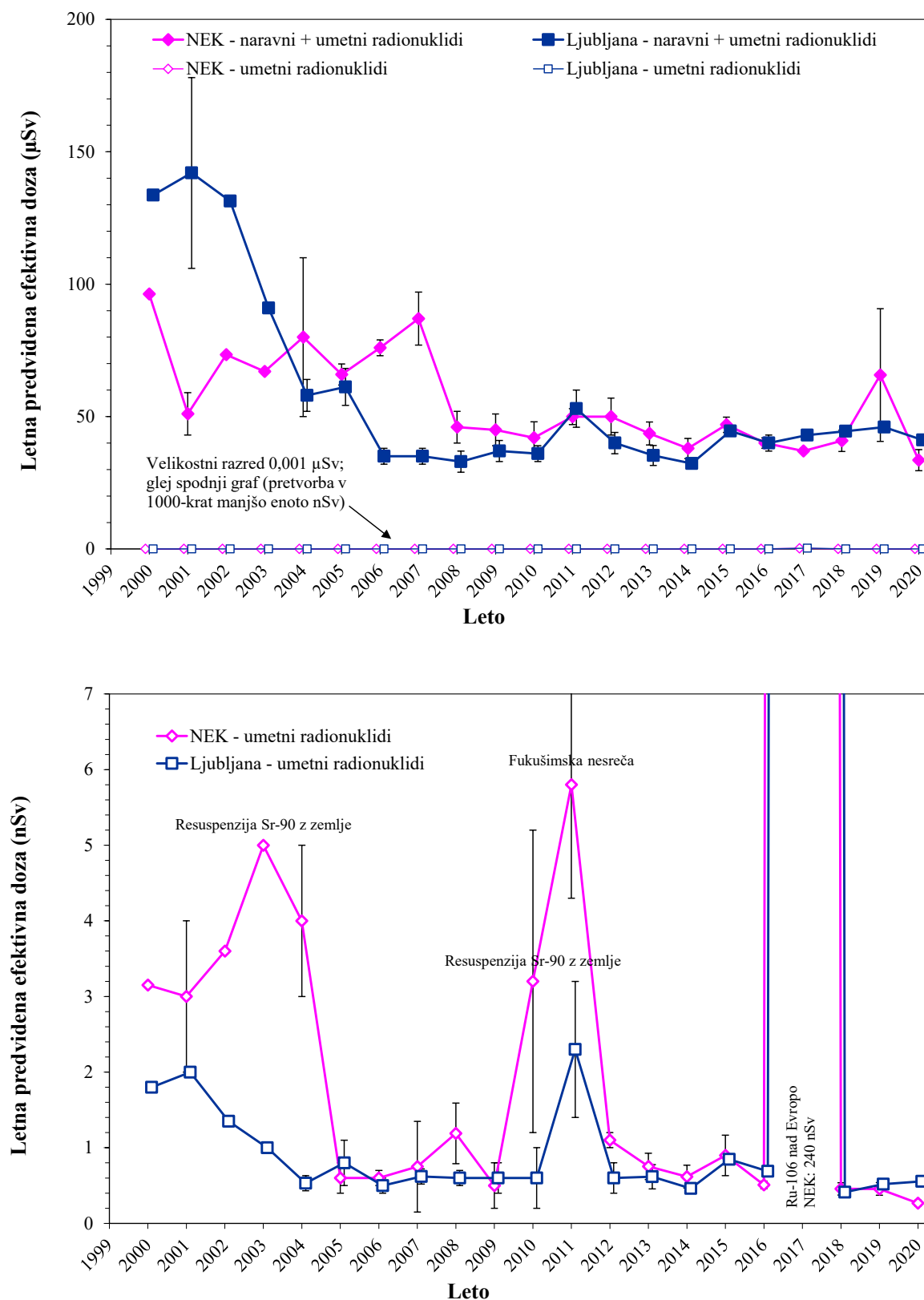
* dolžina sivega drsnika za posamezno starostno skupino sorazmerno izraža skupno dozo.

Doze zaradi radioaktivnosti zraka v okolju (efektivne okoljske doze)

Efektivne okoljske doze za okoliške prebivalce izračunamo iz izmerjenih koncentracij radionuklidov v okolju, in sicer na aerosolnih filtrih zračnih črpalk v okolici NEK (glej sliko 4.1) ob upoštevanju pretvorbene faktorjev. S seštevanjem predvidenih efektivnih doz posameznih radionuklidov, izmerjenih na aerosolnih filtrih zračnih črpalk na različnih mestih v okolici NEK, 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 4.8 so predstavljene letne predvidene efektivne okoljske doze zaradi naravnih (v enotah μ Sv) in umetnih radionuklidov (v enotah nSv) za odraslega človeka, 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 4.8, 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 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 [51]). Povprečna izračunana efektivna doza za odraslo osebo v okolici NEK zaradi umetnih radionuklidov je bila v obdobju 2007–2020 ($1,3 \pm 0,4$) nSv (brez osamelca 2017). V letu 2020 je bil prispevek Cs-137 k letni dozi ($0,17 \pm 0,03$) nSv in Sr-90 ($0,10 \pm 0,03$) nSv.



Slika 4.8: Primerjava letnih predvidenih efektivnih okoljskih doz za leto 2020 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 2020 v T-44 do T-55 ter doznih pretvorbenih faktorjev iz referenc [9] in [26].

STAROSTNA SKUPINA	VSOTA PRISPEVKOV PO VRSTAH RADIONUKLIDOV	EFEKTIVNA OKOLJSKA DOZA IZ KONCENTRACIJ AKTIVNOSTI NA AEROSOLNIH FILTRIHI (μSv na leto)	
		OKOLICA NEK	LJUBLJANA
ODRASLI	umetni radionuklidi	$(2,7 \pm 0,4) \text{ E-4}$	$(5,6 \pm 0,2) \text{ E-4}$
	umetni in naravni radionuklidi	34 ± 4	41 ± 1
OTROCI	umetni radionuklidi	$(2,0 \pm 0,3) \text{ E-4}$	$(4,2 \pm 0,2) \text{ E-4}$
	umetni in naravni radionuklidi	27 ± 3	33 ± 1
DOJENČKI	umetni radionuklidi	$(9 \pm 1) \text{ E-5}$	$(1,8 \pm 0,1) \text{ E-4}$
	umetni in naravni radionuklidi	13 ± 1	15 ± 1

Na sliki 4.8 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 $(240 \pm 20) \text{ nSv}$ 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 [9]. Prispevek Pb-210 k letni predvideni efektivni dozi v okolici NEK za odraslega človeka je bil v letu 2020 $(28 \pm 8) \mu\text{Sv}$, kar je zelo podobno dozam iz preteklih let: $(21\text{--}49) \mu\text{Sv}$ na leto v obdobju 2005–2019). Drugi naravni radionuklid po prispevku k efektivni dozi v letu 2020 je Th-228 $(2,2 \pm 0,2) \mu\text{Sv}$. Iz meritev koncentracij aktivnosti na aerosolnih filtrih v letu 2020 v Ljubljani so prispevki k dozi v okviru variacij v preteklih letih podobni prispevkom v okolici NEK, in sicer $(40 \pm 1) \mu\text{Sv}$ na leto zaradi Pb-210 in $(0,82 \pm 0,06) \mu\text{Sv}$ na leto zaradi Th-228. 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 $10 \mu\text{Sv}$ na leto [12].

Izračunana predvidena letna efektivna okoljska doza zaradi inhalacije (vdihavanja) za referenčno osebo v okolici NEK za leto 2020 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 efektivnih 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 – 6,6 nSv na referenčni lokaciji Spodnji Stari Grad –, za približno 4 velikostne rede nižje od efektivnih okoljskih doz naravnih radionuklidov v okolju, preračunanih iz izmerjenih koncentracij v aerosolih v okolici NEK – 34 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 efektivnih 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 2020 velja, da **izpusti hlapov in plinov, ki vsebujejo tritij oziroma C-14**, največ prispevajo k efektivni dozi zaradi **vdihavanja (inhalacijska doza)**. Ta je v Spodnjem Starem Gradu za odraslega posameznika iz referenčne skupine prebivalstva 5,7 nSv oziroma 0,6 nSv na leto, ob ograji NEK (okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja), pa 6,4 nSv oziroma 0,9 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 referenčne skupine prebivalstva (naselje Spodnji Stari Grad) 0,3 nSv na leto; na ograji NEK pa 0,6 nSv na leto.

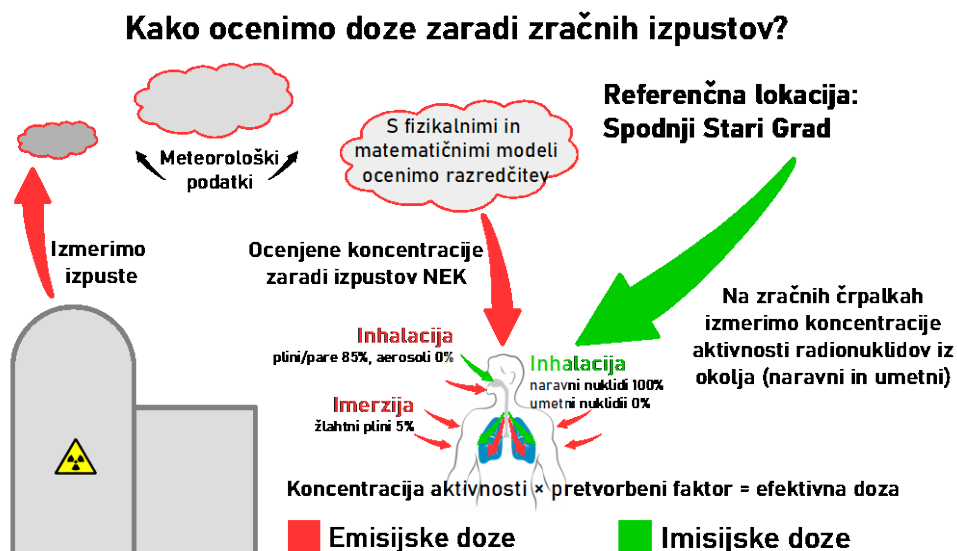
Ocenjena **skupna imisijska letna efektivna doza NEK** v 2020 za odraslega posameznika iz referenčne skupine prebivalstva, ki je posledica inhalacije (vdihavanja) in imerzije (zunanjega sevanja) **zaradi izpustov NEK**, je v Spodnjem Starem Gradu 6,6 nSv, ob ograji NEK pa 7,9 nSv.

Predvidena **efektivna okoljska doza zaradi inhalacije** (vdihavanja) aerosolov v okolici NEK je predvsem posledica inhalacije **dolgoživih naravnih radionuklidov** in je za odraslega posameznika (34 ± 4) μ Sv na leto; doza je v okviru pričakovanj in na ravni povprečne vrednosti zadnjih let. Predvidena **efektivna 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 $(0,27 \pm 0,04)$ nSv na leto. Ocenjene in modelsko izračunane imisijske doze NEK zaradi umetnih radionuklidov so za nekaj velikostnih redov nižje od efektivnih okoljskih doz zaradi naravnih radionuklidov.

V letu 2008 je Evropska komisija izdala poročilo [54], v katerem so izračunane predvidene letne efektivne doze zaradi izpustov iz jedrskih elektrarn in obratov za predelavo jedrskega goriva v Evropi. Doze v poročilu Evropske komisije so izračunane za referenčno skupino prebivalstva 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 efektivna 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 0,0079 μ Sv in 0,0051 μ Sv na leto, na večjih razdaljah 3 000 m (Pesje) oziroma 7 100 m (Brežice) od NEK (ekvivalent 5 000 m) pa 0,0060 μ Sv in 0,0015 μ Sv na leto.



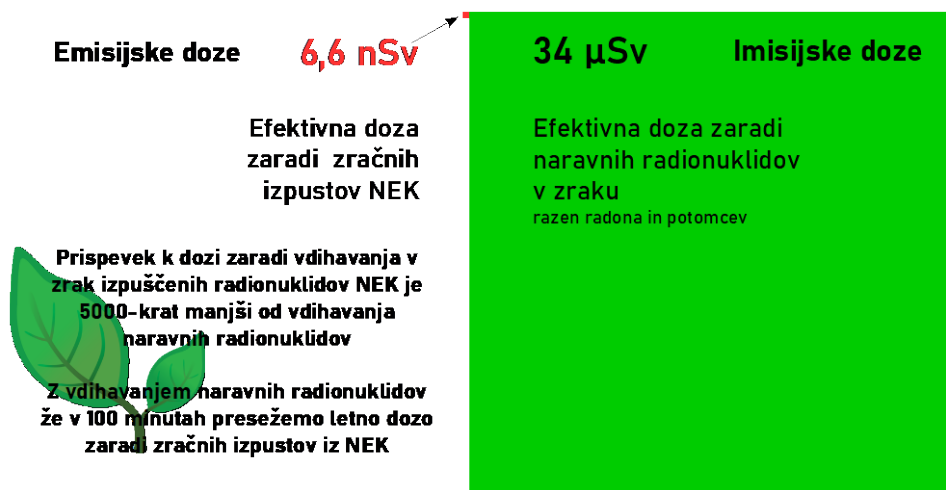
GRAFIČNI PRIKAZ PRISPEVKOV ZA OCENO EFEKTIVNE DOZE PO ZRAČNI PRENOSNI POTI



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 2020 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 za naravne in realne porazdelitve za Cs-137 so v letu 2020 v okolici NEK med $(0,48 \pm 0,02)$ mSv za zemljo v Kusovi Vrbini in $(0,65 \pm 0,02)$ mSv za zemljo na Gmajnicah. Iz meritev globinske odvisnosti specifične aktivnosti Cs-137 na posameznih lokacijah lahko sklepamo na kompleksnost delovanja površinske in podtalne vode.*

V letu 2020 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 $(0,81 \pm 0,10)$ mSv, na ograji NEK $(0,58 \pm 0,04)$ mSv in v okolici Zagreba na Hrvaškem $(0,79 \pm 0,11)$ mSv. Prispevki k zunanjemu sevanju zunaj ograje NEK zaradi sevanja iz objektov NEK in atmosferskih izpustov radioaktivnih snovi so bili, enako kot prejšnja leta, v letu 2020 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 E-14 mSv.*

UVOD

Viri ionizirajočega sevanja v človekovem naravnem in bivalnem okolju so primarni kozmični žarki, zrak in zemlja. Primarni kozmični žarki izvirajo iz vesolja, 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.

