OŠ SPODNJA ŠIŠKA

LJUBLJANA

RAZISKOVALNA NALOGA

# Merjenje radioaktivnega sevanja

fizika


mentorica:

Lota Gasser Vončina

strokovni mentor:

doc. dr. Tomaž Žagar

raziskovalki:

Katarina Žagar, 9.C

Helena Žagar, 7.B


Ljubljana, marec 2023

Raziskovalna naloga, fizika

Naslov naloge: Merjenje radioaktivnega sevanja

Mentorica: Lota Gasser Vončina

Strokovni mentor: doc. dr. Tomaž Žagar

Raziskovalki: Katarina Žagar in Helena Žagar

Šola: Osnovna šola Spodnja Šiška

Razred: 9.C in 7.B

## KAZALO VSEBINE

1. Zahvala ..... 6
2. Povzetek ..... 7
3. Uvod ..... 8
3.1. Hipoteze ..... 9
3.2. Metode raziskovanja ..... 9
4. Teoretični del ..... 10
4.1. Radioaktivnost in radioaktivno sevanje ..... 10
4.2. Vrste radioaktivnega razpada ..... 10
4.3. Merska enota ..... 12
4.4. Detekcija sevanja ..... 13
4.4.1. Plinski detektor ..... 14
4.4.2. Geiger-Müllerjev števec ..... 14
4.5. Naravno sevanje ozadja ..... 15
4.5.1. Sevanje iz vesolja ..... 16
4.5.2. Radon v bivalnem okolju ..... 17
4.5.3. Pomen različnih doz ..... 19
5. Empirični del ..... 22
5.1. Izvedba meritev ..... 22
5.2. Umerjanje ..... 23
5.3. Meritev radioaktivnega sevanja ..... 27
5.4. Zajetje radonovih potomcev ..... 32
6. Zaključki in razprava ..... 35
6.1. Povzetek rezultatov ..... 35
6.2. Potrjevanje zastavljenih hipotez ..... 37
6.3. Razprava ..... 38
7. Seznam virov in literature ..... 40

## KAZALO SLIK

Slika 1. Shema poteka radioaktivnega razpada. ..... 10
Slika 2. Prodornost sevanja alfa (α), beta (β) in gama (γ). ..... 11
Slika 3. Princip delovanja plinskih detektorjev. ..... 14
Slika 4. Delovanje Geiger-Müllerjevega števca. ..... 15
Slika 5. Polarni sij, viden s površja Zemlje. ..... 16
Slika 6. Razpadna veriga urana. ..... 17
Slika 7. Radonski zemljevid Slovenije. ..... 19
Slika 8. Meje prejetih doz glede na nevarnost za človeka. ..... 20
Slika 9. Detektor GQ GMC-300E. ..... 22
Slika 10. Priprava na meritev na dvorišču pred družinsko hišo v Šiški (Ljubljana). Detektor sva za čas meritve fiksno pritrdili. ..... 23
Slika 11. Slika merilne postaje za Bežigradom (levo) in na Krvavcu (desno). ..... 23
Slika 12. Prižiganje detektorja na vrhu Krvavca (levo) in pritrditev nahrbtnika z detektorjem na ograjo (desno). ..... 26
Slika 13. Postavljanje detektorja v klet naše hiše (levo) in priključitev detektorja na računalnik (desno). ..... 32
Slika 14. Vata, še vedno pritrjena na konec cevi sesalca, je pritrjena tik ob detektor, ki nato izmeri, kako se dozna hitrost spreminja s časom. ..... 32
Slika 15. Delci iz zraka, ki so se zaradi sesanja nabrali na vati (levo), in posamezne plasti vate (desno). ..... 33

## KAZALO TABEL

Tabela 1. Doza sevanja, ki smo ji izpostavljeni ob različnih dogodkih. ..... 21
Tabela 2. Zbrani rezultati vseh opravljenih meritev dozne hitrosti. ..... 35

## KAZALO GRAFOV

Graf 1. Meritev dozne hitrostiv bližini merilne postaje za Bežigradom (Ljubljana), 20.–23.12.2022. ..... 24
Graf 2. Meritev dozne hitrostina vrhu Krvavca, 28.12.2022. ..... 25
Graf 3. Uradne meritve radioaktivnega sevanja ozadja, Krvavec, 28.12.2022..... 25
Graf 4. Uradne meritve radioaktivnega sevanja ozadja, Bežigrad, 28.12.2022. .... 26
Graf 5. Meritev dozne hitrosti v pritličju družinske hiše v Šiški (Ljubljana), 13.–19.11.2022. ..... 27
Graf 6. Meritev dozne hitrosti na podstrešju družinske hiše v Šiški (Ljubljana), 24.–27.12.2022. ..... 28
Graf 7. Meritev dozne hitrosti na dvorišču pred družinsko hišo v Šiški (Ljubljana), 19.–20.12.2022. ..... 28
Graf 8. Meritev dozne hitrosti v kleti družinske hiše v Šiški (Ljubljana), 19.–20.11.2022. ..... 29
Graf 9. Meritev dozne hitrosti v učilnici v 2. nadstropju OŠ Spodnja Šiška (Ljubljana), 3.4.2023. ..... 30
Graf 10. Meritev dozne hitrosti v kletni učilnici na OŠ Spodnja šiška (Ljubljana), 3.–4.4.2023. ..... 30
Graf 11. Meritev dozne hitrosti v pisarni ravnatelja OŠ Spodnja šiška (Ljubljana), 4.4.2023. ..... 31
Graf 12. Meritev dozne hitrosti v Kranju (modra barva) in v rovih pod Kranjem (rdeča barva), 19.11.2022. ..... 31
Graf 13. Meritev dozne hitrosti v kleti družinske hiše v Šiški (Ljubljana) z namenom lovljenja radonovih potomcev, 07.–08.12.2022. ..... 34
Graf 14. Opazovanje razpada radonovih potomcev. ..... 34

# 1. ZAHVALA

Zahvaljujeva se učiteljici in mentorici Loti Gasser Vončina, ki naju je vztrajno vodila med pripravo raziskovalne naloge ter naju opominjala na časovne roke. Strokovnemu mentorju in stricu doc. dr. Tomažu Žagarju iz Fakultete za energetiko, Univerza v Mariboru, se zahvaljujeva za usmeritve in literaturo ter, da nama je posodil Geiger-Müllerjev števec, s katerim sva lahko izvajali meritve. Zahvaljujva se tudi svojima staršema, ki sta naju podpirala in nama pomagala.

Katarina in Helena

# 2. POVZETEK

Del radioaktivnega ozadja sta sevanje iz vesolja in geološka sestava tal. Večji del sevanja iz vesolja zaustavi že Zemljino ozračje. Na večjih nadmorskih višinah, na primer v hribih ali v letalu, pa smo bolj izpostavljeni sevanju iz vesolja. Iz kamnin v tleh izhaja plin radon. V razvitem svetu je prav naravni plin radon daleč največji vir naravnega sevanja, ku mu je posameznik izpostavljen.

Na začetku raziskovanja sva postavili štiri hipoteze, ki sva jih nato preverjali s pomočjo tiskanih in spletnih virov ter poskusov z detektorjem sevanja. Kljub temu, da nisva uspeli zelo natančno umeriti detektorja sevanja, sva lahko dokazali hipotezi, da sevanje iz vesolja z nadmorsko višino narašča in da je pod zemljo manj sevanja iz vesolja. Zasnovali sva tudi poskus, s katerim smo doma ulovili radon in njegove potomce ter izmerili njihovo sevanje.

Veseli naju, da v Ljubljani, kjer živiva, ni veliko tveganje radona zaradi geološke sestave tal. Sva pa ugotovili, da je na dvorišču in v okolici naše družinske hiše povečano sevanje zaradi bližine železniške proge in stare ranžirne postaje, kjer so včasih čistili saje in žlindro iz peči lokomotiv v katerih so kurili premog. Pri sežiganju premoga se poveča koncentracija naravnih radioaktivnih delcev. Stalno smo tudi izpostavljeni sevanju iz vesolja, vendar nas pred njim ščiti magnetno polje okoli Zemlje in atmosfera, zato ni nevarno za naše zdravje, poleg tega smo se živa bitja na Zemlji razvila tako, da naša telesa znajo popravljati škodo, ki jo povzročajo tako majhne prejete doze. Naravnega sevanja ozadja se nam torej ni treba bati.

Ključne besede:

Radioaktivno sevanje ozadja, radon v bivalnem okolju, sevanje iz vesolja, Geiger-Müllerjev števec

# 3. UVOD

Naše okolje vsebuje mnogo naravnih radioaktivnih snovi, ki povzročajo naravno sevanje ozadja. Radioaktivnost je prisotna vsepovsod v okolju. V svetu, ki nas obdaja, je torej velika večina snovi radioaktivnih, vključno s trdnimi zemeljskimi materiali (kamnine, zemlja), sladko in morsko vodo ter plini in delci v ozračju. Posledično so radioaktivne tudi rastline, živali in človek [9]. Nekatere izmed radioaktivnih snovi so kratkožive in preidejo v stabilne potomce (atome) v nekaj minutah, urah ali dnevih. Hkrati pa te kratkožive radioaktivne snovi neprestano nastajajo v različnih naravnih procesih. Nekatere snovi pa lahko ostanejo nespremenjene milijone ali milijarde let, kar pomeni, da se obnašajo podobno kot stabilne. Večina dolgoživih radioaktivnih snovi na Zemlji izvira še iz časov pred njenim nastankom.

V tej nalogi je z besedo »sevanje« vedno mišljeno »ionizirajoče sevanje«, ki ga oddajajo radioaktivne snovi in rentgenske naprave. Ostale vrste sevanj (na primer vidna svetloba, infrardeča svetloba, toplota, radijski valovi) ne morejo ionizirati atomov [17]. Na primer ultravijolična svetloba pa ima dovolj visoko energijo, da lahko izbije elektrone iz atomov in molekul.

Kadar govorimo o vsakodnevni izpostavljenosti sevanju, moramo vedeti, katere vire lahko zanemarimo in kateri izmed njih so tako pomembni, da bi bilo treba zaradi njih nekaj ukreniti. V razvitem svetu je plinasti radon daleč največji vir ionizirajočega sevanja, ki mu je posameznik izpostavljen. Običajno je drugi najpomembnejši vir sevanje ozadja in tretji uporaba sevanja v medicini [17]. Veliko ljudi, ki poklicno delajo v okolju s povečanim sevanjem, dobi zaradi radona doma večje doze sevanja kot na svojem delovnem mestu [17]. Nekateri prebivalci v svojem bivalnem okolju prejmejo zaradi radona letne doze sevanja, ki večkrat presegajo priporočene mejne vrednosti za poklicno izpostavljene delavce v medicini in jedrski industriji [19]. Radon povzroči približno 10 % primerov pljučnih rakov, kar pomeni, da je v zadnjih desetih letih zaradi radona zbolelo približno 1400 prebivalcev Slovenije [18].

Ukrepom za zmanjšanje izpostavljenosti radonu se v zadnjem času na mednarodni ravni in v Sloveniji namenja čedalje več pozornosti [19]. Ker tudi na naši šoli poudarjajo prezračevanje v kletnih prostorih, naju je začelo zanimati, kaj sploh radon

je in zakaj je nevaren. Predvsem pa naju je zanimalo, koliko sevanju sva v resnici izpostavljeni.

Ko sva malo več izvedeli o tej temi, sva si postavili naslednja raziskovalna vprašanja:

- Je nivo ionizirajočega sevanja v najini okolici varno?
- Se je sploh smiselno spraševati o sevanju v vsakodnevnem življenju ali je le-to zanemarljivo?
- Bi lahko sami izmerili, kakšno je to sevanje kljub temu, da nimava na razpolago zelo natančne profesionalne opreme?

Iskanje odgovorov se je izkazalo za zahtevno, saj je virov sevanja v bivalnem okolju več in sodelujejo v različnih zapletenih procesih, na katere vpliva veliko dejavnikov.

## 3.1. HIPOTEZE

V raziskovalni nalogi sva postavili naslednje hipoteze:

- Detektor lahko umerimo sami.
- Kozmično radioaktivno sevanje z nadmorsko višino narašča.
- Pod zemljo je manj sevanja iz vesolja.
- Doma se dá uloviti radonove potomce in izmeriti njihovo sevanje.