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 v zemlji, 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. 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.

Izpostavljenost naravnemu sevanju zaradi radioaktivnosti v zraku torej izvira iz kozmičnih žarkov in razpadnih produktov urana in torija. K radioaktivnosti v zraku prispeva tudi umetna radioaktivnost, ki je posledica 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 (jedrske elektrarne, raziskovalni reaktorji, predelovalni obrati...) in uporabnikov radioaktivnih snovi. Umetna radioaktivnost iz zraka se, podobno kot naravna, odlaga na površino zemlje in od tam izpira v globlje sloje. Geografska porazdelitev usedov umetnih radioaktivnih snovi je določena z zračnimi tokovi v času izpusta radioaktivnosti.

Prebivalstvo v okolici NEK je izpostavljeno naravnim virom ionizirajočega sevanja, kontaminaciji okolja z umetnimi radioaktivnimi snovmi, potencialno pa še neposrednemu sevanju elektrarne.

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 (ZVJSJV-1)* [7] 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 in periodična vzorčenja ter meritve radioaktivnosti zemlje in suhega useda. Učinek jedrske elektrarne na zunanje sevanje ugotavljamo s primerjavo meritev v okolici NEK z meritvami, ki so bile izvedene na večjih oddaljenostih, učinek izpustov NEK v zrak in vodo pa z meritvami radioaktivnosti zraka, radioaktivnosti rečnega sedimenta in radioaktivnosti zemlje na lokacijah, kjer Sava poplavlja, in na lokacijah, kjer Sava ne poplavlja, ter suhega useda.

Za sprotne meritve zunanjega sevanja uporabljamo sistem kontinuirnih merilnikov hitrosti doze MFM, ki so porazdeljeni v okolici jedrske 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*).



OKOLJSKI VZORCI

Značilnosti vzorčenja in meritev

Zemljo vzorčimo na treh lokacijah na poplavnih področjih nizvodno od NEK. Najpogosteje je poplavljena lokacija Kusova Vrbina, navadno pri pretoku Save, ki je večji od 1.000 m³/s. Na tej lokaciji je torej prisotnost umetnih radionuklidov v zemlji lahko posledica radioaktivnega useda iz zraka ali pa izpustov NEK v reko Savo. Poplavljanje lahko spremeni globinsko porazdelitev odloženih radionuklidov, ki jih pričakujemo v zemlji.

Lokacije, kjer vzorčujemo, so na neobdelanih površinah. Vzorčenje poteka v štirih plasteh na globinah 0–5 cm, 5–10 cm, 10–15 cm in 15–30 cm. Tako določimo, kako je kontaminacija porazdeljena po globini. Hkrati z vzorci zemlje zberemo še vzorce trave. Pomembno je, da so mesta, kjer periodično zbiramo vzorce, blizu skupaj, da lahko primerjamo rezultate odvzemov na isti lokaciji.

Zemlja se vzorči spomladi in jeseni na naslednjih lokacijah:

- Amerika, levi breg Save, nizvodna razdalja od NEK 3,5 km, tip zemlje je rjava naplavina;
- Gmajnice, desni breg Save, nizvodna razdalja od NEK 2,5 km, tip zemlje je mivkasta borovina;
- Kusova Vrbina – Trnje, levi breg Save, nizvodna razdalja od NEK 8,5 km, tip zemlje je mivkasta borovina.

Metoda vzorčenja je predpisana s *Pravilnikom o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8], postopek pa je opisan v navodilu *Zbiranje in priprava vzorcev zemlje (LMR-DN-07)*.

Skladno z *Zakonom o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti* [7] in s *Pravilnikom o monitoringu radioaktivnosti (JV10)* [8] se zunanje sevanje v okolici NEK meri neprekinjeno z okoljskimi termoluminiscenčnimi dozimetri (TLD). Ti dozimetri merijo sevanje gama in ionizirajočo komponento kozmičnih žarkov. Neposredne meritve zunanjega sevanja se izvajajo s 57 dozimetri v okolici NEK in z 9 dozimetri na ograji NEK. Vsi dozimetri so tipa TLD-IJS-05 (CaF₂:Mn) in so nameščeni na razdaljah do 10 km od NEK. Postavljeni so na lokacijah v urbanem in ruralnem okolju z obdelanim in neobdelanim zemljiščem in so nameščeni na višini 1 m od tal. Odčitavanje poteka po sistemu IJS MR 200 (C) v *Laboratoriju za termoluminiscenčno dozimetrijo (TLD)* na IJS. S tem sistemom lahko merimo okoljske doze (okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$) v intervalu od 7,5 μ Sv do 5 Sv [57]. V okviru nadzornega programa NEK so na Hrvaškem postavljeni merilniki TLD LiF:Mg,Cu,P (MCP-N, Poljska), CaF₂ (IJS, Slovenija), Al₂O₃:C (Rusija) in radiofotoluminiscenčnih merilnikov 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 [57], [58].

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, v kateri je 7 merilnikov. Ta mreža je del mreže URSJV – MOP za zgodnje zaznavanje sprememb zunanjega sevanja, v kateri deluje 74 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

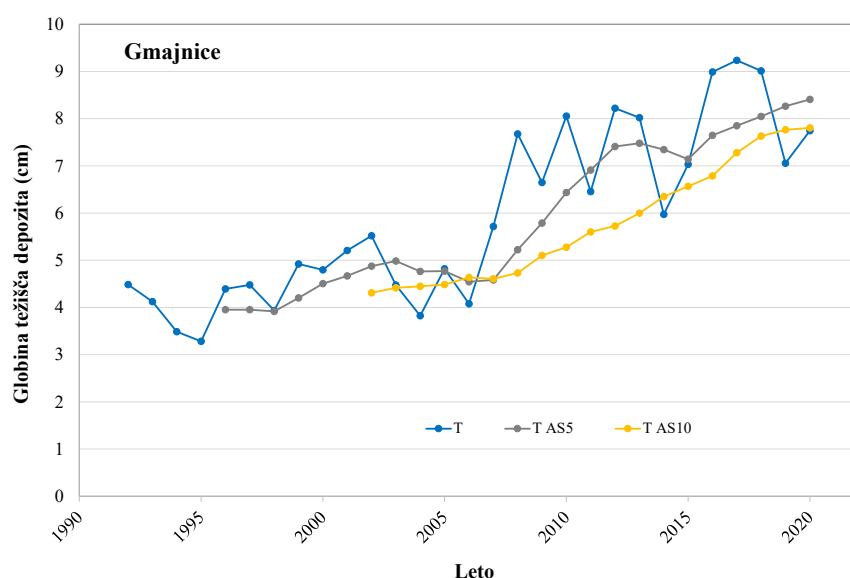
Rezultati meritev specifične aktivnosti radionuklidov v vzorcih zemlje so zbrani v tabelah T-57, T-58, T-59 in T-60, ki so na priloženi zgoščenki v poročilu *Merski rezultati - nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020*, IJS-DP-13462, marec 2021. Izmerjeni so bili naravni radionuklidi ter umetna radionuklida Cs-137 in Sr-90, ki sta prisotna zaradi globalne kontaminacije. Drugi



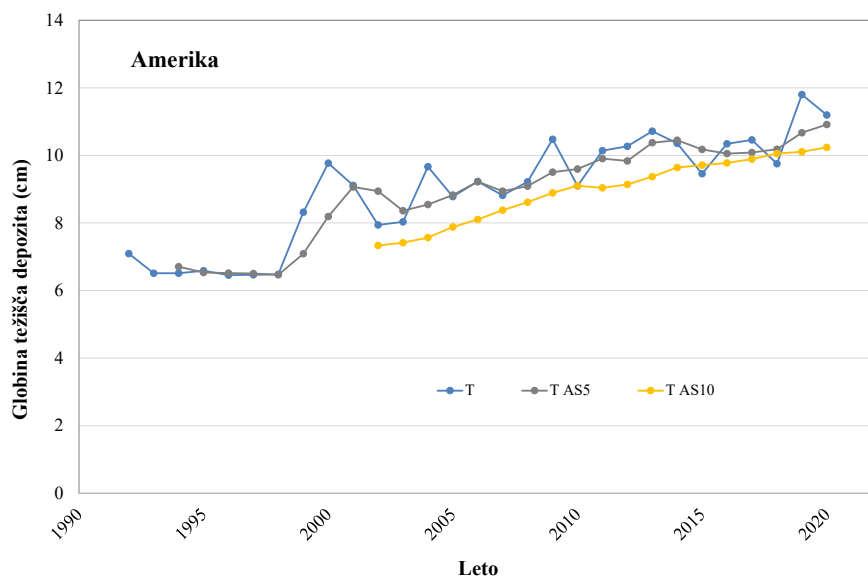
radionuklidi, ki se pojavljajo v izpustih NEK (plinasti izpusti), so prikazani v tabeli 5.4, tekoči izpusti se obravnavajo v poglavju *Radioaktivnost v rečni vodi, sedimentih in ribah*. Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v zemlji iz uranovega in torijevega razpadnega niza ter K-40 se pri spomladanskem 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 [53] za države južne Evrope.

Specifične aktivnosti Cs-137 v zemlji so bile v letu 2020 od 2,5 Bq/kg v globini 5–10 cm v Ameriki do 63 Bq/kg v globini 5–10 cm v Gmajnicah. Na slikah 5.1a–5.1c je prikazana časovna odvisnost globine težišča nanosa (depozita) na podlagi meritev od leta 1992 dalje za lokacije Gmajnice, Amerika in Kusova Vrbina.

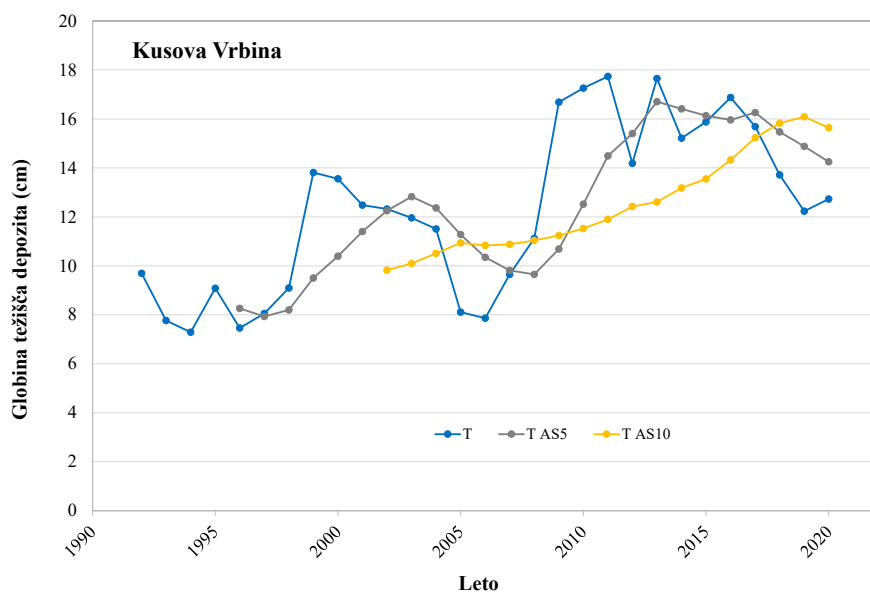
Opazno je precejšnje razsutje vrednosti, izračunanih iz rezultatov meritev specifičnih aktivnosti v posameznih letih. Vzroka sta lahko dva. Prvi je nehomogenost svežega nanosa po črnobilski nesreči in vpliv prednostnih smeri toka vode v zemeljski ruši, ki lahko bistveno spremeni pričakovano porazdelitev radionuklidov v zemlji tudi na bližnjih lokacijah [53]. 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 5.1c, 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 5.1c, navidezno hitrejše kot na drugih dveh lokacijah. Začetna globina težišča nanosa na lokaciji Kusova Vrbina, če upoštevamo podatke od leta 1992, je ustrezno večja. S slik je razvidno, da šele 10-letno drseče povprečje izpovpreči lokalno nehomogenost useda in vpliv hidrogeoloških procesov v zgornjih plasteh.



Slika 5.1a: 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.

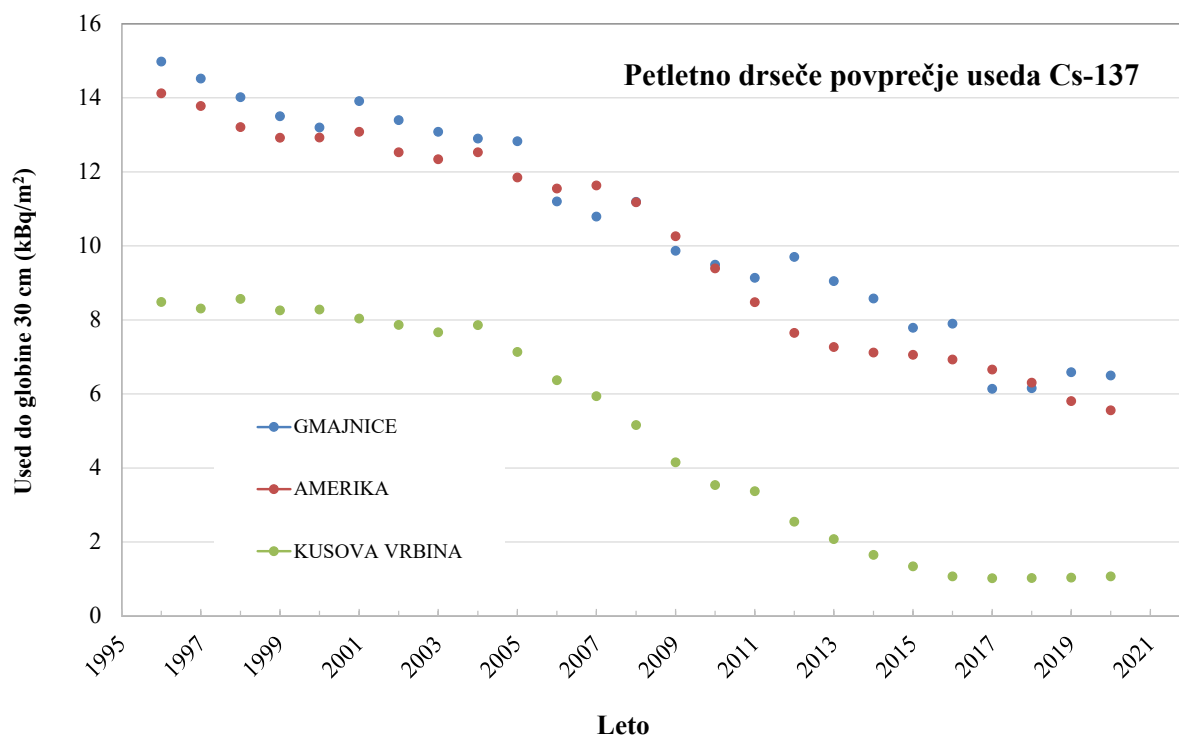


Slika 5.1b: Globina težišča nanosa Cs-137, izračunanega na podlagi letnih vzorčenj za lokacijo Amerika. Prikazano je tudi 5-letno (T AS5) in 10-letno (T AS10) drseče povprečje globine težišča depozita.

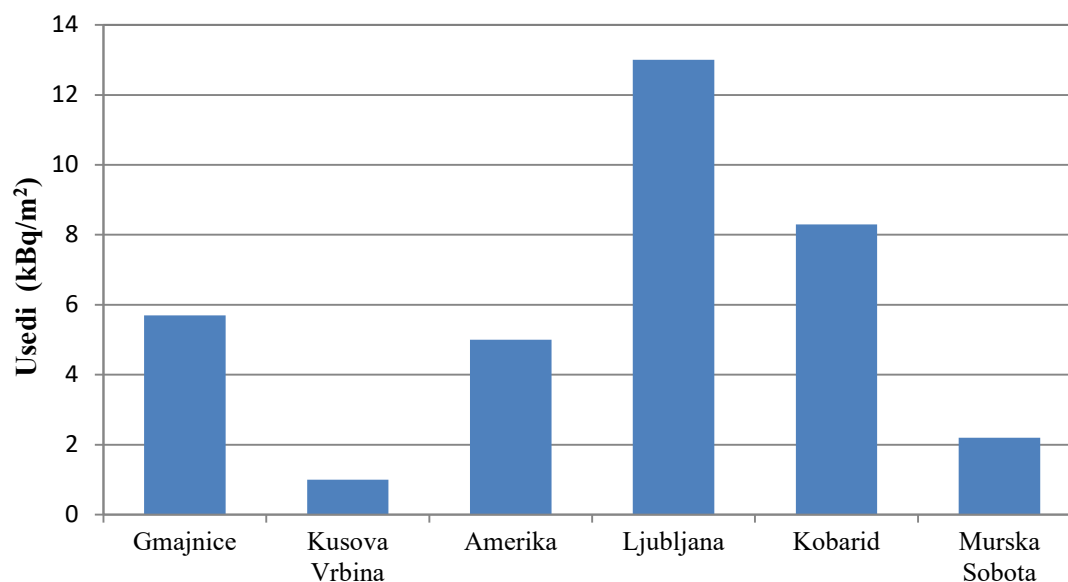


Slika 5.1c: Globina težišča nanosa Cs-137, izračunanega na podlagi letnih vzorčenj za lokacijo Kusova Vrbina. Prikazano je tudi 5-letno (T AS5) in 10-letno (T AS10) drseče povprečje globine težišča depozita.

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 5.2.



Slika 5.2: Petletno drseče povprečje useda Cs-137 do globine 30 cm za lokacije Gmajnice, Amerika in Kusova Vrbina



Slika 5.3: Primerjava med usedi 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.



Na sliki 5.2 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 prevladujoč vpliv na preporazdelitev useda. Globina težišča nanosa do globine 30 cm je po letu 2010 približno 15 cm (slika 5.1c), kar kaže na to, da je porazdelitev približno homogena. Iz tega sledi, da je naplavljena 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 naplavljeno material.

V okviru nadzora radioaktivnosti v okolju v Republiki Sloveniji se meri used do globine 30 cm v Ljubljani, Kobaridu in Murski Soboti. V letu 2020 so bili na teh lokacijah izmerjeni povprečni usedi Cs-137 ($13,0 \pm 0,7$) kBq/m², ($8,3 \pm 1,5$) kBq/m² in ($2,2 \pm 0,7$) kBq/m². Te vrednosti v povprečju presegajo oziroma so primerljive z vrednostmi ($5,7 \pm 0,7$) kBq/m², ($1,0 \pm 0,1$) kBq/m² in ($5,0 \pm 0,7$) kBq/m², ki so bile izmerjene do globine 30 cm v Gmajnicah, Kusovi Vrbini in Ameriki. Primerjava med usedi na sliki 5.3 kaže, da izmerjeni used Cs-137 v okolici NEK ni posledica izpustov NEK. Vredno je omeniti, da je prispevek Cs-137 k letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu iz plasti 15–30 cm največ 5 % prispevka iz plasti 0–15 cm

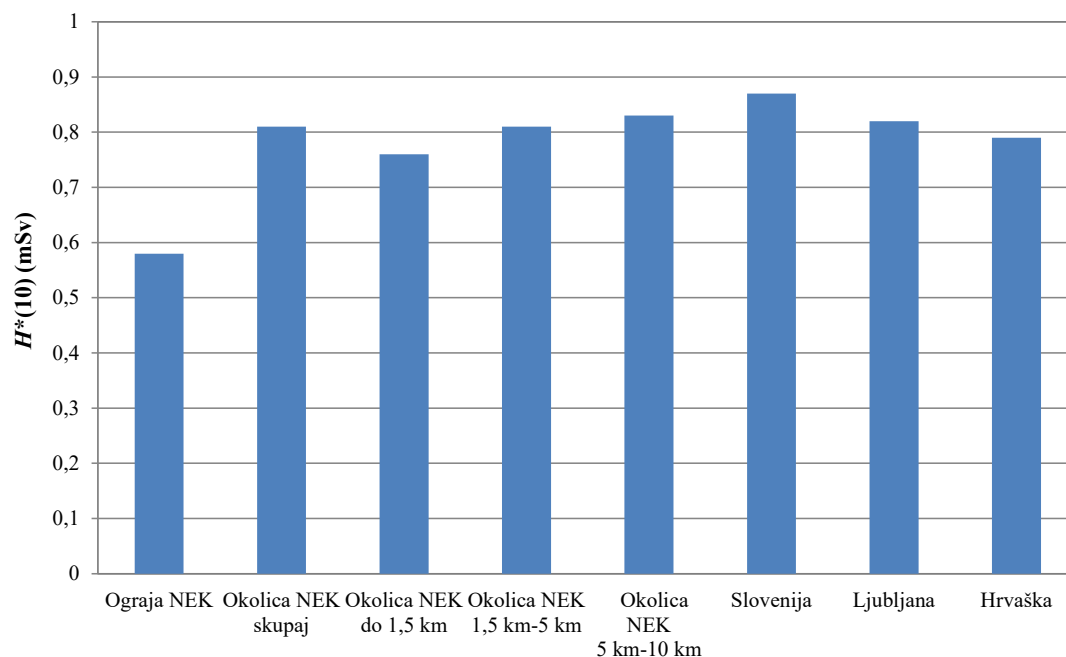
V izpuhu NEK se, razen žlahtnih plinov, radionuklidov joda, Co-60, Cs-137 in Te-127m in Te-125m, v letu 2020 niso pojavili drugi sevalci gama. Tekočinski izpusti NEK so vsebovali aktivacijske in fisijske produkte, sevalce gama, Mn-54, Co-58, Co-60, Ag-110m, Sb-125 in Cs-137. Noben od teh radionuklidov, 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.

Meritve TLD

Rezultati meritev doze zunanjega sevanja (sevanja gama in ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja) za leto 2020 so v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462* v tabelah T-53/b in T-53/c za dozimetre v okolici NEK in za dozimetre na ograji NEK. V tabeli 5.1 in na sliki 5.4 so povzeti povprečni letni okoljski dozni ekvivalenti za okolico NEK, za ograjo NEK, za Slovenijo in za okolico Zagreba. 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 2020

Lokacija	Št. TLD	$H^*(10)$ (mSv)	Razpon $H^*(10)$ (mSv)
Na ograji NEK	9	$0,58 \pm 0,04$	0,49–0,60
Okolica NEK skupaj	57	$0,81 \pm 0,10$	0,66–1,03
Okolica NEK do 1,5 km	8	$0,76 \pm 0,12$	0,67–1,03
Okolica NEK od 1,5 km do 5 km	25	$0,81 \pm 0,09$	0,66–0,99
Okolica NEK od 5 km do 10 km	24	$0,83 \pm 0,09$	0,66–0,98
Slovenija	50	$0,87 \pm 0,16$	0,59–1,32
Ljubljana – referenčna lokacija	1	$0,82 \pm 0,09$	–
Hrvaška	10	$0,79 \pm 0,11$	0,65–1,00

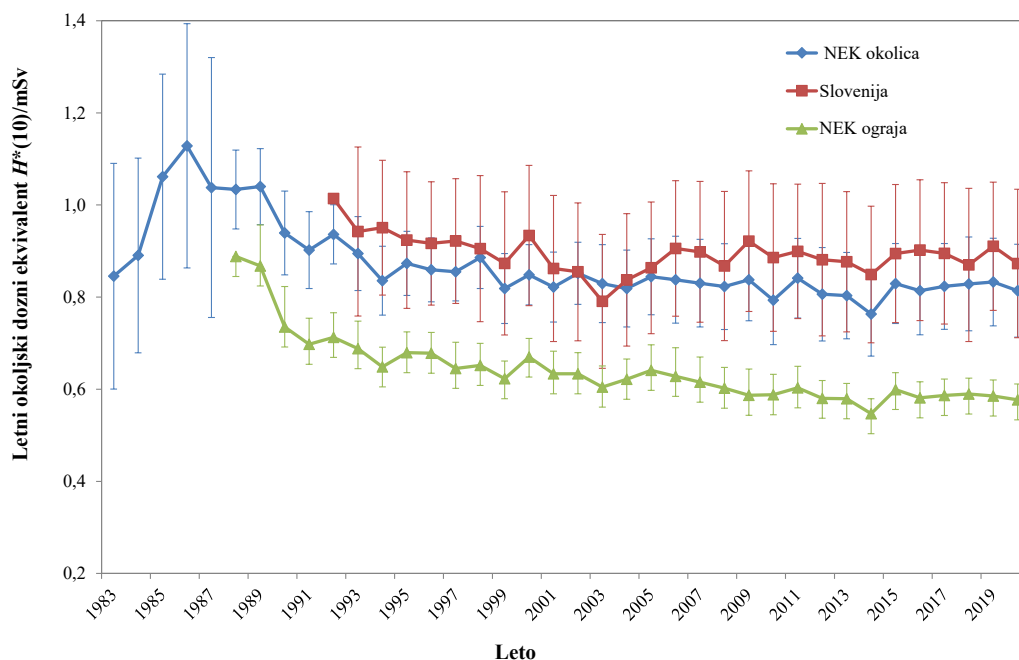


Slika 5.4: Primerjava med povprečnimi okoljskimi doznimi ekvivalenti $H^*(10)$, izmerjenimi v okolici NEK, na referenčni lokaciji v Ljubljani, povprečnimi ekvivalenti izmerjenimi na Hrvaškem v okviru programa nadzora radioaktivnosti v okolici NEK, ter povprečnimi ekvivalenti izmerjenimi v okviru meritev radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji

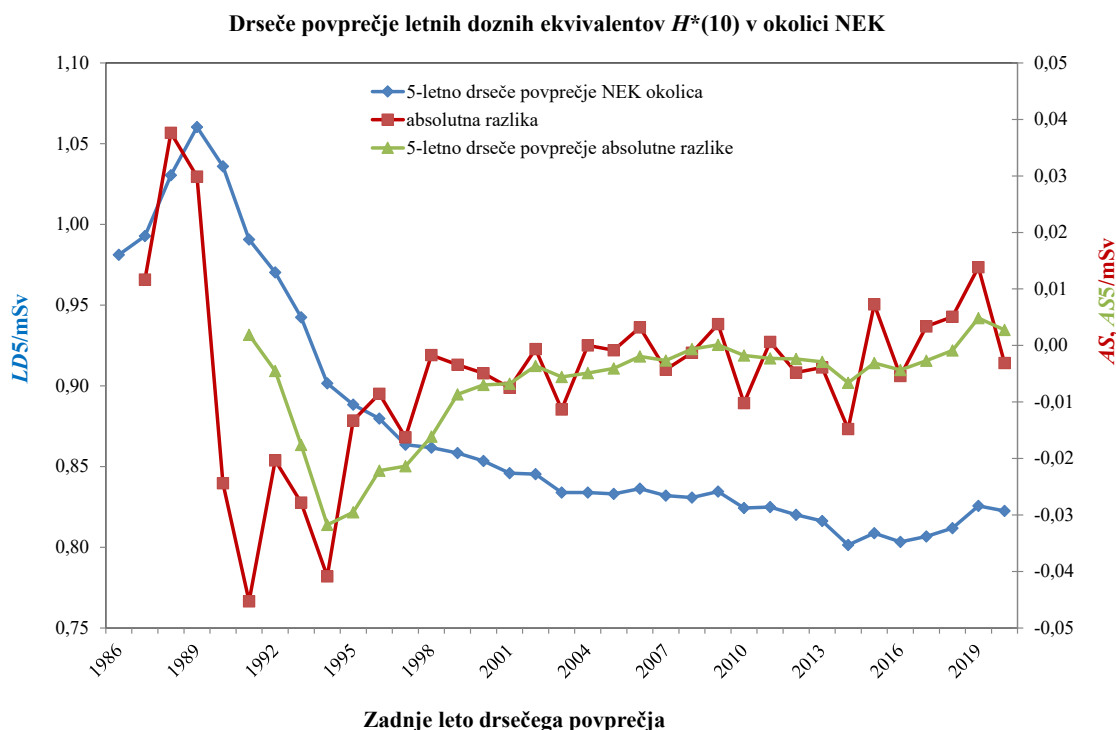
Na sliki 5.5 so povzeti rezultati meritev povprečnih letnih okoljskih doznih ekvivalentov, izmerjenih v okolici NEK, na ograji NEK in v Sloveniji. Meritve v Sloveniji kažejo, da je povprečni letni okoljski dozni ekvivalent v okolici NEK sistematično nekoliko nižji kot v življenjskem okolju v Sloveniji. Iz tabele 5.1 in slike 5.2 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].