## 3.2. METODE RAZISKOVANJA

Uporabljali sva naslednje metode raziskovanja:

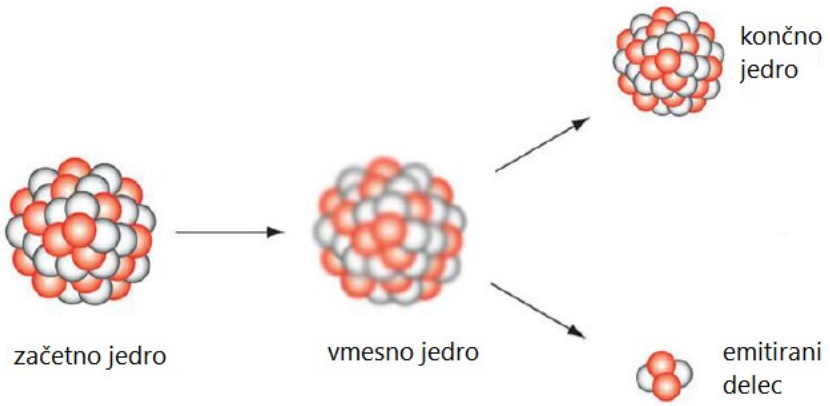
- teoretične metode raziskovanja:
    - poiskali sva informacije v elektronskih in tiskanih virih,
- poskusi z Geiger-Müllerjevim števcem:
    - merjenje sevanja ozadja na Krvavcu in za Bežigradom,
    - merjenje sevanja ozadja doma,
    - merjenje sevanja ozadja v rovih pod Kranjem,
    - merjenje sevanja ozadja doma s sesalcem, ki ima na koncu pritrjeno vato, na kateri se zberejo delci iz zraka,
- analiza pridobljenih podatkov.

# 4. TEORETIČNI DEL

## 4.1. RADIOAKTIVNOST IN RADIOAKTIVNO SEVANJE

Ključna razlika med radioaktivnostjo in sevanjem je, da je radioaktivnost proces, pri katerem radioaktivni elementi sproščajo sevanje, medtem ko je sevanje energija ali energijski delci, ki jih sproščajo radioaktivni elementi [17].

Radioaktivnost je pojav, pri katerem nestabilno atomsko jedro razpade. Pri radioaktivnem razpadu nastane novo jedro, ki je lahko isti kemijski element (ima le drugo število nevtronov) ali drugi element v primeru, ko se spremeni število protonov v jedru. Obenem pa se sprosti še visoko energijski delec ali foton (Slika 1). Snovi z nestabilnimi atomskimi jedri imenujemo radioaktivne snovi [6]. Poznamo približno 100 naravnih radioaktivnih elementov, ostali so pridobljeni umetno (z jedrskimi reakcijami).




*Slika 1. Shema poteka radioaktivnega razpada.*
*(vir: Osnove jedrske fizike, dostopno na https://www.svet-energije.si/)*

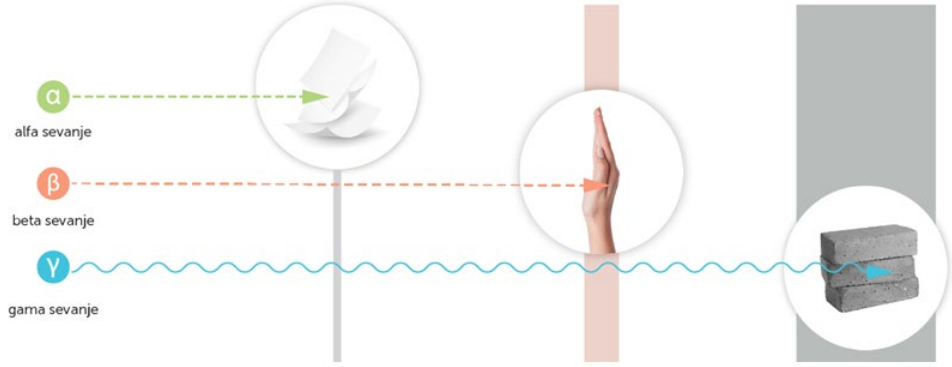
Razpolovna doba posamezne radioaktivne snovi nam pove verjetnost za radioaktivni razpad. V razpolovni dobi razpade polovica jeder posamezne radioaktivne snovi [9].

## 4.2. VRSTE RADIOAKTIVNEGA RAZPADA

Obstaja več vrst radioaktivnega razpada. Aktivna jedra alfa so praviloma težka jedra, pri katerih zaradi močnih elektrostatičnih odbojnih sil med številnimi protoni ni več možno doseči stabilnosti. Tako jedro zmanjša svojo notranjo energijo tako, da odda

delec alfa, to je helijevo jedro [6]. Delci alfa se ustavijo že v zelo tanki plasti snovi, npr. listu papirja ali na površini kože (Slika 2). V zraku imajo doseg nekaj centimetrov.

Aktivna jedra beta so jedra, pri katerih razmerje med številom protonov in nevtronov ne ustreza območju stabilnosti. Imajo torej presežek bodisi nevtronov bodisi protonov. Jedra, ki imajo presežek nevtronov, doživijo razpad beta minus [6]. Pri tem razpadu se število nevtronov v jedru za enega zmanjša, število protonov za enega poveča, iz jedra pa izleti delec beta minus, ki je pravzaprav elektron z veliko kinetično energijo. Poleg tega pri razpadu beta nastane tudi nevtrino, delec brez mase, ki praktično ne reagira s snovjo oziroma okolico. Jedra, ki imajo presežek protonov, razpadejo z beta plus razpadom [6]. So bolj prodorni kot delci alfa. V zraku imajo doseg nekaj metrov, v kovinah nekaj mm (Slika 2).




Slika 2. Prodornost sevanja alfa (α), beta (β) in gama (γ).
*(vir: https://www.esvet.si/radioaktivnost-sevanje)*

Jedro, ki nastane po razpadu alfa ali beta, je zelo pogosto v vzbujenem energijskem stanju. Podobno kot atom preide iz vzbujenega stanja v osnovno stanje in pri tem odda foton vidne, ultravijolične ali rentgenske svetlobe, tudi vzbujeno jedro ni stabilno in običajno zelo hitro preide v osnovno stanje. Višek energije pri prehodu jedra v nižje oziroma osnovno energijsko stanje pa odnese foton, ki izleti iz jedra. Prehod med vzbujenimi stanji jedra se imenuje razpad gama in fotoni, ki pri njem nastanejo, se imenujejo žarki gama. So zelo podobni rentgenskim žarkom, a imajo praviloma precej višjo energijo in so tudi prodornejši [6]. Prav tako so precej bolj prodorni od delcev alfa oziroma beta (Slika 2). Razpad gama je razmeroma najmilejša oblika radioaktivnega razpada, saj se z njim jedro le "ohladi", njegova

notranja sestava pa se ne spremeni. Pri razpadu gama se torej ne spremeni niti število protonov niti število nevtronov.

Na področju fizike jedrskih reaktorjev so zelo pomembni nevtroni, vendar se z nevtronskim sevanjem v naši raziskovalni nalogi ne bova ukvarjali.

## 4.3. MERSKA ENOTA

Pri radioaktivnem viru nas ne zanima toliko, koliko radioaktivnih jeder vsebuje, temveč koliko teh jeder razpade v enoti časa, npr. v sekundi. Vsak razpad je namreč združen z emisijo sevanja in zanima nas, koliko delcev oziroma elektromagnetnega valovanja izseva vir v enoti časa. Število razpadov radioaktivnih jeder v enoti časa se imenuje aktivnost vira. Aktivnost vira je večja, če vir vsebuje več radioaktivnih jeder in če ta hitreje razpadajo [17].

Bekerél (angleško Becquerel, oznaka Bq) je izpeljana enota za merjenje aktivnosti snovi. Določena je kot število razpadov na sekundo. Ker je število razpadov brez dimenzije, je potemtakem Bekerel enak $s^{-1}$ [1]. To je zelo majhna enota, saj ima že manjši vir sevanja aktivnost več milijonov Bq. Viri z aktivnostjo do nekaj deset kBq se uradno ne štejejo za radioaktivne izvore [17]. Na primer, ena banana vsebuje 15 Bq. Odraslo človeško telo med 3000 in 4000 Bq. Bekerel je poimenovan po francoskemu fiziku Henriju Becquerelu [1], ki je za svoje zasluge pri odkritju radioaktivnosti skupaj s Pierrom in Marie Curie leta 1903 prejel Nobelovo nagrado za fiziko. Starejša enota za aktivnost je kiri (oznaka Ci), ki je zelo velika enota (1 Ci = 37.000.000.000 Bq).

Aktivnost radioaktivnega vira nič ne pove o njegovi nevarnosti. Vir sevanja, ki ima aktivnost 100 milijonov Bq, je lahko popolnoma neškodljiv, če je od nas oddaljen 100 metrov, ali pa smrtonosen, če ga pojemo. Za opis nevarnosti sevanja uporabljamo dozo sevanja, ki jo prejme telo. Prejeta doza sevanja nam pove, kolikšno energijo sevanja je absorbiralo določeno tkivo in kolikšna je lahko temu ustrezna biološka škoda [17]. Pri oceni škode, ki jo ionizirajoče sevanje povzroči v tkivu, se upošteva, da so nekatere vrste ionizirajočega sevanja zaradi večje specifične ionizacije bolj škodljive kot druge.

Dozo sevanja merimo v Sievertih (oznaka Sv) in je opredeljena kot verjetnost povzročitve raka in genetske okvare zaradi sevanja. Vse prejete doze, ki so podane v Sievertih so primerljive ne glede na vrsto sevanja (sevanje alfa, beta, gama, nevtronsko ali katero koli drugo ionizirajoče sevanje) [17].

## 4.4. DETEKCIJA SEVANJA

Ionizirajočega sevanja s svojimi čutili ne moremo zaznati, pač pa ga detektiramo oziroma merimo z instrumenti, ki temeljijo na mehanizmih sodelovanja (interakcija) sevanja s snovjo. Za detekcijo se najpogosteje izkoristi ionizacija. Pri ionizirajočem sevanju ločimo dve vrsti delcev, in sicer tiste, ki ionizirajo snov neposredno, ter tiste, ki ionizacijo povzročajo posredno. Med prve sodijo nabiti delci (npr. elektroni oziroma delci beta, protoni, delci alfa in težki ioni), med druge pa fotoni (delci gama ter rentgensko sevanje) in nevtroni [17].

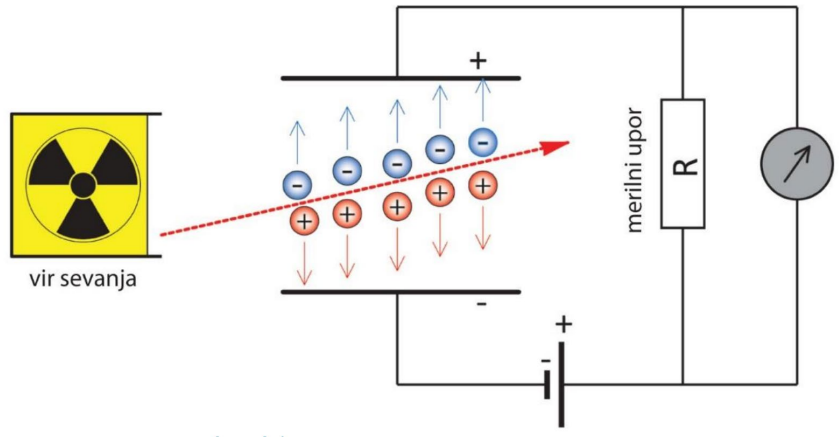
Naprava, v kateri opazujemo ionizacijo, se imenuje detektor sevanja. V nekaterih detektorjih je število izmerjenih pulzov povezano z energijo, ki se je absorbirala v detektorju.

Kadar detektor meri celotno absorbirano energijo (ki je povezana z vplivom sevanja na celice), se imenuje merilnik sevanja ali dozimeter. Dozimetri nam lahko prikažejo prejeto dozo sevanja v enoti Sievert, lahko pa tudi hitrost sevanja, ki nam povejo dozo, ki jo prejmemo v določeni časovni enoti [17].

Dozimetrija je pomembna pri zaščiti pred sevanjem [2].Delavci, ki delajo v bližini ionizirajočega sevanja, nosijo osebni dozimeter med vratom in pasom ter ga menjujejo mesečno. Med delavce, ki so poklicno izpostavljeni ionizirajočim sevanjem spadajo na primer radiološki inženirji, zaposleni v jedrski elektrarnah, stevardese, piloti in delavci v nekaterih turističnih jamah. Povprečna poklicna letna doza pri delavcih, ki nosijo dozimetre v Sloveniji je 0,12 mSv [17]. Mejna doza za poklicno izpostavljene delavce (na delovnem mestu) je 20 mSv na leto. Večje doze sevanja dobijo tudi pacienti pri nekaterih medicinskih preiskavah in zdravljenjih, piloti in stevardese ter delavci v rudnikih, še posebej če ni primerno poskrbljeno za prezračevanje.

### 4.4.1. PLINSKI DETEKTOR

Plinski detektor je v načelu kondenzator, v katerem sevanje ionizira plin. Nastanejo ionski pari: negativni delci (elektroni) se pospešijo proti pozitivni elektrodi (anodi), pozitivni (ioni) pa k negativni elektrodi (katodi). Nastane električni tok, ki ga nato dodatno ojačimo in detektiramo (Slika 3) [6].