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.

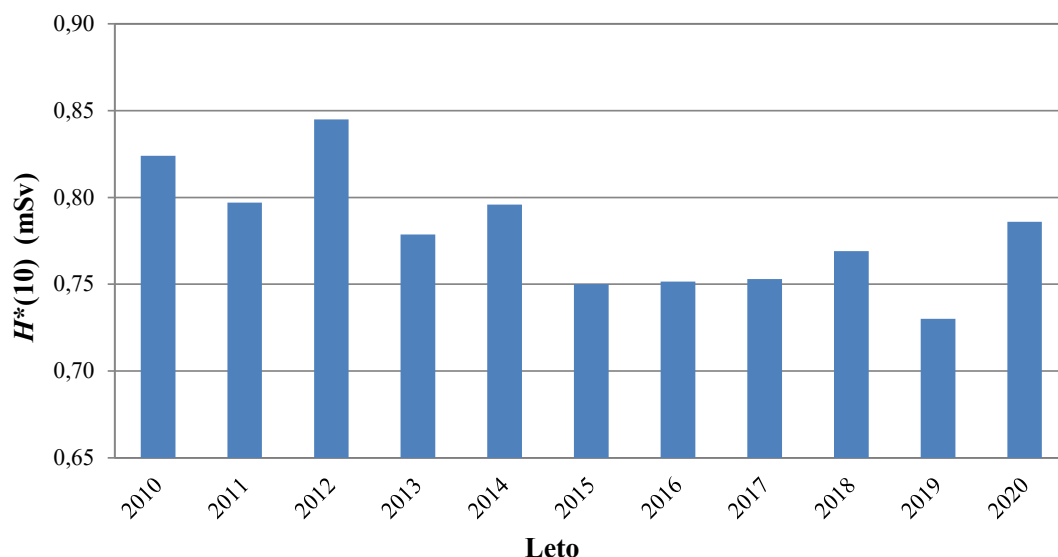
Slika 5.7 prikazuje povprečni okoljski dozni ekvivalent na Hrvaškem, izmerjen v okviru radiološkega nadzora okolice NEK, po letu 2010. Razvidno je, da je v zadnjih letih povprečni letni dozni ekvivalent, izmerjen s TLD na Hrvaškem, manjši od tistega, ki je bil izmerjen s TLD v okolici NEK, vendar se je, podobno kot v Sloveniji, v zadnjih letih zmanjševanje doze ustavilo.



Slika 5.5: Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ v okolici NEK, na ograji NEK, in v Sloveniji od začetka meritev do 2020



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 2020. Negotovosti za $LD5$ so med 0,030 mSv in 0,11 mSv, za AS med 0,043 mSv in 0,13 mSv ter za $AS5$ med 0,019 mSv in 0,033 mSv. Zaradi boljše preglednosti negotovosti na sliki niso prikazane.



Slika 5.7: Povprečni okoljski dozni ekvivalent na Hrvaškem, izmerjen v okviru radiološkega nadzora okolice NEK po letu 2010

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 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.

Na lokacijah Gmajnice in Amerika se vzorčuje neobdelana zemlja, ki je podobna kot podlaga pri večini merilnih postaj za TLD. Na lokaciji Kusova Vrbina pa se vzorčuje 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 [53]. 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 drugih dveh lokacijah ujemanja ni, kar pojasnjujemo s tem, da se lokacija vzorčenja zemlje ne ujema povsem z lokacijo, kjer je postavljen merilnik TLD.



Tabela 5.2: Primerjava izračunanega in izmerjenega letnega okoljskega doznega ekvivalenta v letu 2020 za tri lokacije vzorčenja zemlje v okolici NEK

Radionuklid	Povprečna specifična aktivnost (0–15 cm)	Letni okoljski dozni ekvivalent, $H^*(10)$		Letni okoljski dozni ekvivalent, $H^*(10)$ (TLD)
		Sevanje tal	Sevanje tal in ionizirajoča kozmična komponenta	
	(Bq/kg)	(mSv)		(mSv)
	Gmajnice			št. dozimetra 59
U-238	36,4 ± 2,9	0,70 ± 0,02	0,98 ± 0,02	0,72 ± 0,09
Ra-226	44,7 ± 1,9			
Ra-228	33,0 ± 0,9			
Th-228	33,6 ± 1,2			
K-40	402 ± 11			
Cs-137	45,8 ± 5,0			
	Kusova Vrbina			št. dozimetra 21
U-238	23,0 ± 1,5	0,49 ± 0,01	0,77 ± 0,01	0,71 ± 0,10
Ra-226	34,4 ± 1,4			
Ra-228	26,0 ± 0,4			
Th-228	26,0 ± 1,0			
K-40	330 ± 8			
Cs-137	3,5 ± 0,4			
	Amerika			št. dozimetra 63
U-238	30,8 ± 3,7	0,63 ± 0,05	0,91 ± 0,05	0,77 ± 0,10
Ra-226	42,7 ± 5,0			
Ra-228	32,2 ± 0,5			
Th-228	31,7 ± 0,6			
K-40	390 ± 10			
Cs-137	26,8 ± 0,5			

Z uporabo programa EXPACS ([59], [60], [61]) izračunamo, da je letni okoljski dozni ekvivalent kozmičnih žarkov v Krškem (nadmorska višina 155 m) 0,35 mSv, od tega odpade 0,071 mSv na dozo zaradi nevtronov, na katere dozimetri TLD niso občutljivi. V Velikem Trnu (nadmorska višina 434 m) pa je letni okoljski dozni ekvivalent 0,40 mSv, od česar odpade 0,09 mSv na nevtrone, kar pomeni, da je doza zaradi ionizirajoče komponente kozmičnega sevanja na nadmorskih višinah dozimetrov v okolici jedrskega objekta v Krškem skoraj enaka.

Iz tabele 5.4 lahko ocenimo, da je prispevek zemeljskega sevanja k letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu v okolici NEK v razponu od 0,49 mSv do 0,70 mSv. Izračunani prispevek kozmične komponente je približno eno tretjino celotne letne doze brez nevtronske komponente. Za lokacijo Kusova Vrbina se vsota obeh prispevkov v okviru negotovosti ujema z izmerki TLD.



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 2020, IJS-DP-13462, marec 2021*. Pri rezultatih meritev s temi merilniki je lastno ozadje merilnikov upoštevano in odšteto od izmerkov. V letu 2020 je bil izmerjen povprečni letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ ($0,82 \pm 0,14$) mSv v območju od 0,62 mSv do 1,08 mSv. Ta vrednost je enaka povprečnemu letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu, ki je bil izmerjen s TLD v okolici NEK (tabela 5.1). Povprečni letni okoljski dozni ekvivalent pri preostalih 60 kontinuirnih merilnikih v Sloveniji, ki so pod nadzorom URSJV, je bil v letu 2020 ($0,88 \pm 0,15$) mSv v območju od 0,62 mSv do 1,17 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 2020, IJS-DP-13462*), 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 ($0,75 \pm 0,02$) mSv, določena z MFM, v okviru negotovosti ujema z vrednostjo ($0,82 \pm 0,09$) mSv, določeno s TLD.

OCENA UČINKOV

Iz dejanske globinske porazdelitve specifične aktivnosti Cs-137 je bil ocenjen letni okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$, ki je posledica globalne kontaminacije. Za izračun hitrosti doze so bili uporabljeni rezultati simulacije Monte Carlo, ki omogočajo določitev prispevkov Cs-137 iz različnih globin [55]. Okoljski dozni ekvivalent $H^*(10)$ je bil izračunan iz zveze $H^*(10) = w \cdot D$ po standardu ISO 4037-3, pri čemer je D absorbirana doza v zraku na letni ravni, $w = 1,20$ pa je konverzijski faktor za pretvorbo absorbirane doze v okoljski dozni ekvivalent za Cs-137. Iz tabele 5.5 je razvidno, da so ocenjeni letni okoljski dozni ekvivalenti zaradi Cs-137 na lokacijah v okolici NEK v območju med 0,003 mSv in 0,033 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 0,015 mSv do 0,052 mSv.

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 2020 ($0,81 \pm 0,09$) mSv, kar se ujema z vrednostjo ($0,83 \pm 0,10$) mSv v letu 2019.

Ker okoljski TLD ne merijo doze nevtronske komponente kozmičnega sevanja, je bila le-ta izračunana z uporabo programa EXPACS ([59], [60], [61]). Program omogoča izračun doze, ki je posledica posameznih komponent kozmičnega sevanja vključno z nevtronsko komponento za poljubno geografsko dolžino in širino. Za leto 2020 je prispevek nevtronov k letnemu okoljskemu doznemu ekvivalentu 0,071 mSv.

Kot je bilo že omenjeno, je bil prispevek sevanja gama iz objektov znotraj ograje NEK k letni dozi na ograji pod mejo zaznavnosti. 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 [56]. 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.



Tabela 5.3: Ocenjena letna vrednost $H^*(10)$ zaradi globalne kontaminacije s Cs-137 do globine 30 cm v letu 2020

LOKACIJA	$H^*(10)$ (mSv)	LOKACIJA	$H^*(10)$ (mSv)
Gmajnice	$0,033 \pm 0,007$	Ljubljana	$0,052 \pm 0,010$
Kusova Vrba	$0,003 \pm 0,001$	Kobarid	$0,040 \pm 0,008$
Amerika	$0,015 \pm 0,003$	Murska Sobota	$0,015 \pm 0,003$

Učinek usedanja in izpiranja umetne radioaktivnosti iz ozračja zaradi izpustov NEK je predstavljen v tabeli 5.4. Vrednost letnega okoljskega doznega ekvivalenta je na lokacijah v okolici NEK manjša od vrednosti, izmerjenih v letu 2019, ker so bili izpusti v atmosfero manjši. Okoljskega doznega ekvivalenta zaradi usedanja iz oblaka ne moremo izmeriti, lahko ga pa 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 2020 vključno z modelirano domeno so predstavljeni v poglavju o radioaktivnosti v zraku. Iz podatkov o gibanju zračnih mas se določijo razredčitveni koeficienti χ/Q , ki opisujejo koncentracijo radionuklidov v posameznih celicah modelne domene. Velikost modelne domene v NEK je $25 \text{ km} \times 25 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ in je razdeljena na 100×100 celic v horizontalni smeri in 20 celic po vertikali. Celica je velika $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$, navpična dimenzija celice pa je spremenljiva in je odvisna od višine, v kateri je celica. Tabelirane vrednosti depozicijskih faktorjev in razredčitvenih koeficientov so v poročilu *Merski rezultati – nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško – Poročilo za leto 2020, IJS-DP-13462*, marec 2021.

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, $(\chi/Q)_i$ azredčitveni koeficienti nivojev i , h_i višina nivoja i in N število nivojev v domeni.

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 [62]. Dozni pretvorbeni koeficient 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 2020 letna efektivna doza največja na oddaljenosti 0,5 km od ventilacijskega izpusta NEK (zahodna ograja, okvirno velja tudi za razdaljo 500 m od osi reaktorja), vendar je tudi ta prispevek popolnoma zanemarljiv glede na druge prispevke zunanega sevanja. Tega prispevka NEK ni mogoče izmeriti niti s TLD niti z merilniki, ki neprekinjeno merijo ionizirajoče sevanje v okolici NEK, saj je daleč pod mejo detekcije. Že same variacije letnih efektivnih doz na posameznih lokacijah zaradi različnosti naravnega sevanja daleč presegajo prispevek NEK.

V tabeli 5.5 so povzete ocenjene letne vrednosti $H^*(10)$ za prebivalstvo v okolici NEK. Prevladuje izpostavitve zaradi naravnega sevanja in useda Cs-137 zaradi globalne kontaminacije. Prispevek NEK je zanemarljiv.


Tabela 5.4: Ocena letne efektivne doze zunanjega sevanja zaradi useda radioaktivnih snovi za različne razdalje od NEK za leto 2020

Oddaljenost od ventilacijskega izpusta NEK (km)			0,5	0,8	1,0	1,5	3,25	7,5
Radionuklid	Izpust (Bq na leto)	DCF (Sv na leto) / (Bq/m ²)	Letna efektivna doza zunanjega sevanja zaradi useda radioaktivnih snovi (mSv)					
I-131	–	7,83E–11	–	–	–	–	–	–
I-132	–	1,84E–11	–	–	–	–	–	–
I-133	–	4,32E–11	–	–	–	–	–	–
H-3	3,45E+12	–	–	–	–	–	–	–
C-14	1,98E+10	–	–	–	–	–	–	–
Cr-51	–	7,02E–12	–	–	–	–	–	–
Mn-54	–	1,94E–10	–	–	–	–	–	–
Co-58	–	2,24E–10	–	–	–	–	–	–
Co-60	1,77E+03	5,67E–10	3,45E–15	4,04E–16	5,04E–16	5,12E–16	8,96E–17	8,12E–17
Zr-95	–	1,70E–10	–	–	–	–	–	–
Nb-95	–	1,73E–10	–	–	–	–	–	–
Ag-110m	–	6,48E–10	–	–	–	–	–	–
Sb-124	–	4,05E–10	–	–	–	–	–	–
Te-125m	8,33E+03	2,97E–12	8,25E–17	9,98E–18	1,24E–17	1,26E–17	2,21E–18	2,01E–18
Te-127m	1,90E+04	2,97E–12	1,88E–16	2,28E–17	2,83E–17	2,88E–17	5,04E–18	4,58E–18
Cs-137	1,96E+03	1,35E–10	8,82E–16	1,07E–16	1,33E–16	1,35E–16	2,36E–17	2,51E–17
Fe-55	–	4,86E–14	–	–	–	–	–	–
Sr-90	2,47E+03	2,40E–11	1,98E–16	2,39E–17	2,98E–17	3,03E–17	5,30E–18	4,82E–18
VSOTA			4,70E–15	5,68E–16	7,07E–16	7,19E–16	1,26E–16	1,14E–16

Tabela 5.5: Doze $H^*(10)$ zaradi zunanjega sevanja v letu 2020 za prebivalstvo v okolici NEK

Vir	Podatki	$H^*(10)$ (mSv)
sevanje gama + ionizirajoča komponenta kozmičnega sevanja	TLD	0,90 (90 %)
kozmični nevtroni	[53], [59], [60], [61]	0,07 (11 %)
naravno sevanje – skupaj		0,97 (100 %)
kontaminacija zaradi černobilske nesreče in poskusnih jedrskih eksplozij	Cs-137 v zemlji	0,017 (2.5 %)*
NEK – atmosferski izpusti	used (model)	4,07E–15
SKUPAJ		0,99

* Ocena deleža glede na naravno sevanje. V tej oceni ni upoštevano, da se prebivalec 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 [55].