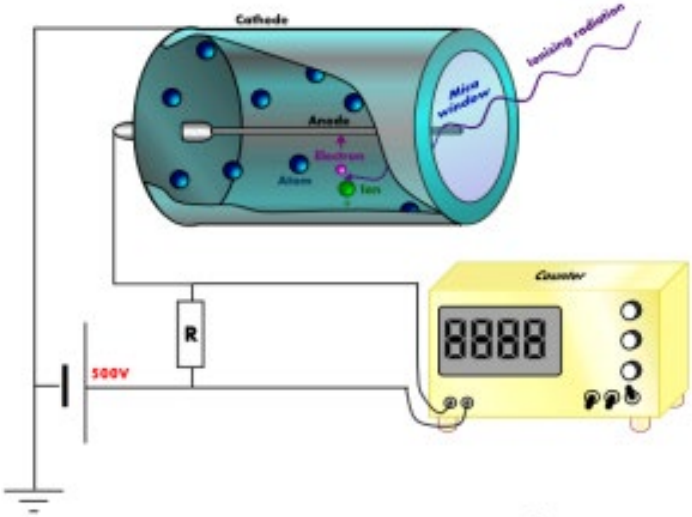



Slika 3. Princip delovanja plinskih detektorjev.
*(vir: Osnove jedrske fizike za mlade genialce, dostopno na https://www.svet-energije.si/upload/files/Osnove%20jedrske%20fizike.pdf)*

### 4.4.2. GEIGER-MÜLLERJEV ŠTEVEC

Geiger-Müllerjev števec je merilnik ionizirajočega sevanja in je posebna vrsta plinskega detektorja. Geiger-Müllerjeva cev je napolnjena z mešanico inertnim plinom (ki v normalnih razmerah ne prevaja električnega toka), kot so helij, neon ali argon [10].

Na njeni sredini je tanka anoda, ki skupaj s katodo – plaščem cevi – tvori valjasti kondenzator (Slika 4). Ko cev preleti visoko energijski delec oziroma visoko energijski foton, se nekaj molekul plina ionizira – njihovi elektroni se ločijo od matičnih atomov, ki postanejo pozitivno nabiti ioni (kationi). Te močno električno polje znotraj kondenzatorja pospeši proti negativno nabiti katodi, iz njih izbite elektrone pa proti anodi. Dobijo zadostno energijo, da med potovanjem ionizirajo še nove plinske molekule in zato nastane večji sunek toka na kondenzatorju. Z Geiger-Müllerjevim števcem ne moremo meriti energije posameznega žarka sevanja [10].




Slika 4. Delovanje Geiger-Müllerjevega števca.
*(vir: http://lpvo.fe.uni-lj.si/fileadmin/files/Izobrazevanje/SEM/Seminarji/Podhraski%20-%20Geigerjev_stevec.pdf)*

Zaradi velikega impulza iz cevi je Geiger-Müllerjev števec razmeroma poceni za izdelavo, saj je kasnejša elektronika močno poenostavljena. Števec torej predstavlja vezje, ki je sposobno šteti omenjene razelektritve Geiger-Müllerjeve cevi. Da cev pravilno deluje, mora biti napetost, na katero je priključena, zadosti visoka. V tem napetostnem območju ena ionizacija, ki jo povzroči delec, zadošča za plazovno ionizacijo celotnega plina v cevi. Geiger-Müllerjeve cevi ločimo glede na vrste ionizirajočega sevanja, ki so jih sposobne zaznavati. Cev z okencem iz kvarca lahko zazna tudi alfa delce, vendar je močno občutljiva na poškodbe. Večina robustnejših cevi zaznava le gama in beta sevanje. Bolj občutljive cevi imajo tudi višjo ceno. Ključni del Geiger-Müllerjevega števca predstavlja prav Geiger-Müllerjeva cev, ki je zaradi zahtevane zrakotesnosti in polnjenja s kompleksnimi plinskimi mešanicami ni ravno enostavno izdelati [10].

## 4.5. NARAVNO SEVANJE OZADJA

Naravno sevanje ozadja imenujemo sevanje, ki izvira iz narave in ki smo mu ljudje v vsakodnevnem, običajnem življenju vedno izpostavljeni. Del naravnega ozadja sta sevanje iz vesolja in geološka sestava tal. Na jakost sevanja ozadja vplivajo tudi letni čas, vreme (sneg in dež) ter deloma tudi zračni tlak. Spremembe sevanja ozadja zaradi naravnih vplivov so običajno veliko pomembnejše kot spremembe, ki so posledica človekovih dejavnosti [17].

V nasprotju z naravnim sevanjem ozadja imenujemo radioaktivno onesnaženje ali radiološko onesnaženje (tudi s tujko kontaminacija) nezaželeno sevanje, ki je posledica človeškega delovanja, predvsem onesnaženje biosfere z radioaktivnimi snovmi. To so radioaktivne snovi na površinah, ali v trdnih snoveh, tekočinah ali plinih (tudi v človeškem telesu) [12]. Njihova prisotnost je seveda nezaželena.

### 4.5.1. SEVANJE IZ VESOLJA

K sevanju ozadja prispeva svoj del tudi sevanje iz vesolja. Kozmični žarki so osnovni delci visokih energij iz vesoljskega prostora. Največji vir so energijski procesi na Soncu (sončev veter), vendar do nas pride tudi sevanje iz virov zunaj našega Osončja [7]. Ker je v vesolju največ vodika, skoraj 90 % kozmičnih žarkov tvorijo protoni (vodikova jedra), približno 9 % helijeva jedra (delci alfa) in približno 1 % elektroni (delci beta) [7]. Izraz »žarki« je v resnici napačno poimenovanje, saj kozmični delci prihajajo posamično in ne v obliki žarka ali snopa delcev.

Večji del kozmičnega sevanja zaustavi že Zemljino ozračje, tako da do površja Zemlje pride le njegov manjši del. Na večjih nadmorskih višinah, na primer v hribih ali v letalu, pa smo bolj izpostavljeni iz vesolja, ki je na večjih nadmorskih višinah intenzivnejše kot na morski gladini [17]. Na polih, kjer je smer magnetnega polja navpična glede na površino Zemlje, lahko nabiti delci vstopijo v Zemljino ozračje.

Kot zanimivost naj omeniva polarni sij, ki nastane, ko električno nabiti delci magnetosfere, v glavnem so to elektroni, lahko tudi protoni (Sončev veter) in nekateri težki ioni (kisik in dušik), pridejo v stik z Zemljinim ozračjem in tam reagirajo ter posledično zasvetijo (Slika 5) [11].

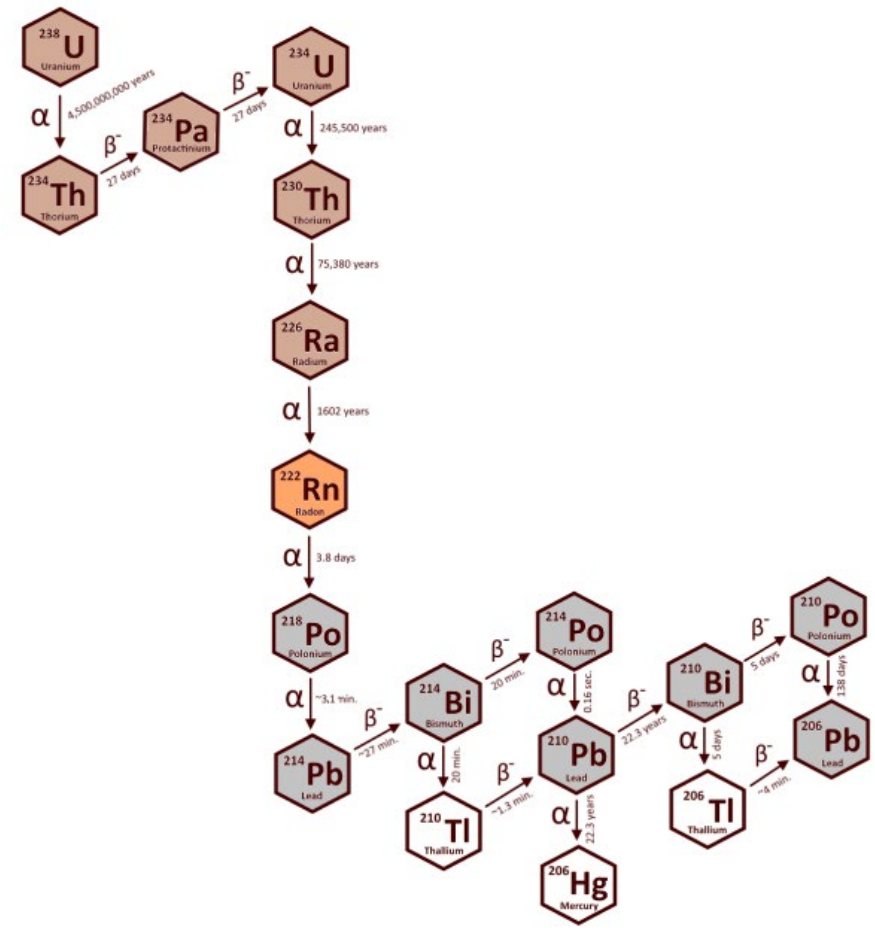
Slika 5. Polarni sij, viden s površja Zemlje.
*(vir: https://sl.wikipedia.org/wiki/Polarni_sij)*

### 4.5.2. RADON V BIVALNEM OKOLJU

V naravi poznamo več zaporedij, po katerih težka nestabilna jedra preko mnogo vmesnih radioaktivnih jeder razpadajo v lažje stabilne oblike [3]. To je tudi eden izmed razlogov, zakaj v našem naravnem okolju nastopa toliko naravnih radioaktivnih snovi.

Radon je kemični element, ki ima v periodnem sistemu simbol Rn in atomsko število 86. Radon je naravni žlahtni plin, brez vonja, barve in okusa in je kot tak za zdravje relativno nenevaren, saj se ga z vdihavanjem absorbira le neznaten delež [3].

Radon je sam že eden izmed produktov v razpadni verigi urana [3]. Slika (Slika 6) prikazuje proces radioaktivnega razpadanja elementov od urana ($^{238}$U) do radija ($^{226}$Ra), ki večinoma razpadajo v zemeljski skorji. Radij z razpadom alfa razpade v radon ($^{222}$Rn), ki ima razpolovno dobo 3,8 dni. Radon nato razpade do polonija ($^{214}$Po) in nazadnje do stabilnega izotopa svinca ($^{206}$Pb) [3].

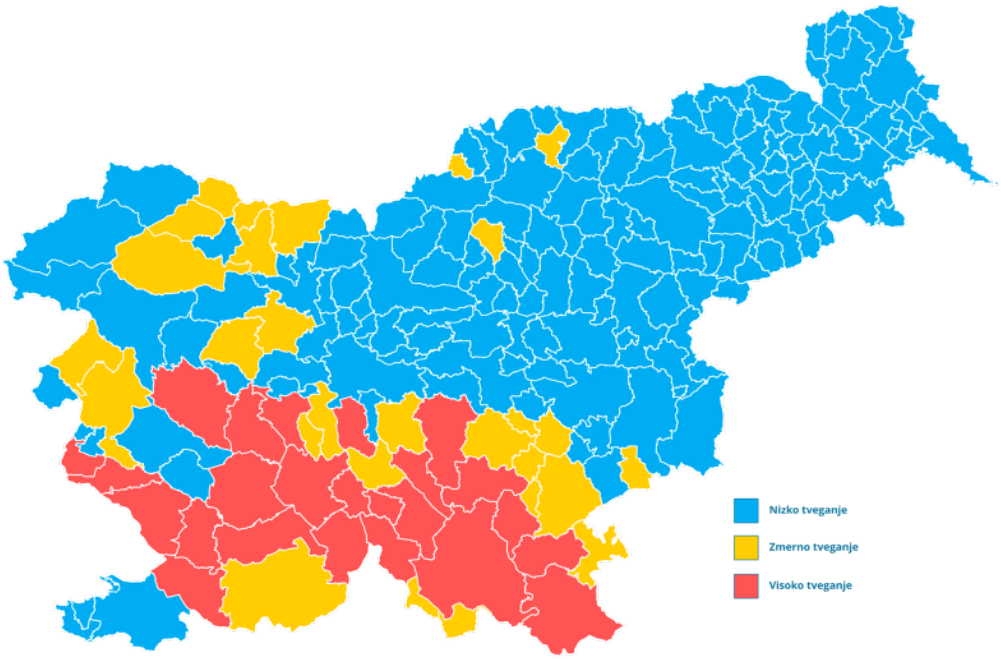



Slika 6. Razpadna veriga urana.
*(vir: Radon in njegovi potomci, dostopno na http://pefprints.pef.uni-lj.si/5379/1/JG_DN.pdf)*

Ostale snovi v razpadnem procesu ostanejo na svojem mestu v zemlji, plinasti radon pa se po nastanku začne dvigovati proti površju. Pri merjenju radioaktivnosti v zraku bomo torej zaznali razpad radona in njegovih razpadnih produktov, medtem ko prisotnost radija in ostalih predhodnikov ne bomo zaznali. Ko radon prispe do površja, se razprši na vse štiri strani neba in se razredči v zraku, tako nam ne povzroča težav [17]. Težave nastanejo, kadar na mestih, kjer radon prihaja iz zemlje, stojijo hiše. Zrak, ki ga dihamo v zaprtih prostorih, lahko vsebuje stokrat ali celo tisočkrat višje koncentracije radona kot zrak na prostem. V prostore prodira predvsem iz zemeljskih tal skozi razne odprtine, kot so jaški, odtoki, špranje ali razpoke. Nekateri gradbeni materiali lahko omejujejo prehajanje radona v prostor, nekateri drugi materiali pa nasprotno celo sami oddajajo radon. Na koncentracijo radona znotraj stavbe pa vpliva še veliko drugih dejavnikov, na primer koncentracija prašnih delcev v zraku, pogostost prezračevanja in nadstropje stavbe, v katerem se nahajamo [3].