SKLEPI

Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v vzorcih zemlje v letu 2020 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 0,49 mSv in 0,70 mSv.

Prisotnost umetnih radionuklidov v okolju je posledica globalne kontaminacije zaradi jedrskih poskusov in černobilske nesreče. Učinka NEK tudi v letu 2020 ni bilo mogoče zaznati. Prispevek Cs-137 k letni dozi $H^*(10)$ je od 1,2 % do 11 % skupne doze zaradi naravnih in umetnih radionuklidov v zemlji. Letni okoljski dozni ekvivalent zaradi globalne kontaminacije s Cs-137 na lokacijah v okolici NEK, ocenjeni ob predpostavki realne globinske porazdelitve Cs-137, je v območju med 0,003 mSv in 0,033 mSv, kar je v povprečju manj kot na lokacijah, kjer se zemlja vzorčuje 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 0,81 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 2020 je bila za prebivalstvo v okolici NEK 0,97 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 E-8 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.

Vsebnost umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 v hrani, ki izvirata iz globalne kontaminacije okolja, je povečala sevalno obremenitev referenčne osebe iz okolice NEK še za 1,6 μSv , kar je le 0,8 % 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 0,7 μSv . Pri primerjavi merskih rezultatov za hrano iz okolice NEK in Republike Slovenije se upoštevajo le živila, ki so v skupnem naboru. V letu 2020 k dozi splošnih kontaminantov Cs-137 in Sr-90 v okolici NEK največ prispeva specifična aktivnost Sr-90 v listni zelenjavi, pri oceni efektivne doze drugod po Sloveniji pa specifična aktivnost Cs-137 v mesu in žitih. Specifična aktivnost Cs-137 v divjačini (zajec) je bila v 2020 primerljiva z drugimi živali, vzorčenimi v okolici NEK in drugod po Sloveniji, čeprav v gozdnih ekosistemih po Sloveniji občasno še vedno ugotavljamo zelo visoke vsebnosti Cs-137 kot posledico nesreče v Černobilu in preteklih jedrskih poskusov.

V zračnih izpustih NEK za izpusti tritija 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 ($14,85 \pm 0,51$) μSv , v krajih, kjer vpliva NEK v letu 2020 ni bilo mogoče zaznati (Dobova), pa ($14,8 \pm 0,62$) μSv . Med obema vrednostnima ni statistično značilne razlike (velika negotovost ocenjene vrednosti), doza, 0,05 μSv , 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 vodijo k izpostavitvi okoliškega prebivalstva 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 [63], [62]. 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 [64]. 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



užívajo 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 [64], 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 [64].

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 2020, ki so označena na priloženem zemljevidu na koncu poročila, so bila: sadovnjak ob NEK (sadje), Pesje (mleko, zelenjava), Brege (meso, mleko, zelenjava), Vihre (zelenjava), Vrbina (jajca, sadje), Spodnji Stari Grad (meso, jajca, zelenjava), Žadovinec (zelenjava, žito), Trnje (zelenjava), Leskovec (meso, sadje), Dolenje Skopice (mleko, zelenjava). V letu 2020 je bilo v okolici NEK skupno vzorčenih 32 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 2020 v bližnji okolici NEK (zunanji krog) in na kontrolni točki v Dobovi, so bile opravljene na IJS. Specifična aktivnost C-14 je bila izmerjena v koruzi in pšenici.

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 2020, IJS-DP-13462*, marec 2021.

Rezultati meritev vzorcev hrane so prikazani v tabelah T-61 (mleko - Pesje), T-62 (mleko - Vihre), T-63 (mleko - Brege), T-64 (I-131 v vzorcih mleka), T-65, T-66, T-67 (sadje – jabolka, hruške, jagode), T-68 (belo grozdje, grozdje, šipek), T-69 do T-73 (podzemna zelenjava: krompir, korenje, rdeča pesa, repa, čebula, por; listna zelenjava – zelena solata, zelje, radič, peteršilj; plodovke – fižol v zrnju, stročji fižol, paprika, paradižnik, feferoni, grah, kumare, bučke; žita – pšenica, koruza, ječmen) T-74, 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 le 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. Vzorcena so bila naslednja živila: mleko; sadje – jabolka, hruške; podzemna zelenjava – koleraba, česen; listna zelenjava – motovilec; plodovke – kumare, bučke; žita – pšenica, koruza; jajca in meso (kokošja jajca, kokošje, svinjsko in goveje meso ter divjačina - srna), skupno 15 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 [66], kažejo povečane vsebnosti tritija v rastlinju neposredno ob NEK v primerjavi z rastlinjem na kontrolni točki.

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 [65]. 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 z 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 2020 izmerjena v koruzi in pšenici in sicer v juliju in septembru. Vrednosti so zbrane v tabeli 6.1. Med povprečnimi vsebnosti C-14 v hrani in rastlinju, merjenih v juliju in septembru na istih lokacijah, ni statistično značilnih razlik. Najvišja izmerjena specifična aktivnost C-14, (242 ± 3) Bq na kilogram ogljika, je bila izmerjena v koruzi (lokacija M, Žadovinek) v juliju. Lokacije so označene na sliki 1 v poročilu [19].

Tabela 6.1: Specifične aktivnosti C-14 v okolici NEK v letu 2020

Območje v okolici NEK	Julij 2020	September 2020
	Bq na kilogram ogljika	
Najvišja vrednost	(242 ± 3) (lokacija M, Žadovinek)	(241 ± 4) (lokacija N, Žadovinek)
Rob izključitvenega območja – 500 m od osi reaktorja (zunanji krog)	(236 ± 3)	(239 ± 4)
Dobova	(233 ± 10)	/



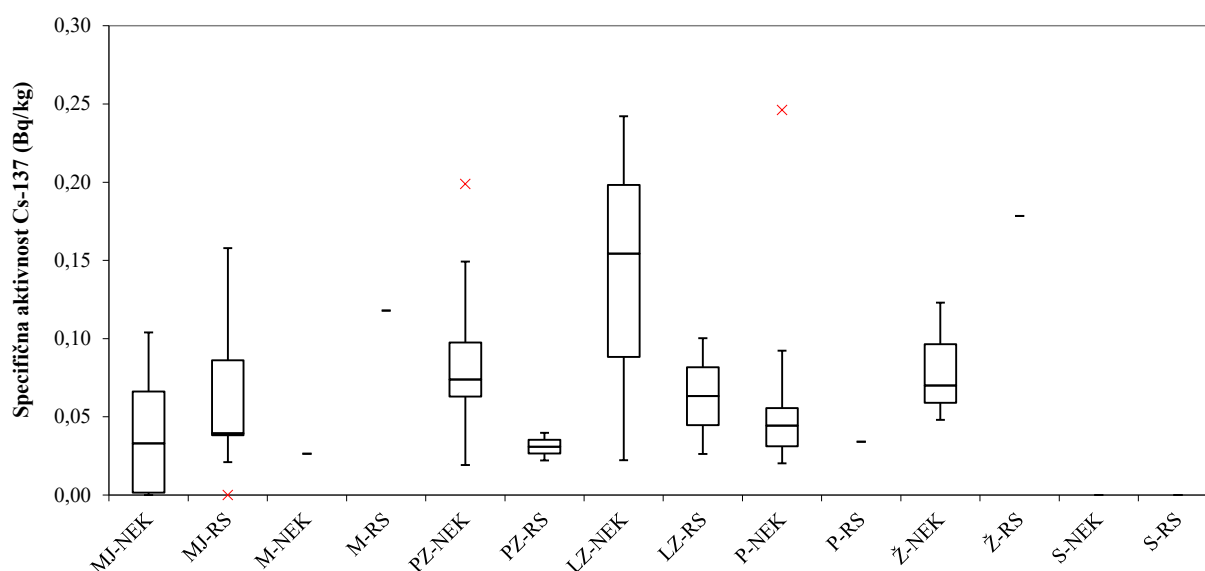
Cezij (Cs-137)

Radionuklid Cs-137 je bil v letu 2020 tako v okolici NEK kot drugod po Sloveniji detektiran v vseh skupinah vzorčenih živil. Meritve drugod po Sloveniji je izvedel ZVD.

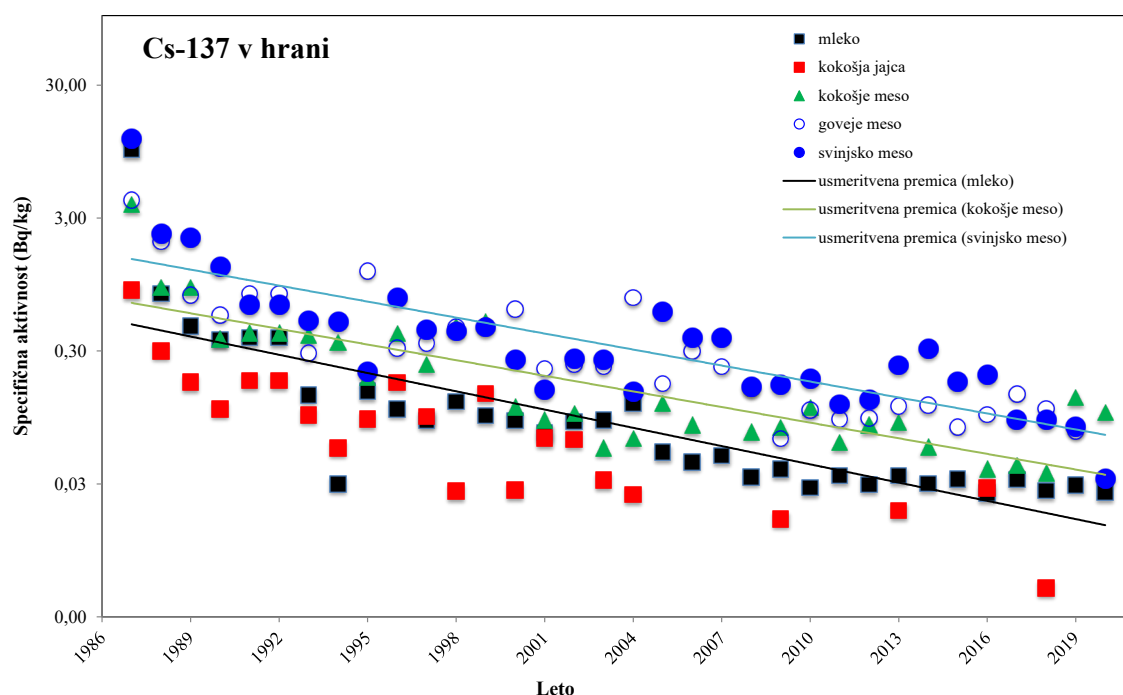
Specifična aktivnost Cs-137 v živilih v okolici NEK je od 0 Bq/kg do 0,25 Bq/kg in je primerljiva s specifično aktivnostjo Cs-137 v živilih, vzorčenih drugod po Sloveniji, to je od 0 Bq/kg do 0,18 Bq/kg [12]. Podatki so prikazani na sliki 6.1. V divjačini (zajec in srnjak; Leskovec, Kojsko) je bila specifična aktivnost Cs-137 ($0,7 \pm 0,02$) Bq/kg in ($2,2 \pm 0,08$) Bq/kg, kar je primerljivo z ostalimi živali.

V posameznih živilih v okolici NEK je bila najvišja specifična aktivnost Cs-137 izmerjena v fižolu ($0,25 \pm 0,04$) 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 ovsu iz Slovenske Bistrice, in sicer $< 0,18$ Bq/kg.

S slike 6.1 je razvidno, da največjo vsebnost Cs-137 v letu 2020 v okolici NEK in drugod po Sloveniji, najdemo v listni zelenjavi, mesu ter v žitih, najmanj pa v sadju.



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 2020 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 2020. Iz predstavitev je izvzeta divjačina, vzorčena 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 vzorčujejo. 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 2020. 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.

Specifične aktivnosti Cs-137 in Sr-90 v hrani z leti nihajo, vendar je opazna težnja zniževanja vrednosti. Tako je s slike 6.2 razvidno, da se je specifična aktivnost Cs-137 v mleku od černobilske nesreče do danes znižala za približno 400-krat, specifična aktivnost Sr-90 pa se je v enakem obdobju v mleku znižala za faktor 10 (slika 6.4). Izmerjena specifična aktivnost Cs-137 v mleku je tako že nekaj let na ravni izpred černobilskega obdobja (1984, 1985), specifična aktivnost Sr-90 pa je tudi za faktor 2 nižja kot pred černobilsko nesrečo. Tudi za druga živila živalskega izvora je opazna težnja zmanjševanja specifičnih aktivnosti Cs-137 in Sr-90 po černobilski nesreči (sliki 6.2 in 6.4). 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 [64]. Ta proces in pronicanje atomov Cs-137 globlje v zemljo z leti zmanjšujeta dostopnost Cs-137 rastlinam. Tako ta v manjšem številu vstopa v prehransko verigo človeka. To lahko podkrepimo, če povprečnim specifičnim aktivnostim Cs-137 v živilih živalskega izvora po letih narišemo usmeritvene premice⁵. 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.

⁵ 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 .



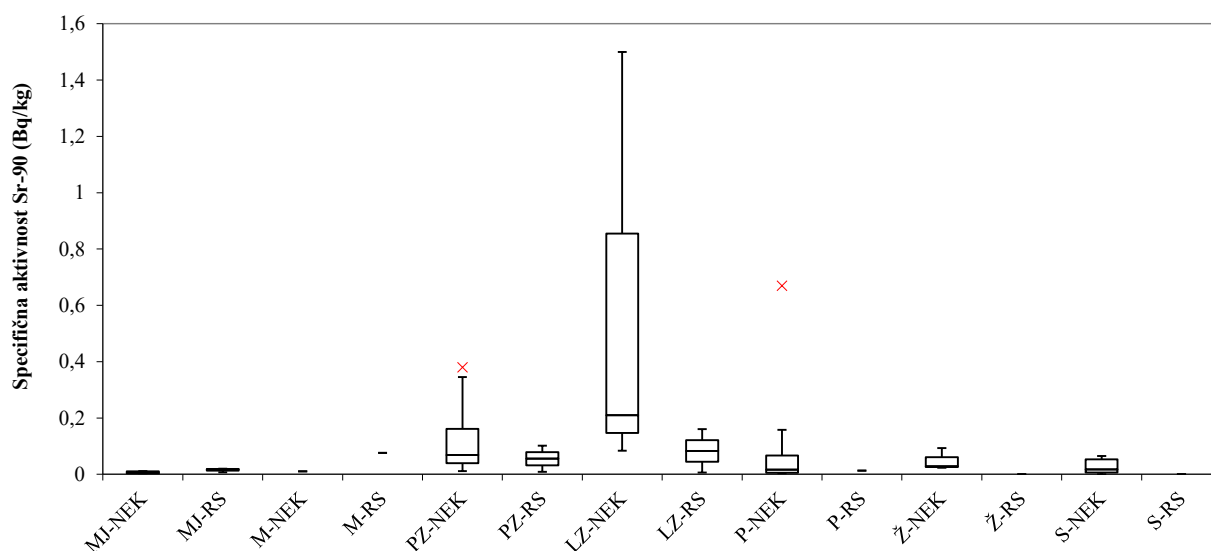
Kljub omenjenim težnjam pa v živilih, vzorčenih v gozdnih ekosistemih po Sloveniji, še vedno lahko ugotavljamo značilno višje specifične aktivnosti Cs-137 v primerjavi z žvili, vzorčenimi v agrikulturnih ekosistemih. V letu 2020 so bile vrednosti v divjačini (zajec, Leskovec, 0,07 Bq/kg in srnjak, Železniki, 2,2 Bq/kg) v okviru merske negotovosti primerljive z drugimi žvili (meso).

Stroncij (Sr-90)

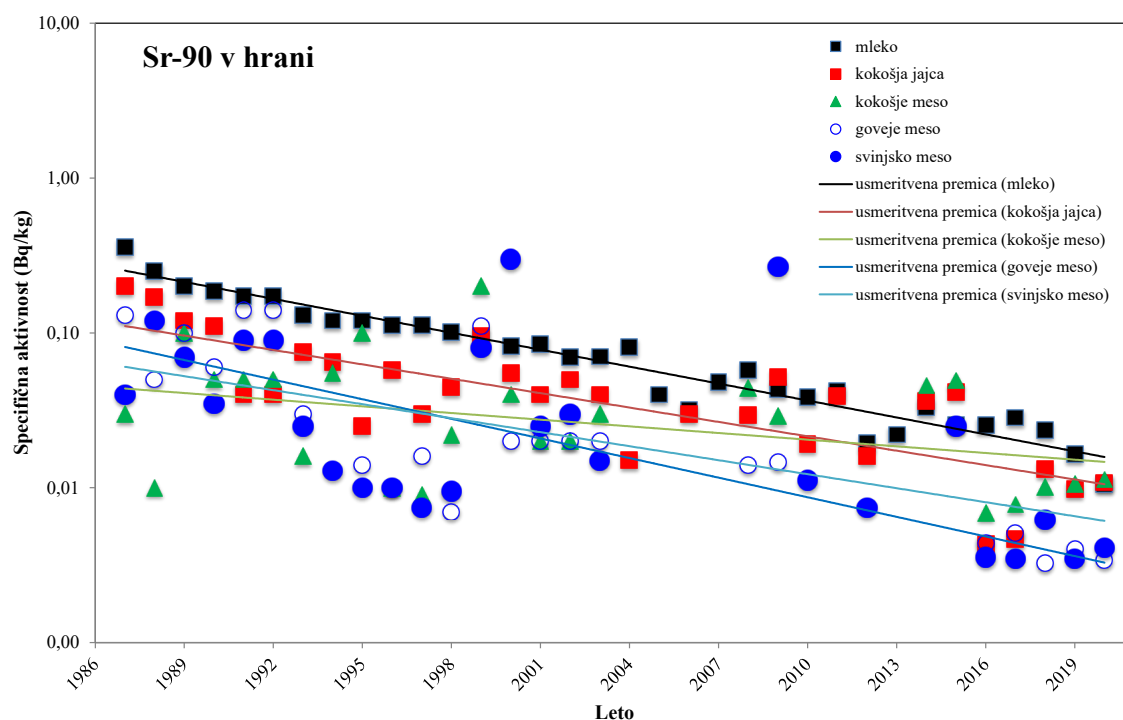
Radionuklid Sr-90 je bil v okolici NEK v letu 2020 detektiran v vseh skupinah žvil (slika 6.3). Specifična aktivnost Sr-90 v živilih v okolici NEK je od 0 Bq/kg do 1,5 Bq/kg, specifična aktivnost Sr-90 v živilih, vzorčenih drugod po Sloveniji, pa od 0 Bq/kg do 1,6 Bq/kg.

V okolici NEK v skupino žvil z večjo vsebnostjo Sr-90 spada hrana rastlinskega izvora, predvsem listna zelenjava, sledi podzemna zelenjava, žito, sadje, ter meso in mleko, kjer je povprečna specifična aktivnost Sr-90 najnižja. Tudi pri vzorčenju drugod po Sloveniji se razvrstitev skupin žvil po vsebnosti Sr-90 sklada z vzorčenjem v okolici NEK.

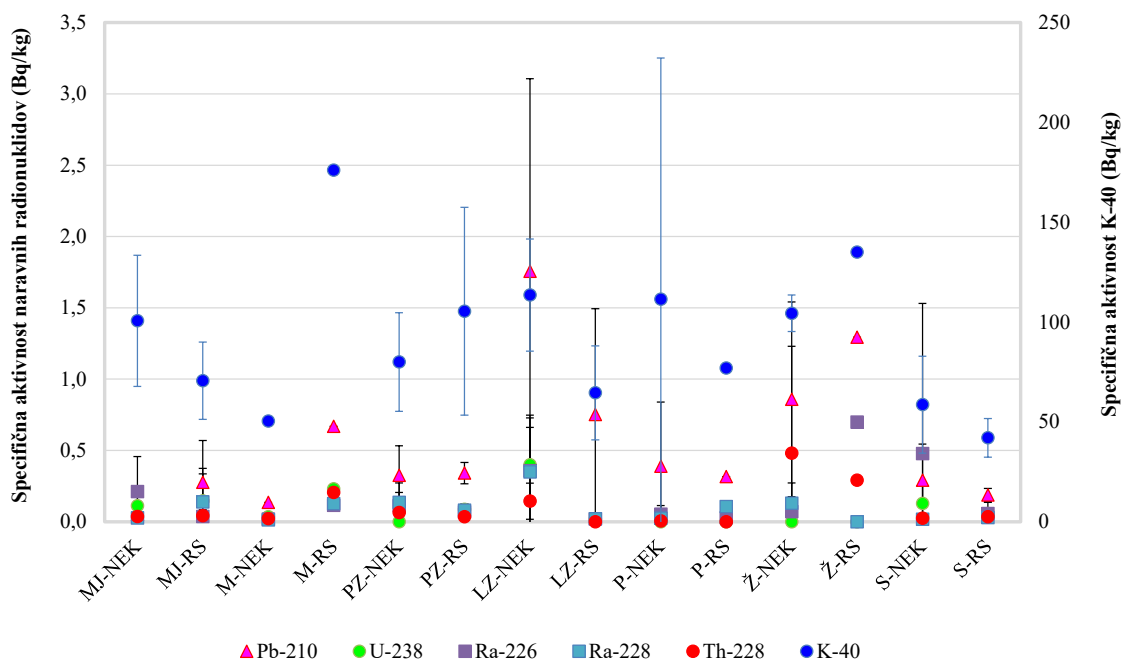
V okolici NEK so bile najvišje vrednosti detektirane v peteršilju ($1,5 \pm 0,3$) Bq/kg, drugod po Sloveniji pa v zelju ($0,16 \pm 0,03$) Bq/kg.



Slika 6.3: Specifična aktivnost Sr-90 (Bq/kg) v skupinah žvil: 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 žvil v letu 2020 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 2020. V predstavitvi po živilih so bila upoštevana žvila, ki spadajo v izbrano skupino; nabor žvil v okviru *Monitoringa radioaktivnosti v življenjskem okolju v RS* obsega še druge vrste žvil, kot so med, ribe, moka itd., ki se v okviru obratovalnega nadzora radioaktivnosti v okolici NEK ne vzorčujejo. Če je bilo odvzetih več vzorcev iste vrste, je v tabeli poročana aritmetična sredina. Z znakom – so označene posamične meritve, z znakom × pa ubežniki (angl. *outliers*).



Slika 6.4: Izmerjene specifične aktivnosti Sr-90 od leta 1987 do 2020 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 2020 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.



Jod (I-131)

V vzorcih nismo zaznali prisotnosti joda I-131.

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 2020 je bila specifična aktivnost K-40 v hrani, pridelani na krško-brežiškem polju, od 27 Bq/kg (kumare) do 399 Bq/kg (fižol v zrnju), v hrani, vzorčeni drugod po Sloveniji, pa od 32 Bq/kg (hruške) do 176 Bq/kg (mleko). V okolici NEK v skupino z večjo specifično aktivnostjo K-40 spada listna zelenjava in plodovke, med živila z manjšo aktivnostjo K-40 pa mleko in sadje.

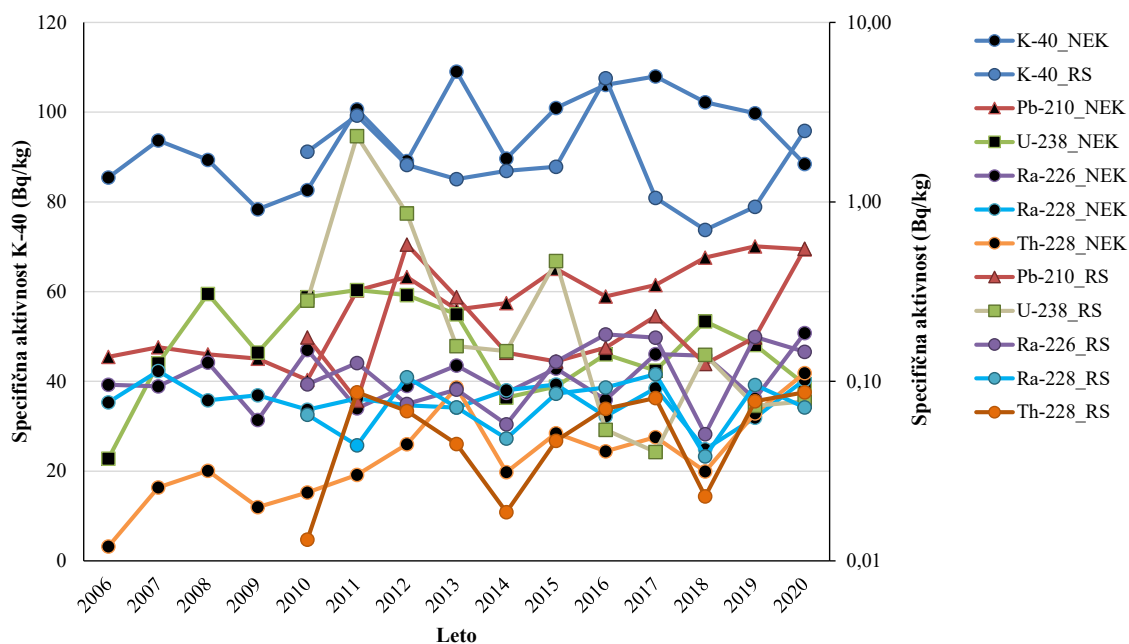
Od naravnih radionuklidov (brez K-40) k letni efektivni dozi zaradi zaužitja hrane največ prispeva Pb-210 (77 %). V letu 2020 je bilo v okolici NEK in drugod po Sloveniji največ Pb-210 v listni zelenjavi in žitu. Najmanjše specifične aktivnosti so bile izmerjene v mesu in jajcih (okolica NEK) in sadju (drugod po Sloveniji). V posameznih živilih v okolici NEK je bila najvišja specifična aktivnost Pb-210 izmerjena v blitvi ($2,7 \pm 0,23$) Bq/kg, v živilih, vzorčenih po Sloveniji, pa v ovsu ($1,3 \pm 0,2$) 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

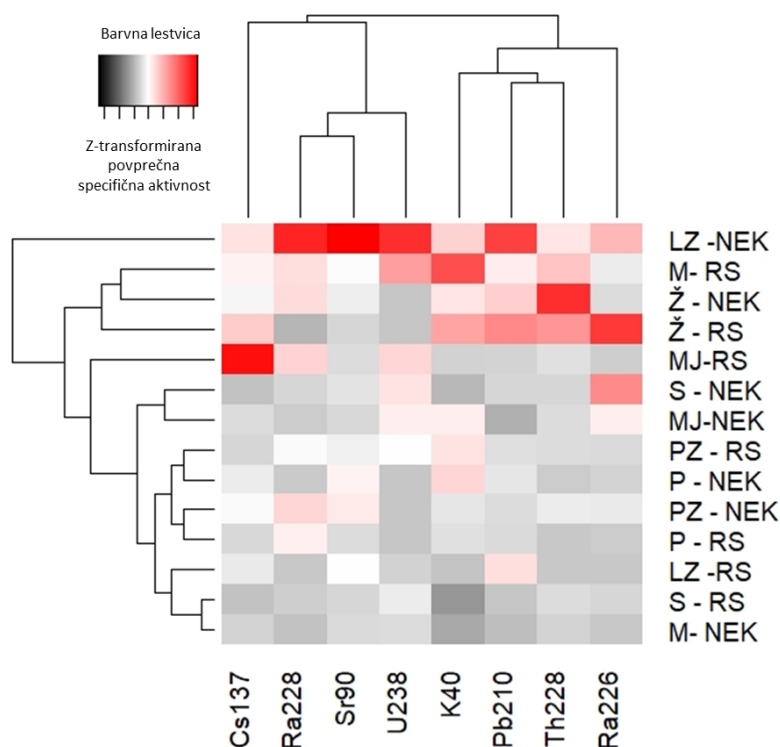
Radionuklid	NEK	Slovenija
Specifična aktivnost (Bq/kg)		
U-238	do 8 (peteršilj)	do 0,7 (divjačina)
Ra-226	do 2,6 (šipek)	do 0,7 (oves)
Ra-228	do 0,8 (peteršilj)	do 0,5 (divjačina)
Th-228	do 1,3 (koruza)	do 0,3 (oves)

Vsebnosti naravnih in umetnih radionuklidov v hrani z leti nihajo. V letu 2020 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 2020 drugod po Sloveniji (slika 6.6).