Kadar vdihavamo zrak z visoko koncentracijo radona, radonovi atomi vstopajo v naša pljuča. Tam ostanejo tudi vse radioaktivne snovi, ki nastanejo po njegovem razpadu. Zdravju škodljivi so predvsem radonovi kratkoživi potomci s kratko razpolovno dobo, ki nastajajo v razpadnih nizih radona. Produkti pri razpadu radona se odlagajo v dihalnih poteh in poleg manj nevarnih beta in gama delcev oddajajo tudi delce alfa. Delci alfa na krajši razdalji oddajo veliko količino energije in povzročajo neposredne poškodbe, poškodbe organov pa lahko povzročajo maligno transformacijo celic [3]. Radon v povprečju prispeva več kot polovico efektivne doze, ki jo človek prejme od vseh naravnih virov ionizirajočih sevanj [19]. Radon povzroči približno 10 % primerov pljučnih rakov [19], zato se ukrepom za zmanjšanje izpostavljenosti radonu v zadnjem času na mednarodni ravni in v Sloveniji namenja čedalje več pozornosti.

Na podlagi do zdaj izvedenih meritev koncentracij radona v Sloveniji in podatkov o geološki sestavi tal so določena območja, kjer je več radona. Največje tveganje izpostavljenosti radonu je v občinah [19] Bloke, Cerknica, Črnomelj, Divača, Dobrepolje, Dolenjske Toplice, Hrpelje – Kozina, Idrija, Ig, Ivančna Gorica, Kočevje, Komen, Logatec, Loška dolina, Loški Potok, Miren – Kostanjevica, Pivka, Postojna, Ribnica, Semič, Sežana, Sodražica, Vrhnika, Žužemberk (Slika 7).

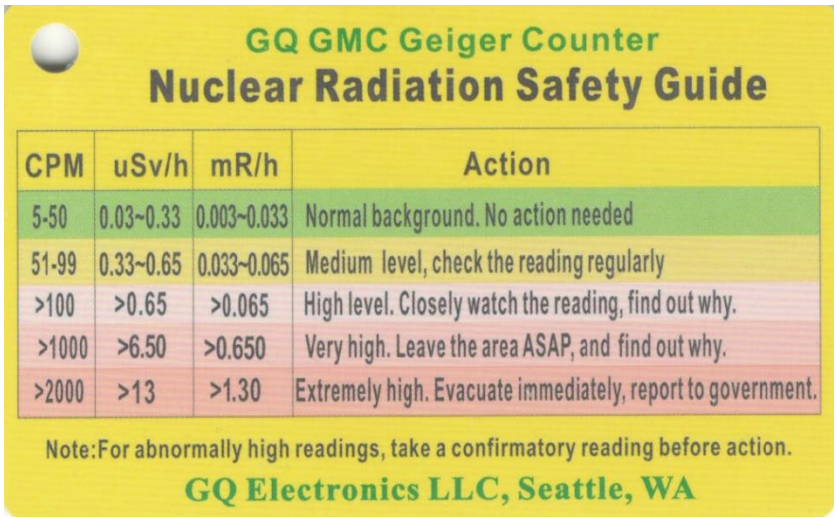



Slika 7. Radonski zemljevid Slovenije.
*(vir: https://www.zvd.si/sevanje-in-dozimetrija/radon/)*

### 4.5.3. POMEN RAZLIČNIH DOZ

Meje dovoljenega sevanja in doze na delovnem mestu so določene v Uredbi o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih, Uradni list RS, št. 49/04, 76/17 – ZVISJV-1 in 18/18 [15] [16]. Za posameznika je v desetem členu napisano, da letna doza iz umetnih virov ne sme presegati 1 mSv na leto dodatno glede na naravno ozadje, ki je v Sloveniji približno 3 mSv na leto (Tabela 1). Zaradi sevanja radona v domovih, pa se ta doza lahko poveča od 1 do 5 mSv na leto. V uredbi je zapisano tudi, da je potrebno v določenih primerih, ko letna doza zaradi radona preseže 6 mSv, upoštevati dodatna pravila in ukrepe, na primer uvesti dodatno prezračevanje prostorov. Meja za poklicno izpostavljenost je 20 mSv.

Detektor GQ GMC-300E (Slika 9) [4], s katerim sva izvajali meritve, je opremljen s priročno kartico, kjer je prikazan pomen različnih doz sevanja. Na tej kartici je označeno, da je običajno sevanja ozadja med 0,03 in 0,33 μSv/h. Pri vrednostih, ki so večje od 0,65 μSv/h, pa je potrebno biti že pozoren in ukrepati.



GQ GMC Geiger Counter

**Nuclear Radiation Safety Guide**

| CPM | uSv/h | mR/h | Action |
|---|---|---|---|
| 5-50 | 0.03~0.33 | 0.003~0.033 | Normal background. No action needed |
| 51-99 | 0.33~0.65 | 0.033~0.065 | Medium level, check the reading regularly |
| >100 | >0.65 | >0.065 | High level. Closely watch the reading, find out why. |
| >1000 | >6.50 | >0.650 | Very high. Leave the area ASAP, and find out why. |
| >2000 | >13 | >1.30 | Extremely high. Evacuate immediately, report to government. |

Note:For abnormally high readings, take a confirmatory reading before action.

GQ Electronics LLC, Seattle, WA

Slika 8. Meje prejetih doz glede na nevarnost za človeka.
*(vir: kartica je priložena detektorju GQ GMC-300E)*

Sevanje je prisotno povsod okoli nas, tako naravno kot umetno [9]. Da sva si lažje predstavljali, kaj pomeni neka prejeta doza sevanja, sva poiskali, kašnim dozam so bili ljudje že izpostavljeni in kaj določena doza pomeni (Tabela 1). Tako sva ugotovili, da prejeta dozo sevanja 10.000 mSv pomeni smrt v tednu dni. Pri CT slikanju trupa pa oseba dobi dozo 15−16 mSv, kar je veliko več, kot je povprečno letno sevanje ozadja. Tako sva ugotovili, da naravno sevanje ozadja ljudem ni nevarno, poleg tega smo se živa bitja na Zemlji razvila tako, da naša telesa znajo popravljati škodo, ki jo povzročajo tako majhne prejete doze sevanja [14].

Tabela 1. Doza sevanja, ki smo ji izpostavljeni ob različnih dogodkih.

| Dogodek | Doza sevanja |
|---|---|
| En odmerek, smrt nastopi v nekaj tednih | 10.000 mSv (enkratna) |
| Tipični odmerek, zabeležen pri tistih delavcih v Černobilu, ki so umrli v enem mesecu | 6000 mSv (enkratna) |
| Posamezna izpostavitev, ki bi v enem mesecu ubil polovico oseb, ki so ji izpostavljeni | 5000 mSv (enkratna) |
| Enkratni odmerek, ki bi povzročil radiacijsko bolezen, vključno s slabostjo in znižanim številom belih krvnih celic | 1000 mSv (enkratna) |
| Ocenjuje se, da akumulirana doza tekom mnogo let pozneje pri 5 % ljudi povzroči smrtnega raka | 1000 mSv (kumulativna) |
| Največja raven sevanja, zabeležena v nesreči elektrarne Fukušima | 400 mSv/h |
| Izpostavljenost prebivalcev Černobila, ki so bili preseljeni po eksploziji leta 1986 | 350 mSv (kumulativna) |
| Za delavce, ki so izpostavljeni sevanju, petletna doza ne sme presegati te meje | 100 mSv na 5 let (kumulativna) |
| Najnižji letni odmerek, pri katerem je v raziskavah ugotovljeno povečano tveganje raka | 100 mSv/leto |
| Astronavt med daljšim bivanjem na vesoljski postaji | 72 mSv (kumulativna) |
| Mejna vrednost za izpostavljene delavce v slovenski uredbi | 20 mSv/leto |
| Doza pri CT: srce | 16 mSv (enkratna) |
| Doza pri CT: trebuh in medenica | 15 mSv (enkratna) |
| Doza pri računalniški tomografiji celega telesa | 10 mSv (enkratna) |
| Letna izpostavljenost letalske posadke, ki leti od New Yorka do Tokia na polarni poti | 9 mSv/leto |
| Povprečna letna doza sevanja, ki jo prejme posameznik v Sloveniji | 3,3 mSv/leto |
| Povprečna letna doza sevanja iz naravnih virov v Sloveniji | 3 mSv/leto |
| Doza pri CT: glava | 2 mSv (enkratna) |
| Doza pri rentgenu hrbtenice | 1,5 mSv (enkratna) |
| Doza sevanje na uro, zaznano zunaj Fukushime 23. marca 2011 | 1,015 mSv/h |
| Doza zaradi sevanja radona v bivalnem okolju | 1 do 5 mSv/leto |
| Mejna vrednost za posameznika iz umetnih virov v slovenski uredbi brez potrebnih dodatnih ukrepov | 1 mSv/leto |
| Doza pri RTG trebušne votline | 0,7 mSv (enkratna) |
| Povprečna letna doza sevanja iz umetnih virov (medicinski viri, CT, varnostni pregledi…), ki jo prejme posameznik v Sloveniji. | 0,7 mSv/leto |
| Doza pri mamografiji rentgenskega slikanja dojk | 0,4 mSv (enkratna) |
| Doza pri kajenju ene škatlice cigaret na dan | 0,36 mSv/leto |
| Doza pri RTG prsnega koša | 0,1 mSv (enkratna) |
| Medcelinski polet z letalom dolg 6 ur | 0,02 mSv (enkratna) |
| Doza pri rentgenu zob | 0,005 mSv (enkratna) |
| Doza pri RTG slikanju okončin | 0,0001 mSv (enkratna) |

*(vira: https://www.theguardian.com/news/datablog/2011/mar/15/radiation-exposure-levels-guide in https://www.i-sevanje.si/#naravna-radioaktivnost-okoli-nas)*

# 5. EMPIRIČNI DEL

## 5.1. IZVEDBA MERITEV

Uporabljali sva detektor GQ GMC-300E (Slika 9) [4]. Navodila za uporabo tega detektorja sva prevedli s programom Google Translate. Nato sva na internetni strani proizvajalca našli povezavo do programa [5], s katerim sva lahko podatke iz detektorja prenesli na računalnik. Grafe sva pripravili s programom Excel (Microsoft Office 2013).

Slika 9. Detektor GQ GMC-300E.
*(vir: https://www.gqelectronicsllc.com/comersus/store/comersus_viewItem.asp?idProduct=4570)*

Za zanesljivost meritev mora biti detektor umerjen. Za detektor, ki sva ga uporabljali, sva vedeli, da ni umerjen. Zato sva meritve primerjali z uradnimi meritvami, ki so objavljene na interaktivni internetni strani Mreže zgodnjega obveščanja [8]. Poiskali sva nama najbližje merilno mesto, in sicer je za Bežigradom (Ljubljana). Tja sva odnesli merilnik in si zabeležili datum in uro, ko je meritev tekla. Podobno sva merilnik odnesli na Krvavec in v obeh primerih svoje podatke primerjali z uradnimi objavljenimi podatki za isti čas.

Med meritvijo je bil detektor vedno pri miru razen med meritvijo v predorih pod Kranjem. Pri meritvah na prostem sva detektor namestili približno v višini pasu (Slika 10). Meritev nisva delali blizu stavb, pod strehami, napušči ali drevjem, saj bi v tem primeru izmerili premajhne vrednosti. Ravno tako nisva meritev izvajali direktno na

tleh, nad lužama in mlakami ali v kotanjah, kamor se steka voda, ker bi bile vrednosti prevelike zaradi radioaktivnega atmosferskega useda.