S programsko opremo »R« [71] smo statistično obdelali podatke specifičnih aktivnosti merjenih radionuklidov v 2020 za živila, vzorčena v okolici NEK in drugod po Sloveniji (RS). Z analizo gruč na podlagi evklidskih razdalj ([71]) 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 listna zelenjava (Pb-210 Ra-228 in U-238) in žita (Th-228), najmanj pa, plodovke, sadje in mleko (NEK). Razlik v vsebnosti radionuklidov v hrani iz okolice NEK in drugod po Sloveniji v večini primerov ni, saj je gručenje izrazitejše glede na vrsto živila kot na mesto vzorčenja.



Slika 6.6: Povprečne izmerjene specifične aktivnosti (Bq/kg) naravnih radionuklidov v hrani, vzorčeni v okolici NEK, po letih od 2006 do 2020, ter drugod po Sloveniji v letih od 2010 do 2020 (specifične aktivnosti K-40 so na levi ordinati, specifične aktivnosti drugih radionuklidov pa na desni)



Slika 6.7: Barvni diagram z dvodimenzionalno analizo gruč na podlagi z-transformiranih povprečnih specifičnih aktivnosti radionuklidov v skupinah živil, vzorčenih v 2020 v okolici NEK in drugod po Sloveniji (MJ – meso in jajca, M – mleko, PZ – podzemna zelenjava, LZ – listnata zelenjava, P – plodovke, S – sadje in vino). Črna barva pomeni vrednosti pod povprečjem, bela povprečne vrednosti, rdeča pa nad povprečjem za posamezni radionuklid.



OCENA UČINKOV

Oceno doznih obremenitev prebivalstva 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)*):

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

Tabela 6.3: Okvirna poraba živil po skupinah na člana gospodinjstva glede na anketo, izvedeno v okolici NEK (2017), in glede na porabo v Sloveniji v letu 2012 [70] ter stopnja samooskrbe v okolici NEK in drugod po Sloveniji.

Živilo	Količina glede na anketo v okolici NEK (kg)	Stopnja samooskrbe (%) v okolici NEK	Količina (kg) Slovenija, SURS	Stopnja samooskrbe (%) v Sloveniji, SURS (2017)
Jajca + meso	34,8	30 (meso)	33,0	81,5 + 90,4
Mleko	81,0	11	54,1	131*
Podzemna zelenjava (krompir)	46,0	55	40,1	49,7
Listna zelenjava	51,0		21,0	38,7
Plodovke	45,0		20,0	
Žito	20,0	19	71,6	63,1
Sadje	90,0	40	21,8	21,3
Σ	368	–	262	–

* pomeni, da je Slovenija samooskrbna z mlekom

Celotna predvidena efektivna doza pri uživanju hrane je vsota prispevkov doz ob zaužitju posamezne vrste hrane. Podatki za letno porabo posamezne skupine živil so prikazani v tabeli 6.3. Temeljijo na povprečni količini nabavljenih živil in pijač na člana gospodinjstva, ki jo je pripravil Statistični urad Republike Slovenije za leto 2012. V letu 2017 smo izvedli tudi anketo porabe posamezne skupine živil med ljudmi, ki živijo v bližnji okolici NEK in ki tam pridelujejo hrano. Anketirali smo 47 ljudi. Ugotovitve so zbrane v tabeli 6.3. Glede na anketo prebivalci v okolici NEK zaužijejo znatno manj žita, več mleka, listne zelenjave, plodovk in sadja od povprečnega prebivalca v Sloveniji. Količina zaužitih jajc in mesa je primerljiva. Podatki iz tabele 6.3 so bili osnova za izračun doz, prejetih tako v okolici NEK kot drugod po Sloveniji, pri čemer so bile upoštevane povprečne specifične aktivnosti živil posamezne skupine, ki sta jih izmerila IJS ali ZVD. 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 (na podlagi podatkov vzetih iz povprečne porabe gospodinjstva v RS) uživa hrano s celotnega območja Slovenije. Efektivne doze v okolici NEK smo tako izračunali na podlagi ankete porabe posameznih živil, izvedene v 2017, doze iz območij drugod po Sloveniji pa na podlagi porabe na člana gospodinjstva v 2012. Pokritost domače proizvodnje hrane s potrošnjo, tj. stopnja samooskrbe, je v Sloveniji za živalske proizvode precej višja kot za rastlinske proizvode (tabela 6.3). Po podatkih o rabi zemljišč in stopnji samooskrbe v Sloveniji ter na podlagi izvedene ankete lahko predvidevamo, da tudi

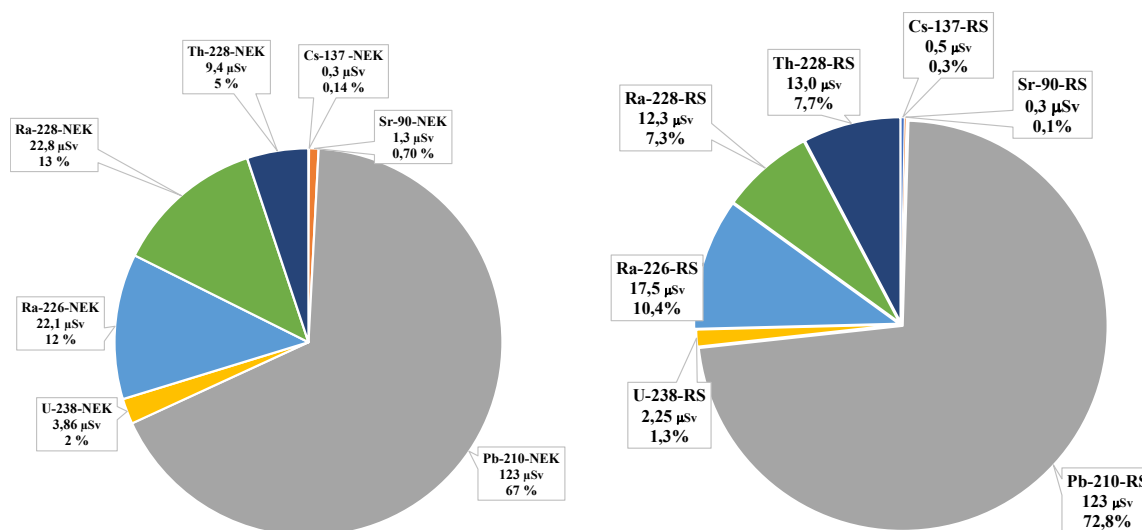


prebivalci na krško-brežiškem območju večino hrane (predvsem mesa, žita in mleka) kupijo. Kupljena hrana tako prihaja iz drugih območij v Sloveniji oziroma iz uvoza (večji del). Republiški program nadzora radionuklidov v hrani predvideva vzorčenje hrane, pridelane v Sloveniji, medtem ko hrana, ki prihaja 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 2020 v okolici NEK (183 ± 9) μSv , skupaj s K-40 pa (359 ± 11) μSv . Razlike v skupnih dozah se pojavljajo predvsem zaradi razlik v dozah, prejetih zaradi naravnih radionuklidov, kot so K-40, Pb-210, U-238 in Ra-228, dodatno pa še iz vsote porabe živil v posameznih skupinah živil. Drugod po Sloveniji je bila efektivna doza odrasle osebe zaradi zaužitja brez K-40 (169 ± 10) μSv , s K-40 pa (346 ± 14) μSv . V nadaljevanju obravnavamo doze, izračunane po skupinah živil.

Prispevki posameznih radionuklidov k efektivni dozi za odraslo osebo v letu 2020 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 (67 %), najmanj pa Sr-90 (0,7 %) in Cs-137 (0,1 %). Drugod po Sloveniji (slika 6.8 desno) je k skupni efektivni dozi brez K-40 največ prispeval Pb-210 (73%), in najmanj Sr-90 (0,1 %) in Cs-137 (0,3 %). Deleži radionuklidov so primerljivi z vzorčenji iz preteklih let.



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 2020; *desno:* drugod po Sloveniji v letu 2020. 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 2020 183 μSv , drugod po Sloveniji pa 169 μSv .

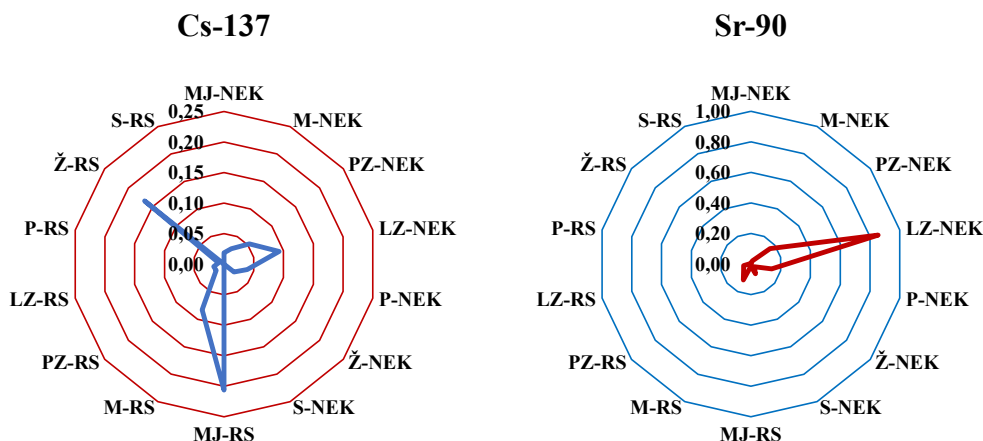
Umetni radionuklidi

Skupna letna efektivna doza zaradi vsebnosti Cs-137 v hrani je bila tako v letu 2020 v okolici NEK 0,3 μSv drugod po Sloveniji pa 0,5 μSv . Skupna efektivna doza zaradi vsebnosti Sr-90 v hrani pa je bila v letu 2020 v okolici NEK 1,3 μSv in drugod po Sloveniji 0,2 μSv . V okolici NEK je bil delež letne efektivne doze zaradi umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 pri uživanju hrane 0,8 % (0,1 % od Cs-137 in 0,7 % od Sr-90) od celotne prejete efektivne doze (183 μSv brez K-40). Drugod po Sloveniji je bil delež letne efektivne doze zaradi umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 pri uživanju hrane 0,4 % (0,3 % od Cs-137 in 0,1 % od Sr-90) glede na celotno prejeto efektivno dozo (169 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 (1,6 μSv in drugod po Sloveniji 0,7 μSv), je največ prispevalo prehranjevanje z listno zelenjavo (Cs-137, Sr-90), mesom (Cs-137) in mlekom (Sr-90) (slika 6.9).

V zračnih izpustih, ki jih v okolje spušča NEK, v letu 2020 Cs-137 in Sr-90 sta bili njuni aktivnosti zelo majhni (2 kBq, 2,5 kBq). V vzorcih jabolk in hrušk iz neposredne bližine NEK (sadovnjak ob ograji) je bila vsebnost Cs-137 v letu 2020 < 0,001 Bq/kg, vsebnost Sr-90 pa < 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 2020 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 2020 v živilih niso bili detektirani.



Slika 6.9: Izračunane efektivne doze (μSv) za odraslo osebo 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 2020 1,6 μSv (Cs-137: 0,3 μSv , Sr-90: 1,3 μSv), drugod po Sloveniji pa 0,7 μSv (Cs-137: 0,5 μSv , Sr-90: 0,2 μSv).

Naravni radionuklidi

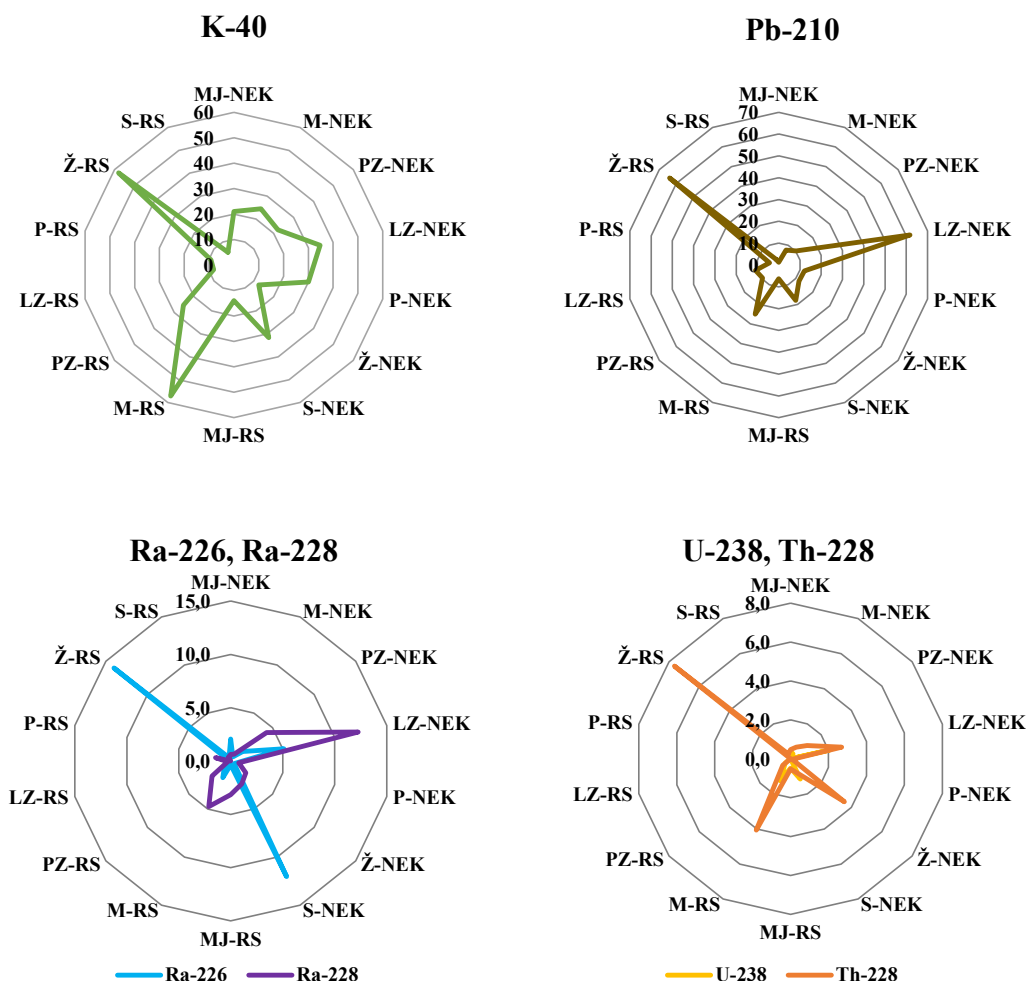
V splošnem k skupni efektivni dozi zaradi vsebnosti naravnih radionuklidov največ prispeva prehranjevanje z žiti, listno zelenjavo in mlekom (slika 6.10), najmanj pa s plodovkami, mesom in jajci.