Slika 10. Priprava na meritev na dvorišču pred družinsko hišo v Šiški (Ljubljana). Detektor sva za čas meritve fiksno pritrdili.
*(vir: družinski arhiv)*

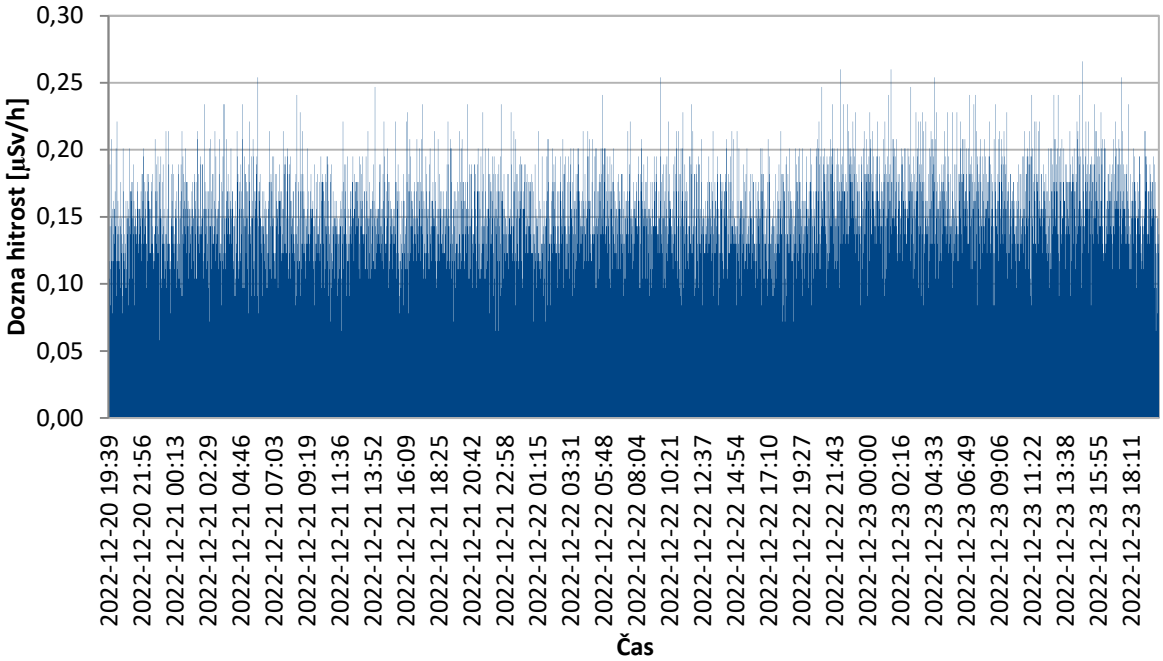
## 5.2. UMERJANJE

Detektor sva odnesli za Bežigrad in na Krvavec v bližino uradnih merilnih postaj [8] (Slika 11) ter meritve primerjali z uradnimi meritvami v istem času, ki so objavljene na interaktivni internetni strani Mreže zgodnjega obveščanja [8].

Slika 11. Slika merilne postaje za Bežigradom (levo) in na Krvavcu (desno).
*(vir: družinski arhiv)*

### *V bližini merilne postaje za Bežigradom*

Povprečna izmerjena dozna hitrost v bližini merilne postaje za Bežigradom v dneh 20.–23.12.2022 je bila 0,123 µSv/h (Graf 1). Uradna meritev za ta dan na merilni postaji Bežigrad je bila 0,083 µSv/h. Najina meritev je torej za 0,040 µSv/h večja od uradne, kar je precej velika napaka in potrjuje najino domnevo, da detektor, ki sva ga uporabljali, že dolgo ni bil umerjen.



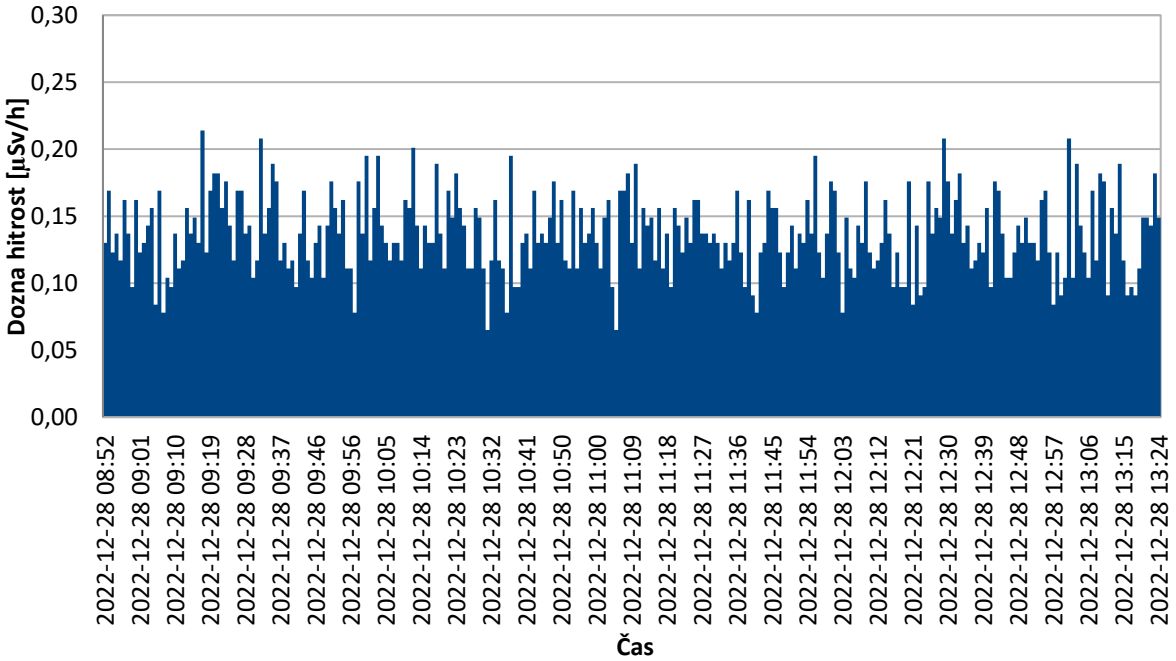

Graf 1. Meritev dozne hitrostiv bližini merilne postaje za Bežigradom (Ljubljana), 20.–23.12.2022.

### *Krvavec*

Uradne meritve iz vrha Krvavca na naš obisk 28.12.2022 povejo povprečno dozno hitrost 0,105 µS/h (Graf 3). Za primerjavo sva dodali graf meritev na postaji za Bežigradom na isti datum (Graf 4), iz katerega je razvidno, da je bila povprečna dozna hitrost 0,077 µS/h. Razliko 0,028 µS/h za Bežigradom pripisujeva manjšemu sevanju iz vesolja zaradi manjše nadmorske višine.

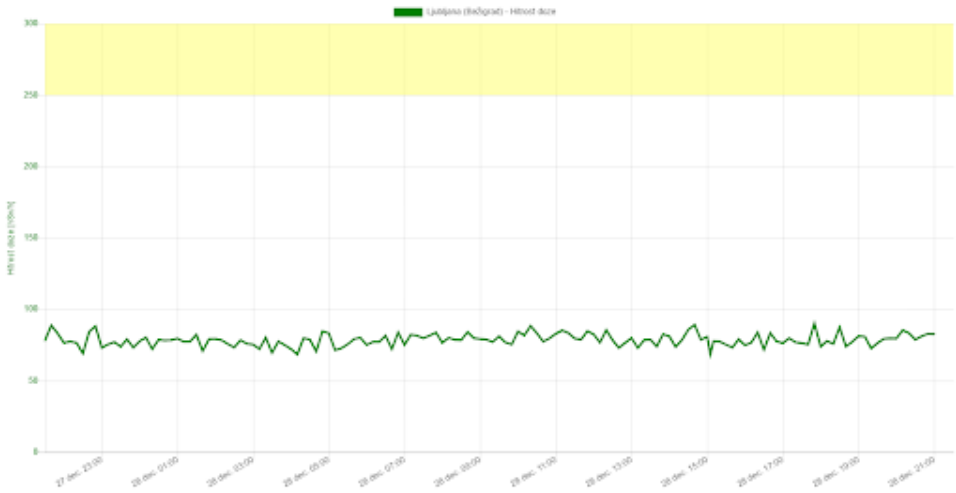
Povprečna izmerjena dozna hitrost pri najinih meritvah na vrhu Krvavca (Slika 12) je 0,136 µSv/h (Graf 2) in je za 0,031 µSv/h večja od uradne. To potrjuje zgornjo

ugotovitev, da detektor, ki sva ga uporabljali, sistematično izmeri previsoke vrednosti. Groba ocena je, da prave vrednosti preceni za približno 0,03–0,04 µSv/h.

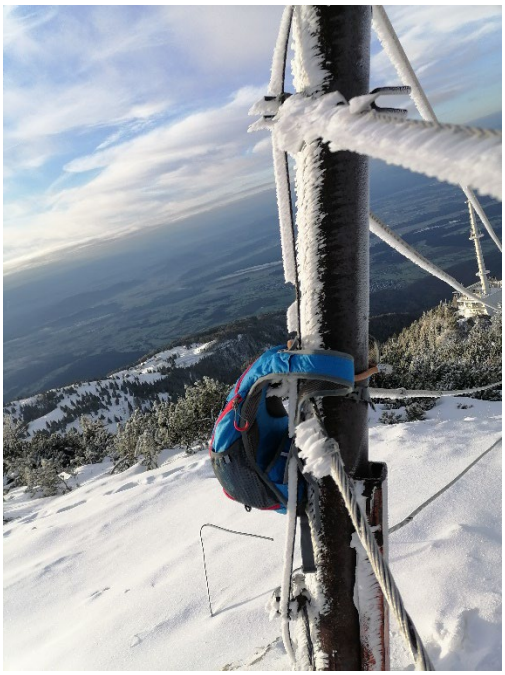



Graf 2. Meritev dozne hitrosti na vrhu Krvavca, 28.12.2022.

Graf 3. Uradne meritve radioaktivnega sevanja ozadja, Krvavec, 28.12.2022.
*(vir: Mreža zgodnjega obveščanja, https://www.radioaktivnost.si/rvo_public/RVO/Map)*



Graf 4. Uradne meritve radioaktivnega sevanja ozadja, Bežigrad, 28.12.2022.
*(vir: Mreža zgodnjega obveščanja, https://www.radioaktivnost.si/rvo_public/RVO/Map)*

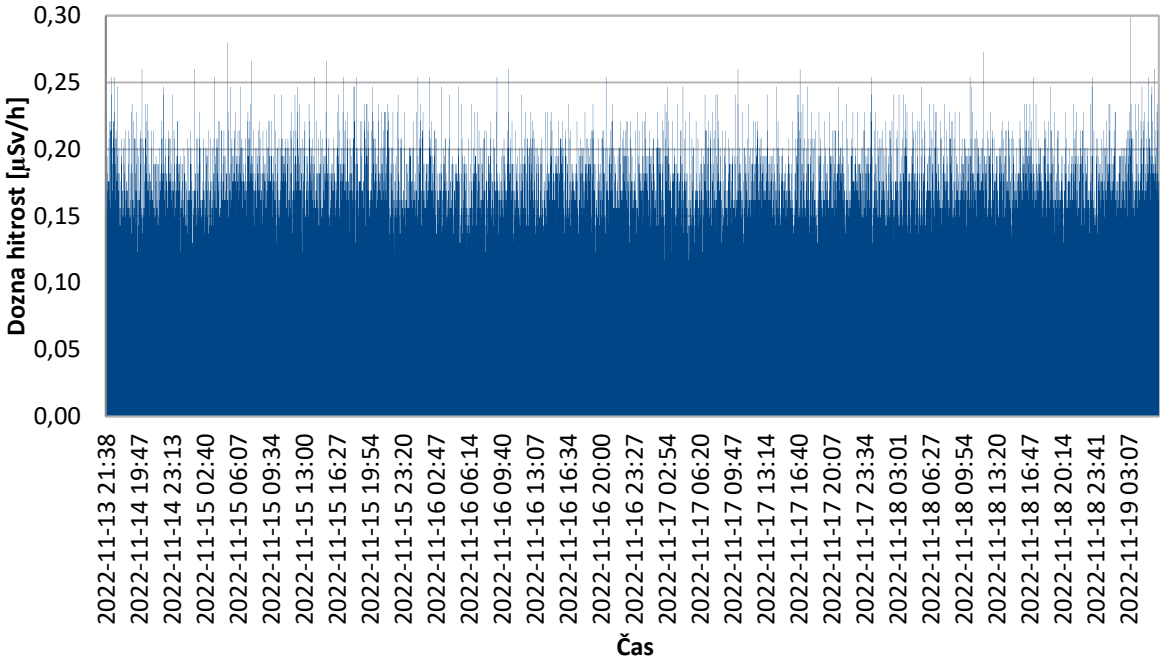


Slika 12. Prižiganje detektorja na vrhu Krvavca (levo) in pritrditev nahrbtnika z detektorjem na ograjo (desno).
*(vir: družinski arhiv)*

## 5.3. MERITEV RADIOAKTIVNEGA SEVANJA

### *Družinska hiša, pritličje*

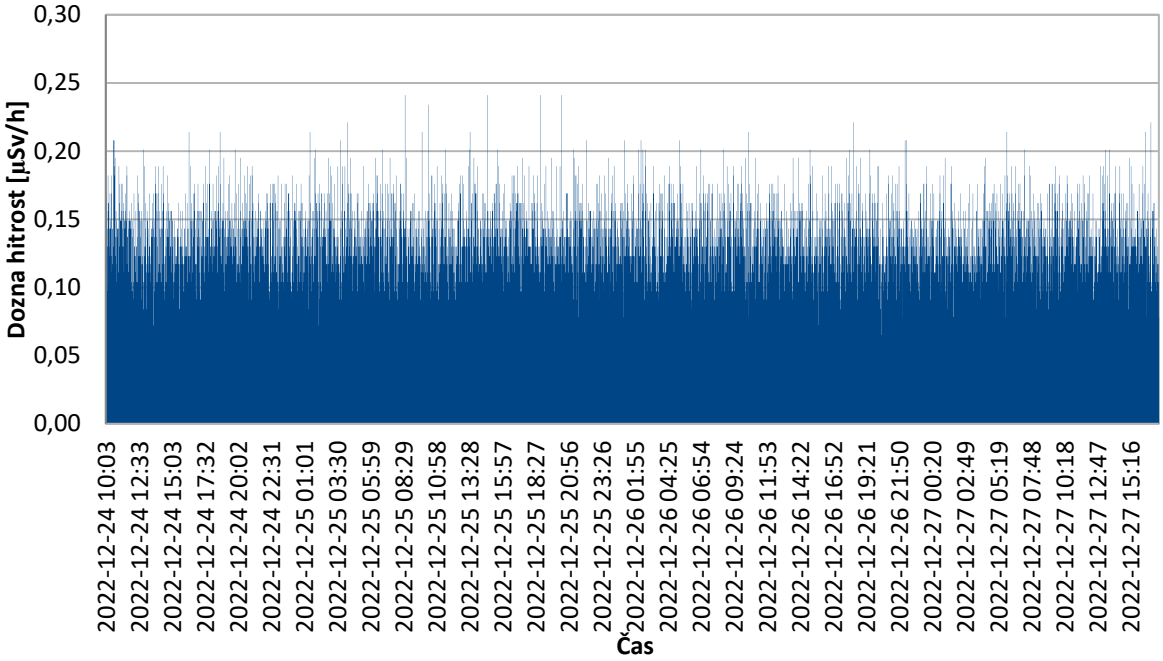
Prvo meritev sva izvedli v stanovanju, kjer živiva. Družinska hiša je iz leta 1898 in je podkletena samo v manj kot tretjini površine. Poleg tega je klet zemeljna (ni obzidana s kakšnim gradbenim materialom) in jo redno prezračujemo z avtomatičnim ventilatorjem. Povprečna izmerjena dozna hitrost v našem stanovanju v dneh 13.–19.11.2022 je bila 0,160 µSv/h (Graf 5).




Graf 5. Meritev dozne hitrosti v pritličju družinske hiše v Šiški (Ljubljana), 13.–19.11.2022.

### *Družinska hiša, podstrešje*

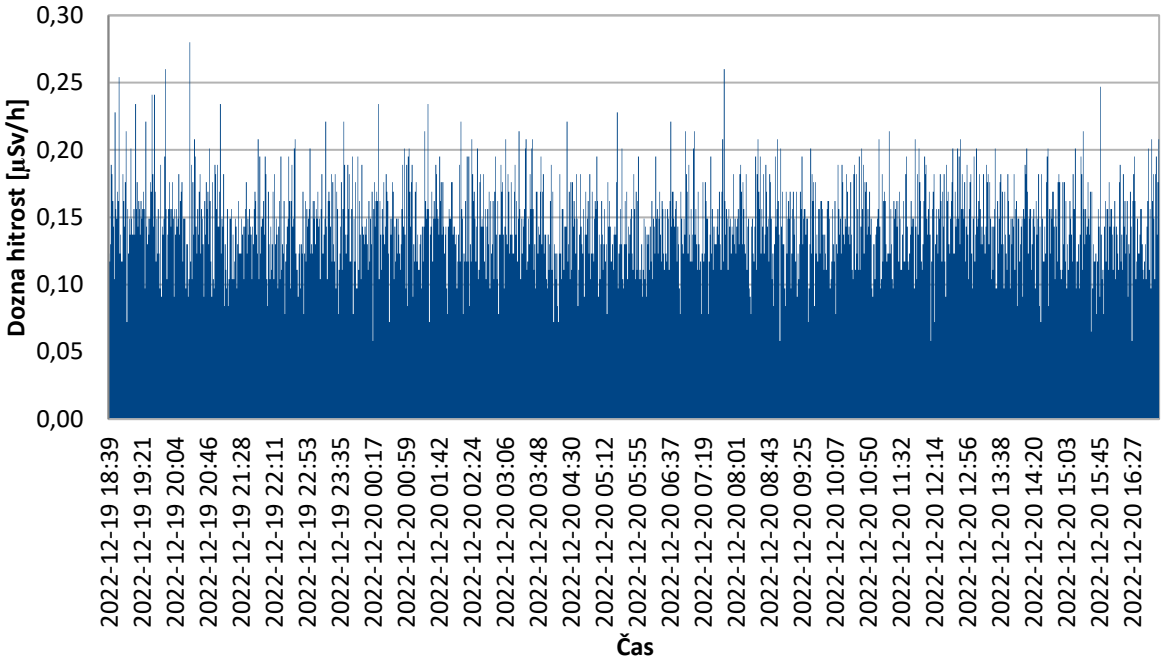
Povprečna izmerjena dozna hitrost na podstrešju naše tri-nadstropne hiše med 24. in 27.12.2022 v notranjih prostorih je 0,127 µSv/h (Graf 6).




Graf 6. Meritev dozne hitrosti na podstrešju družinske hiše v Šiški (Ljubljana), 24.–27.12.2022.

### *Družinska hiša, dvorišče pred hišo*

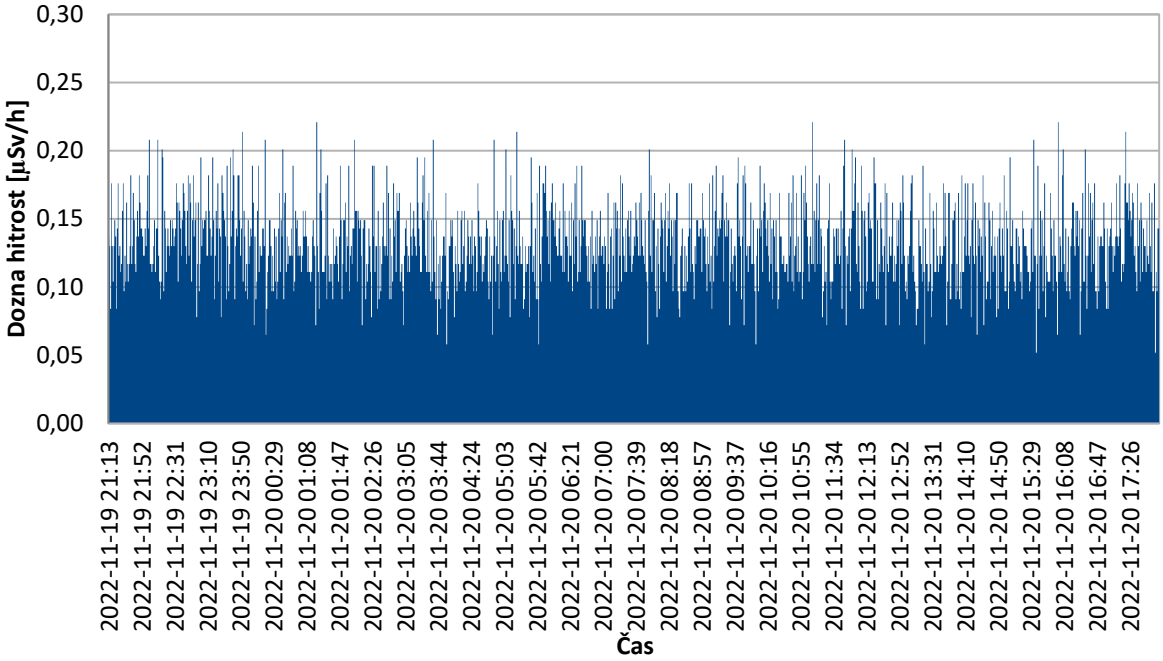
Povprečna izmerjena dozna hitrost na dvorišču pred našo hišo (zunaj) 2 m nad tlemi med 19. in 20.12.2022 je bila 0,140 µSv/h (Graf 7).




Graf 7. Meritev dozne hitrosti na dvorišču pred družinsko hišo v Šiški (Ljubljana), 19.–20.12.2022.

### *Družinska hiša, klet*

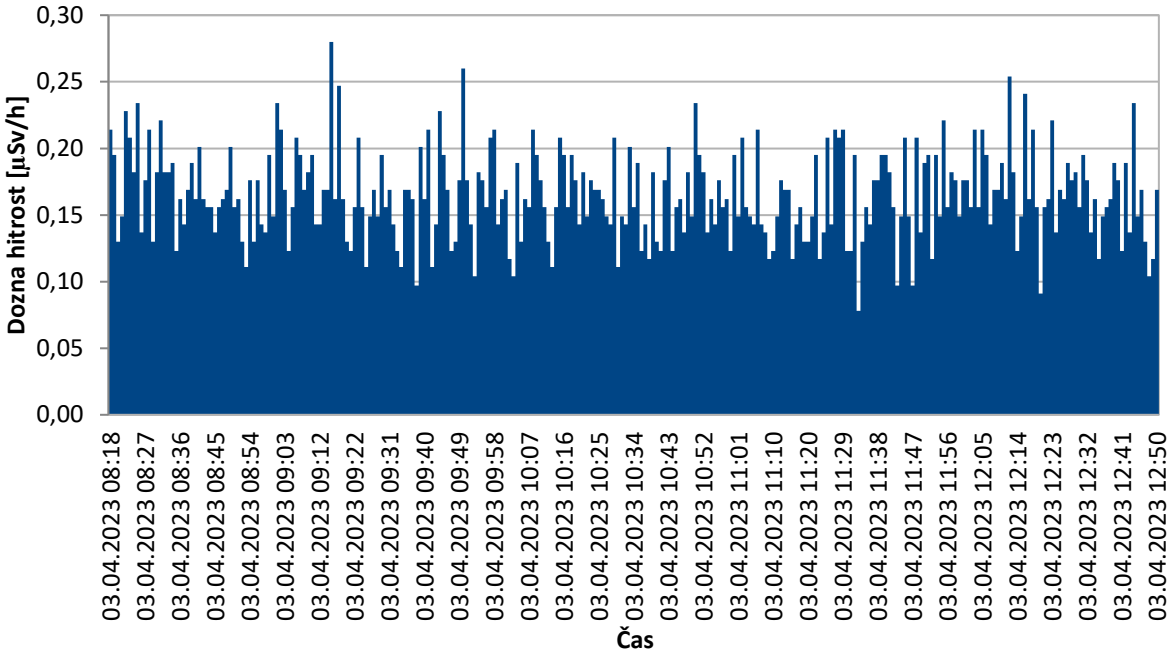
Povprečna izmerjena dozna hitrost v kleti naše hiše med 19. in 20.11.2022 je bila 0,130 µSv/h (Graf 8).




Graf 8. Meritev dozne hitrosti v kleti družinske hiše v Šiški (Ljubljana), 19.–20.11.2022.

### *Šolska učilnica 2. nadstropje*

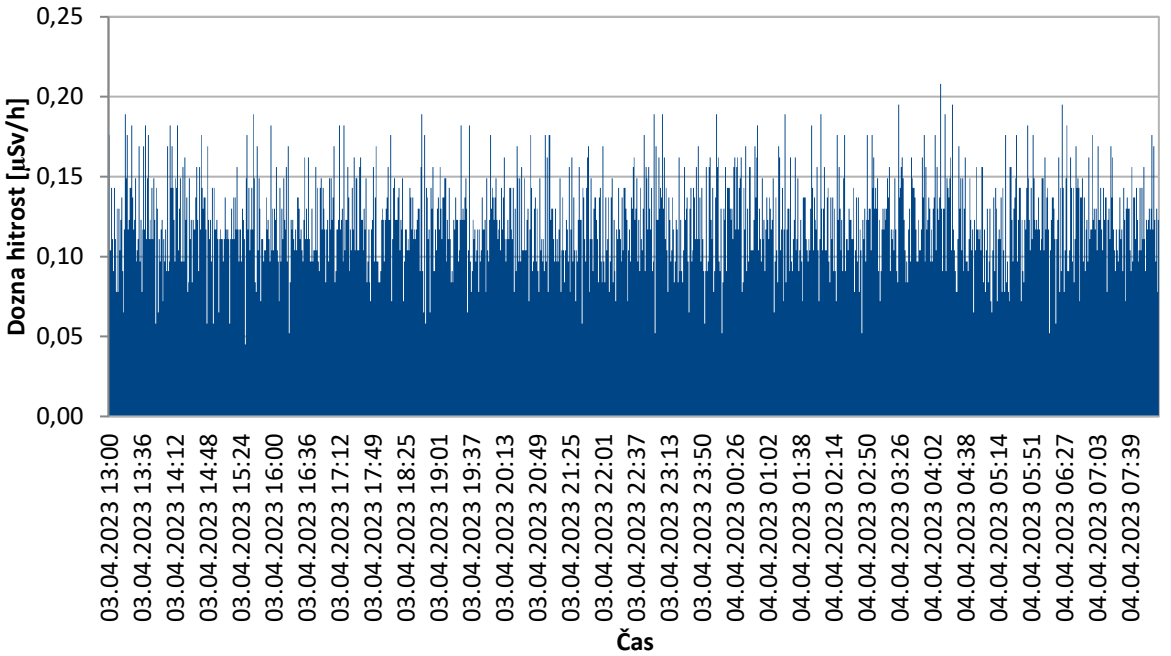
Povprečna izmerjena dozna hitrost v učilnici v drugem nadstropju na OŠ Spodnja Šiška na dan 3.4.2013 je bila 0,165 µSv/h (Graf 9).