Skupna letna efektivna doza zaradi K-40 je bila v letu 2020 v okolici NEK in drugod po Sloveniji 177 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 $3 \mu\text{Sv}$ na leto na Bq/kg je po podatkih UNSCEAR letna doza, ki jo prejmejo odrasli zaradi K-40 $165 \mu\text{Sv}$, letna doza, ki jo prejmejo otroci, pa $185 \mu\text{Sv}$. K vnosu K-40 v telo je v letu 2020 največ prispevalo prehranjevanje z žiti, najmanj K-40 pa je bilo v mesu in jajcih (slika 6.10).

Skupna letna efektivna doza zaradi Pb-210 v hrani je bila v letu 2020 v okolici NEK in drugod po Sloveniji $123 \mu\text{Sv}$, kar je v okviru razsutja podatkov primerljivo z referenčno vrednostjo UNSCEAR [53] in meritvami iz preteklih let. Prejeta efektivna doza v okolici NEK zaradi Pb-210 se z leti močno spreminja, od $6,8 \mu\text{Sv}$ v letu 2006 do $123 \mu\text{Sv}$ v letu 2020. Pb-210 lahko prehaja iz tal v rastline preko koreninskega sistema, vendar se večina zadrži v koreninah in le slabo prehaja v nadzemne dele, sploh pa v semena in plodove ([68]). 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 2020 je razvidno, da je k letni dozi zaradi Pb-210 v hrani v okolici NEK največ prispevalo zaužitje listne zelenjave, drugod po Sloveniji pa zaužitje žit (slika 6.10).



Slika 6.10: Izračunane efektivne doze za odraslo osebo 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 2020



Efektivna doza zaradi vsebnosti U-238 v hrani je bila v letu 2020 v okolici NEK 3,9 μSv , drugod po Sloveniji pa 2,2 μSv . K tej dozi je največ prispevalo prehranjevanje z žiti in mlekom (slika 6.10). Efektivna doza zaradi vsebnosti Ra-226 v hrani je bila v okolici NEK 22,1 μSv , drugod po Sloveniji 17,5 μSv , zaradi vsebnosti Ra-228 pa je bila v okolici NEK 22,8 μSv in drugod po Sloveniji 12,3 μSv . K letni dozi, prejeti zaradi Ra-226 in Ra-228, je največ prispevalo prehranjevanje z listno zelenjavo, žiti in sadjem (slika 6.10). Ra-226 in Ra-228 sta bila skoraj v vseh hranilih v okolici NEK nad mejo kvantifikacije, kar je v skladu z radiološkimi nadzornimi meritvami NEK v preteklih letih in primerljivo z vsebnostmi Ra-226 in Ra-228 v hrani drugod po Sloveniji. Efektivna doza zaradi vsebnosti Th-228 v hrani v okolici NEK je bila 9,4 μSv , drugod po Sloveniji pa 13,0 μSv , vendar je prispevek Th-228 k skupni efektivni dozi zaradi kratkega razpolovnega časa in izjemno nizkih vsebnosti z biološkega vidika zanemarljiv. K letni dozi, prejeti zaradi Th-228, je največ prispevalo prehranjevanje z žiti (slika 6.10).

C-14

V izpustih NEK sta tudi C-14 in tritij, ki se v ekosistemih sicer pojavljata kot naravna radionuklida. Nastajata namreč v zgornjih plasteh atmosfere v jedrskih reakcijah zaradi kozmičnega sevanja. C-14 se v rastline vgrajuje v procesu fotosinteze, v živalski in človeški organizem pa prehaja z uživanjem predvsem rastlinske hrane. V letih od 2006 do 2020 so potekale meritve C-14 tako v izpustih kot bioloških vzorcih, zbranih v okolici NEK, analize so bile opravljene na IJS. Vzorčenje koruze in pšenice, je bilo opravljeno v juliju in v septembru. Efektivna doza zaradi prisotnosti C-14 v hrani je bila v okolici NEK (na razdalji do 1 km od osi reaktorja) ocenjena na $(14,85 \pm 0,51) \mu\text{Sv}$, na kontrolni točki v Dobovi, kjer učinka NEK ni, pa na $(14,80 \pm 0,62) \mu\text{Sv}$, kar je primerljivo v okviru relativne merske negotovosti (1,5 %) in naravne variabilnosti. Ocenjena doza ($14,80 \mu\text{Sv}$) je prispevek naravnega C-14 in C-14 zaradi jedrskih poskusov v preteklosti, v razmerju 40 % proti 60 % [72]. Ocenjena letna efektivna doza zaradi C-14 iz NEK je $(0,05 \pm 0,81) \mu\text{Sv}$.

Efektivni dozi v okolici NEK in v Dobovi sta izračunani glede na podatek, da povprečen prebivalec 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)* [9], kjer je privzeto 250 kg, če masa in sestava zaužite hrane za referenčno skupino prebivalstva 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 2020 je bilo opravljenih 32 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 RS.



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 2020, brez upoštevanja K-40, 183 μSv , z upoštevanjem K-40 pa 359 μSv . Največji delež k skupni efektivni dozi zaradi zaužitja hrane, brez upoštevanja K-40, prispevajo naravni radionuklidi (99 %): Pb-210 (67,3%), Ra-228 (12,5 %), Ra-226 (12,1 %), Th-228 (5,1 %), in U-238 (2,1 %). Največji delež k celotni dozi 359 μSv je prispevalo prehranjevanje z žiti in listno zelenjavo. Omenjeni rezultati so povezani z relativno večjo porabo kot pri drugih živilih, glede na anketo porabe, ki je bila izvedena v 2017 v okolici NEK. Glavni vir vnosa Cs-137 in Sr-90 je bila v letu 2020 listna zelenjava.

Deleža letnih efektivnih doz glede na celotno prejeta efektivno dozo zaradi umetnih radionuklidov Cs-137 in Sr-90 pri uživanju hrane sta bila 0,1 % in 0,7 % (0,8 % skupne doze), kar je z biološkega vidika zanemarljivo [75]. 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. Manjšanje vsebnosti Cs-137 je, glede na rezultate meritev specifične aktivnosti v hrani po Sloveniji v prejšnjih letih in glede na podatke iz diplomskega dela [67], manj izrazito v gozdnih ekosistemih.

Med detektiranimi radionuklidi v zračnih izpustih NEK so tudi drugi umetni radionuklidi, ki pa jih v hrani v letu 2020 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 2020 v okolici NEK zaradi umetnih radionuklidov glede na celotno efektivno dozo zaradi vseh radionuklidov v hrani 0,7-odstoten, po Sloveniji pa 1,2-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 2020 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 deležu samooskrbe 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 iz leta 2017 pa 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.





7 REFERENCE

- [1] Nadzor radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško, Poročilo za leto 2019, interna oznaka 5/2020, Ljubljana, april 2020
- [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, Table 5.9.1, 2016–2020
- [6] Poročilo o meritvah plinastih efluentov v letu 2020, št. poročila 66/2020, IJS, januar 2021
- [7] Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski (ZVISJV-1), Uradni list RS, št. 76/17
- [8] Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti (JV10), Uradni list RS, št. 27/18
- [9] Uredba o mejnih dozah, referenčnih ravneh in radioaktivni kontaminaciji (UV2), Uradni list RS, št. 18/18
- [10] Uredba o območjih omejene rabe prostora zaradi jedrskega objekta in o pogojih gradnje objektov na teh območjih (UV3), Uradni list RS, št. 78/19
- [11] Pravilnik o posebnih zahtevah varstva pred sevanji in načinu ocene doz (SV5), Uradni list RS, št. 47/18
- [12] Poročila o obsevanosti prebivalcev Slovenije, ZVD Zavod za varstvo pri delu, 2000–2020
- [13] Poročilo o izvajanju monitoringa radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v obdobju oktober–december 2020, ZVD Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20200007-D-MG, januar 2021
- [14] Poročilo o izvajanju monitoringa radioaktivnosti živil v Republiki Sloveniji v obdobju oktober–december 2020 – 3. faza (sklop 1), ZVD Zavod za varstvo pri delu, LMSAR-20200008-3-MP, januar 2021
- [15] Letno poročilo o opravljenih meritvah aktivnosti sevalcev gama in beta, Monitoring radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji za leto 2019, IJS, 89/2019, januar 2020
- [16] Ovrednotenje merskih podatkov o radioaktivnosti v življenjskem okolju v Republiki Sloveniji v letu 2020, IJS-DP-13436, januar 2021
- [17] Poročilo o meritvah radioaktivnosti pitne vode v letu 2020, št. poročila 42/2020, IJS, oktober 2020
- [18] Poročilo o rezultatih meritev vsebnosti C-14 v bioloških vzorcih, št. poročila 64/2020, IJS, februar 2021
- [19] I. Krajcar Bronić, Izvješće o mjerjenjima aktivnosti ^{14}C u okolišu Nuklearne elektrane Krško tijekom 2019. godine, LNA-5/2020, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 10. 2. 2020
- [20] I. Krajcar Bronić, Izvješće o mjerjenjima aktivnosti ^{14}C u Savi i ribi tijekom 2020. godine, LNA-1/2021, Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti, Zagreb, Hrvatska, 23. 2. 2021
- [21] 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



- [22] Izpostavitve prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NE Krško v reko Savo, IJS-DP-8801 (2003)
- [23] Izpostavitve referenčne skupine prebivalcev sevanju zaradi tekočinskih izpustov NEK v reko Savo – Nova referenčna lokacija, IJS-DP-10114 (2009)
- [24] Samo Škrlec, Hidroelektrarne na Spodnji Savi, d.o.o., sporočilo po elektronski pošti, 9. 4. 2020
- [25] ICRP Publication 124, Protection of the Environment under Different Exposure Situations, Ann. ICRP 43(1), 2014
- [26] 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
- [27] IAEA Safety Guide 427, Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities, Draft safety guide DS427, 2016
- [28] https://www.irs.fr/EN/newsroom/News/Pages/20200505_Fires-in-Ukraine-in-the-Exclusion-Zone-around-chernobyl-latest-news-and-consequences.aspx
- [29] C. Kunz, Carbon-14 discharges at three light-water reactors, Health Physics, 49 (1985), 25–35
- [30] 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
- [31] Handbook of Parameter Values for Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater environment, IAEA TRS no. 472
- [32] 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
- [33] T. Petrovič, Določitev referenčnih aktivnosti radionuklida K-40 v različnih vzorcih, magistrsko delo, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana, avgust 2010
- [34] A. Kovačič et al., Strokovne podlage za razglasitev ogroženosti podzemne vode v Republiki Sloveniji, 2002
- [35] R. Jamnik, Matematična statistika, Državna založba Slovenije, 1980
- [36] James R. Arnold, H. Ali Al-Salih, Science 01, 121 (1955) 3144, 451–453, DOI: 10.1126/science.121.3144.451
- [37] M. Yoshimori, Production and behavior of beryllium 7 radionuclide in the upper atmosphere, Advances in Space Research, 36 (2005), 922–926
- [38] Rozanski K., Gonfiantini R., Araguas – Araguas L., Tritium in the Global Atmosphere: Distribution Patterns and Recent Trends, J. Phys. G, Nucl. Part. Phys., 17 (1991), S523 – S536
- [39] 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
- [40] 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
- [41] 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
- [42] 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



- [43] 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
- [44] 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
- [45] S. Širca, *Verjetnost v fiziki*, DMFA – založništvo, Ljubljana 2016
- [46] 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
- [47] 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
- [48] Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom)
- [49] 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
- [50] Povprečna mesečna koncentracija delcev PM₁₀ v letu 2013, ARSO, januar 2014, http://www.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/podatki/PM10_dec013_slo.pdf
- [51] 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.
- [52] A. Volčanšek, komunikacija po elektronski pošti dne 3. 4. 2018
- [53] 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
- [54] 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
- [55] A. Likar, T. Vidmar, B. Pucelj, Monte Carlo Determination of Gamma-ray Dose Rate with the GEANT System, *Health Physics*, 75 (1998), 165–169
- [56] Matjaž Korun, osebno sporočilo, 2003
- [57] 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
- [58] 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
- [59] T. Sato, Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes, *PLOS ONE*, 11(8): e0160390 (2016)
- [60] 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)
- [61] Program EXPACS, <http://phits.jaea.go.jp/expacs/>
- [62] FRMAC, Assessment manual Tables, Charts, Worksheets, Glossary, references, Volume 2, SAND2003-1072P, Table 3.5



- [63] 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
- [64] F. W. Whicker, Radionuclide transport processes in terrestrial ecosystems. *Radiation research*, 94 (1983), 135–150
- [65] 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
- [66] 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
- [67] P. Zakrajšek, Vsebnost kovin in radionuklidov v gobah na izbranih področjih v Sloveniji, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta, Biotehniška fakulteta, 2014
- [68] 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
- [69] 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
- [70] Statistične informacije, Statistični urad RS, št. 5, 30. julij 2002
- [71] <https://www.r-project.org/>
- [72] <https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-14>
- [73] ARSO podatki, <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>, 2018
- [74] Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, Državna pregledna karta Republike Slovenije DPK250 1: 250000 – 2005
- [75] J. F. Diehl, Radioactivity in food, *Encycl. Food Sci. Nutr.*, Academic Press, 2003, 4903–4911, doi:10.1016/b0-12-227055-x/00997-4.