Graf 9. Meritev dozne hitrosti v učilnici v 2. nadstropju OŠ Spodnja Šiška (Ljubljana), 3.4.2023.

### *Kletna učilnica*

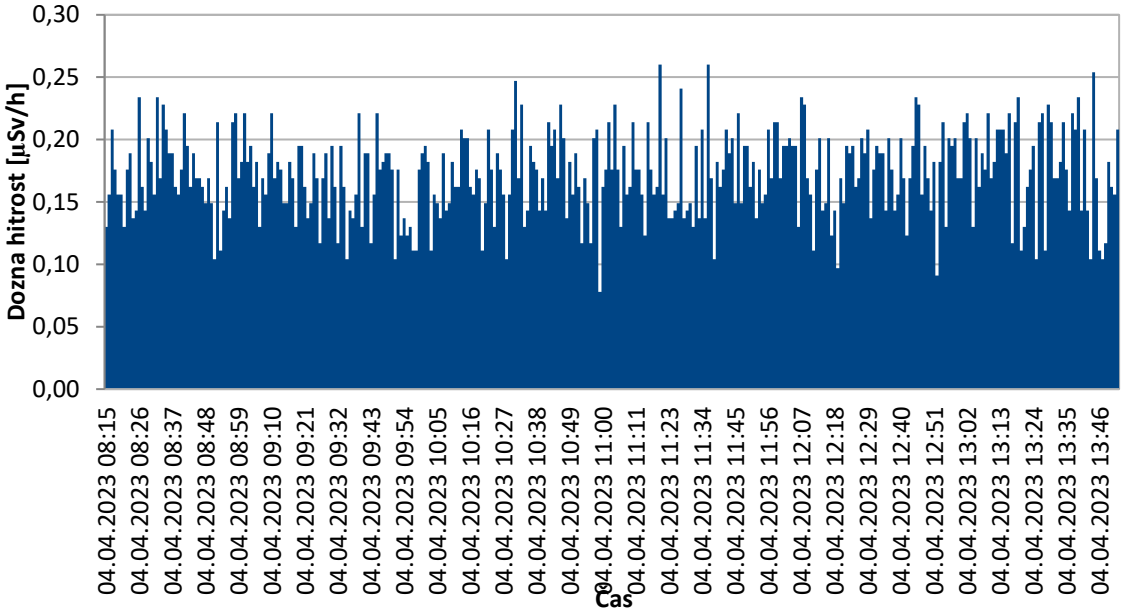
Povprečna izmerjena dozna hitrost v kletni učilnici na OŠ Spodnja Šiška popoldne in ponoči med 3.4. in 4.4.2013 je 0,121 µSv/h (Graf 10).




Graf 10. Meritev dozne hitrosti v kletni učilnici na OŠ Spodnja šiška (Ljubljana), 3.–4.4.2023.

### *Pisarna ravnatelja OŠ Spodnja Šiška*

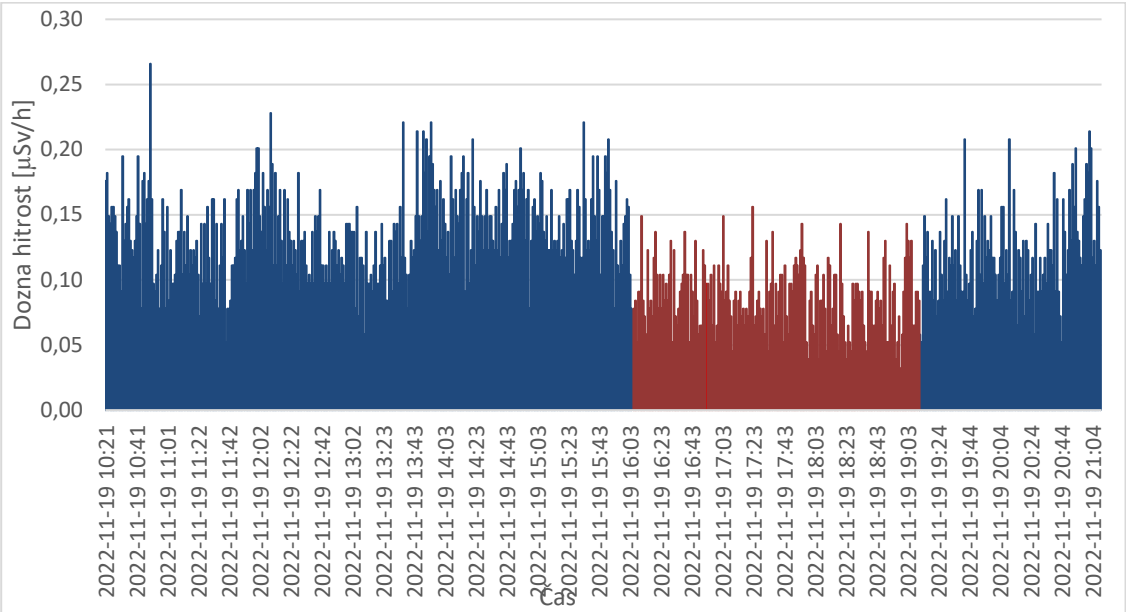
Povprečna izmerjena dozna hitrost v pisarni ravnatelja OŠ Spodnja Šiška dne 4.4.2013 je bila 0,172 µSv/h (Graf 11).




Graf 11. Meritev dozne hitrosti v pisarni ravnatelja OŠ Spodnja šiška (Ljubljana), 4.4.2023.

### *Kranj in rovi pod Kranjem*

Povprečna izmerjena dozna hitrost v rovih pod Kranjem [13] dne 19.11.2022 je bila 0,087 µSv/h (obarvano rdeče), zunaj (obarvano modro) pa 0,133 µSv/h (Graf 12).




Graf 12. Meritev dozne hitrosti v Kranju (modra barva) in v rovih pod Kranjem (rdeča barva), 19.11.2022.

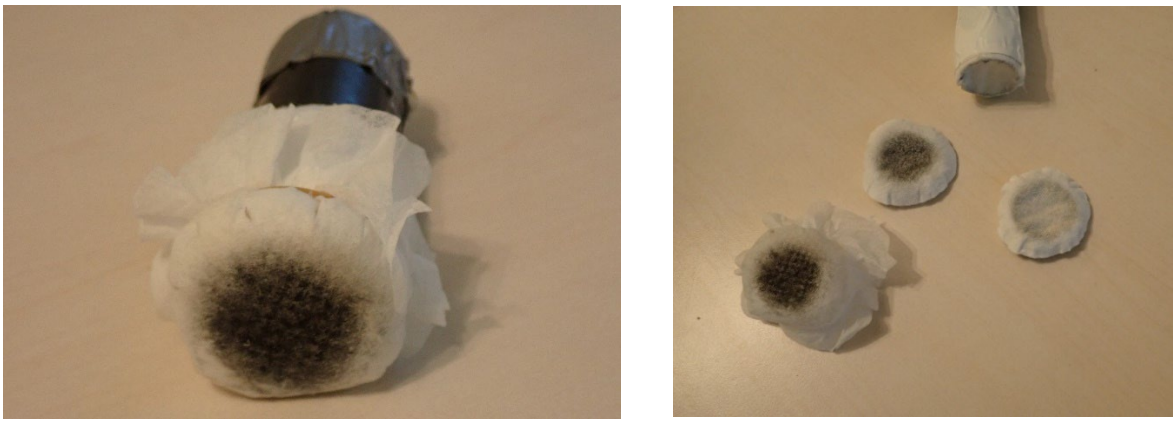
## 5.4. ZAJETJE RADONOVIH POTOMCEV

Za zajetje radonovih potomcev sva izbrali klet naše družinske hiše, saj je zemeljna (ni obzidana s kakšnim gradbenim materialom). Pred meritvijo je en teden nismo aktivno prezračevali (imamo vgrajen ventilator, ki se avtomatično prižiga), kljub temu pa smo klet v tem času uporabljali, kar pomeni, da je občasno vseeno kdo šel v klet in pri tem odprl vrata vanjo. Na spodnjih slikah (Slika 13 do Slika 15) je prikazana meritev v kleti naše družinske hiše.

Na konec cevi sesalca sva pritrdili več plasti vate, da bi zadržali čim več snovi iz zraka. Poleg prahu in ostalih delcev, ki lebdijo v zraku, so se na vati nabrali tudi radon in njegovi potomci. Detektor je bil ves čas priključen na računalnik zato, da sva sproti opazovali, kako dozna hitrost narašča ter kdaj se izravna. Računalnik je bil daljinsko povezan do računalnika v stanovanju, tako da nama ni bilo potrebo stati zraven poizkusa. Opazovali sva tudi, kako se dozna hitrost spreminja, ko sva sesalec ugasnili.

Slika 13. Postavljanje detektorja v klet naše hiše (levo) in priključitev na računalnik (desno). *(vir: družinski arhiv)*

Slika 14. Vata, še vedno pritrjena na konec cevi sesalca, je pritrjena tik ob detektor, ki nato izmeri, kako se dozna hitrost spreminja s časom. *(vir: družinski arhiv)*



Slika 15. Delci iz zraka, ki so se zaradi sesanja nabrali na vati (levo), in posamezne plasti vate (desno).
*(vir: družinski arhiv)*

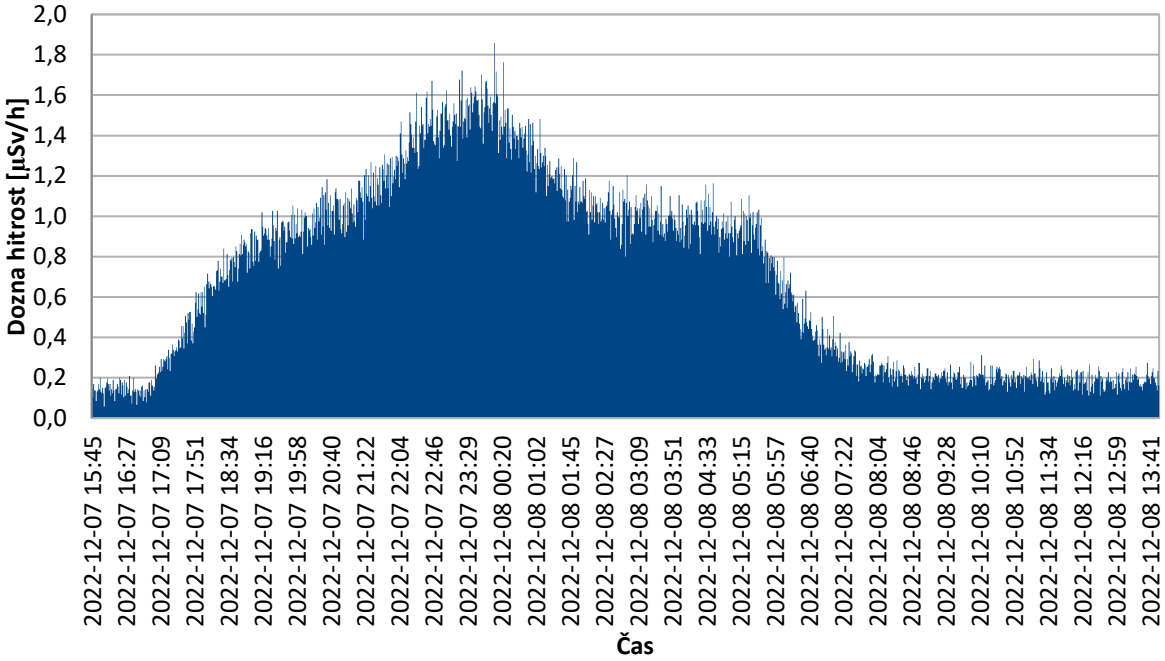
Dne 07.12.2022 sva prižgali sesalec, detektor in računalnik in začeli s poskusom. Počakali sva, da je meritev dosegla plato, torej da se dozna hitrost ni več spreminjala, razen seveda fluktuacij, ki so vedno prisotne. Umiritev aktivnosti (ko je bil dosežen plato) pomeni, da sta dotok novih delcev in razpad v ravnovesju. Maksimum izmerjenih vrednosti je bil 1,8 μSv/h (Graf 13).

Nato sva ugasnili sesalec in nadaljevali meritev z detektorjem. Detektorja in vate nisva premikali, da ne bi motili meritve. Zato sva samo ugasnili sesalec, detektor in vzorec pa pustili na istem mestu brez premikanja. Ko se je dovajanje novih delcev ustavilo, je začela dozna hitrost hitro padati in padla približno na vrednost pred začetkom poskusa. Poskus sva zaključili 08.12.2022.

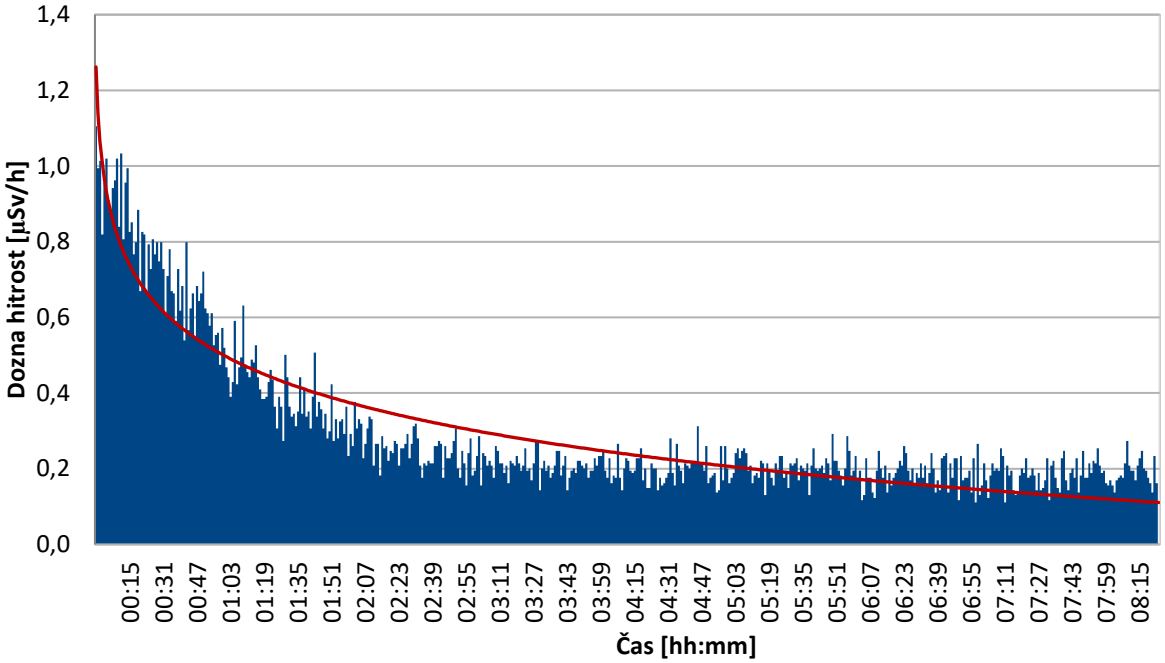
Po ugasnitvi sesalca dozna hitrost pada samo približno eksponentno, kar sva prikazali na ločenem grafu (Graf 14), ki je narisan od trenutka, ko smo ugasnili sesalec. V programu Excel sva na graf vrisali eksponentno krivuljo, ki se ne ujema dobro z izmerjenimi podatki. V poskusu namreč ne merimo razpada samo enega radioaktivnega elementa temveč tudi vseh nadaljnjih potomcev radonovega razpada. Radonovi potomci namreč nastajajo sproti (glede na razpad radonovih atomov) in vsak ima drugačno razpolovno dobo.

Po zaključku poskusa sva pogledali posamezne plasti vate, da sva preverili, ali je bilo plasti vate dovolj, da so zadržale vse delce iz zraka (Slika 15). Zadnja plast vate

je bila skoraj bela, zato sva mnenja, da je bilo plasti vate dovolj. Za boljši prikaz bi bilo potrebno poskus večkrat ponoviti in nato združiti rezultate.




Graf 13. Meritev dozne hitrosti v kleti družinske hiše v Šiški (Ljubljana) z namenom lovljenja radonovih potomcev, 07.–08.12.2022.




Graf 14. Opazovanje razpada radonovih potomcev.

# 6. ZAKLJUČKI IN RAZPRAVA

## 6.1. POVZETEK REZULTATOV

Vse rezultate meritev iz poglavij 5.2 in 5.3 sva za večjo preglednost zbrali v skupni tabeli (Tabela 2).

Tabela 2. Zbrani rezultati vseh opravljenih meritev dozne hitrosti.

| Mesto meritve | Nadmorska višina [m] | Povprečna izmerjena dozna hitrost [μSv/h] |
|---|---|---|
| ob merilni postaji Bežigrad | 304 | 0,123 (uradna vrednost 0,083) |
| ob merilni postaji Krvavec | 1853 | 0,136 (uradna vrednost 0,105) |
| družinska hiša, klet | 302 | 0,130 |
| družinska hiša, pritličje | 305 | 0,160 |
| družinska hiša, podstrešje | 314 | 0,127 |
| družinska hiša, dvorišče | 305 | 0,140 |
| učilnica 2. nadstropje | 315 | 0,165 |
| kletna učilnica | 303 | 0,121 |
| pisarna ravnatelja | 306 | 0,172 |
| mesto Kranj | 387 | 0,133 |
| rovi pod Kranjem | 359 | 0,087 |

Najprej sva želeli umeriti detektor, ki sva ga uporabljali za poskuse. Uradne meritve so objavljene na internetnih straneh Mreže zgodnjega obveščanja in jih lahko primerjamo s svojimi meritvami na isti datum ter ob istih urah. Vendar meritve z detektorjem, ki sva ga uporabljali midve, nihajo in imajo velik razpon vrednosti. Prav tako sama okolica meritve ni bila pod kontrolo. Zato umeritev detektorja ni bila možna. Izvedli sva torej primerjavo, s katero sva ugotovili, da je merilnik za najin namen dovolj dober.

S primerjavo meritve v bližini uradnih merilni postaj za Bežigradom (Ljubljana) in na Krvavcu sva ugotovili, da detektor, ki sva ga uporabljali, sistematično izmeri za približno 0,03–0,04 μSv/h previsoke vrednosti glede na uradno izmerjene.

Ker merilnika nisva umerili, sva se odločili, da bova v poglavju 5.3 pisali izmerjene nepopravljene povprečne vrednosti dozne hitrosti ob zavedanju, da so precenjene. Korekcijo pa sva uporabili pri tolmačenju rezultatov.

Za natančno umerjanje bi potrebovali pravilni postopek, nadzorovano okolje in znani vir sevanja. Take pogoje in opremo imajo v kalibracijskih laboratorijih kot je NDS - Laboratorij za dozimetrične standarde na Inštitutu Jožef Štefan (https://f2.ijs.si/sl/laboratoriji/2020070315401451/nds--laboratorij-za-dozimetricne-standarde).

Z upoštevanjem korekcije detektorja imamo doma v stanovanju povprečno dozno hitrost 0,12 µSv/h ali preračunano 1,05 mSv/leto, kar je manj od povprečne letne doza sevanja iz naravnih virov v Sloveniji, ki je približno 3 mSv na leto (Tabela 1). V šoli sva izmerili povprečno dozno hitrost 0,10 µSv/h ali preračunano 0,88 mSv/leto, kar je še manj kot pri nas doma.

Pri poizkusu lovljenja radonovih potomcev smo dobili veliko večje vrednosti, vendar je bila visoka raven sevanja le na mestu (na vati), kjer sva zbirali delce iz zraka in zato ni bilo nevarno za najino zdravje. Iz tega je razvidno kako je pomembno zračenje za zmanjševanje koncentracije radona v prostoru (ter da v naši kleti ni priporočljivo spati).

Izmerjena dozna hitrost na podstrešju naše družinske hiše se približno ujema z vrednostjo, ki sva jo izmerili pri merilni postaji za Bežigradom. Na dvorišču naše družinske hiše je sevanje večje kot na podstrešju, ter za 0,06 µSv/h večje kot je uradna meritev za Ljubljano, kar je več kot izračunana korekcija merilnika. Razlog je, da živimo v bližini železniške proge in stare aranžirne postaje, kjer so včasih čistili saje in žlindro iz kurišč parnih lokomotiv. Poleg tega je bila hiša zgrajena v časih, ko je vsaka hiša imela privatno kurišče na les ali premog in so saje odlagali na dvorišče ter cesto. Pri sežiganju (predvsem pri sežiganju premoga) se namreč poveča koncentracija naravnih radioaktivnih delcev. Pred nekaj leti smo dali v analizo zemljo z našega vrta in se je izkazalo, da vsebuje preveč težkih kovin, da bi bila primerna za gojenje zelenjave. Zato nas ne preseneča, da je tudi sevanje povečano v okolici naše hiše.

Na podlagi geološke sestave tal so občino Ljubljano razvrstili med občine z nizkim tveganjem radona (Slika 7), zato naju ni presenetilo, da se meritve v pritličju, kleti in

na dvorišču med sabo ne razlikujejo zelo. Na izmerjene razlike je lahko vplivalo že vreme, saj meritev nisva mogli delati sočasno, ker sva imeli na razpolago le en detektor. Najmanjšo vrednost sva izmerili na podstrešju, ki je zadosti odmaknjeno od tal. Na razliko zaradi sevanja iz vesolja dodatnih 9 m nadmorske višine ne vpliva.

Rezultat iz tunelov pod Kranjem je smiseln, saj so tuneli s treh strani odprti in zato dobro prezračeni, ter se v njih radon ne nabira preveč. Kranj stoji na delu Slovenije kjer ni visokega tveganja za radon (Slika 7). Hkrati pa zemlja nad rovi ščiti pred sevanjem iz vesolja, zato smo v njih izmerili manjšo dozno hitrost.

Na vrhu Krvavca je več sevanja, kot v Ljubljani. To se vidi tako iz uradnih meritev kot iz najinih meritev. Z večjo nadmorsko višino je večji vpliv sevanja iz vesolja.

Vse izmerjene dozne hitrosti v najinem okolju so bile nižje od 0,33 μSv/h, ki je meja običajnega sevanja ozadja (Slika 8). To vrednost sva presegli edino pri poizkusu lovljenja radonovih potomcev, kjer sva zabeležila vrednost 1,59 μSv/h (Graf 13). Merilnik na ju je opozoril na povišano vrednost z glasnim zvočnim signalom in mežikanjem rdeče lučke. Ta povečana vrednost se je nahajala samo ob merilniku (material na vati) in je po končanem poizkusu hitro padla na običajno vrednost.

## 6.2. POTRJEVANJE ZASTAVLJENIH HIPOTEZ

Na podlagi našega eksperimentalnega dela sva naredili naslednje zaključke:

- Deloma sva potrdili prvo hipotezo, da lahko detektor umerimo sami s primerjavo najinih in uradnih meritev ob istem času. Najin postopek ne ustreza standardom umerjanja, sva pa naredili primerjavo, s katero sva ugotovili, da je merilnik za najin namen dovolj dober.
- Drugo hipotezo, da kozmično radioaktivno sevanje z nadmorsko višino narašča, sva potrdili. Potrjujejo jo viri v literaturi in tudi meritve na vrhu Krvavca in za Bežigradom (Ljubljana). Med mestoma merjenja je 1549 m višinske razlike. Povprečna izmerjena dozna hitrost sevanja je višja na Krvavcu tako pri najinih meritvah kot v uradnih meritvah, objavljenih na internetnih straneh Mreže zgodnjega obveščanja.

- Najina tretja hipoteza je bila, da je pod zemljo manj sevanja iz vesolja. Tudi to hipotezo sva potrdili z meritvami v mestu Kranj in v rovih pod mestom Kranj. Meritev sva zasnovali tako, da je ves čas geološka sestava tal enaka, torej je razlika v izmerjeni dozni hitrosti posledica razlike zaradi sevanju iz vesolja.
- Tudi četrto hipotezo sva potrdili. Predvidevali sva, da lahko sami doma uloviva radonove potomce in izmeriva njihovo sevanje, kljub temu, da nimava na razpolago natančne laboratorijske opreme. V poskusu sva izmerili sevanje radonovih potomcev, saj sevanje ni padalo eksponentno temveč po bolj zapleteni krivulji zaradi sprotnega nastajanja radonovih potomcev, ki so nato tudi razpadali z različnimi razpolovnimi dobami.

## 6.3. RAZPRAVA

Ljudi je strah sevanja. Že sama beseda se zdi grozna. Pri preučevanju te teme naju je presenetilo, da se veliko ljudi zgrozi ob omembi jedrske elektrarne, ki je zelo zavarovana in zaščitena, hkrati pa ne poskrbi za prezračevanje prostorov in tvega, da bodo zboleli za pljučnim rakom zaradi radona v svojem domu. Ljudje se včasih nesorazmerno obnašamo glede na svoj strah in tveganje, ki ga v resnici posamezna stvar prinaša. Kadar nekdo po zmerni izpostavljenosti sevanju občuti bolezenske znake, jih ne povzroča sevanje, temveč strah pred njim (zaradi močnega psihološkega vpliva) [17]. Naju je najbolj presenetilo dejstvo, da vse v naravi – vsako bitje in vsaka stvar – vsebuje in je vedno vsebovalo radioaktivne snovi [17].

Iskanje odgovorov na postavljena raziskovalna vprašanja se je izkazalo za zahtevno, zato sva se za pomoč obrnili na strokovnjaka, doc. dr. Tomaža Žagarja, ki nama je dal veliko nasvetov, kako opraviti praktične poskuse. Presenečeni sva bili, ko sva ugotovili, da je sevanje navzoče povsod okoli nas in da lahko sami izmeriva sevanje iz svoje okolice. Niso vse meritve prinesle pričakovanih rezultatov, saj meritev nisva opravljali v strogo kontroliranem okolju, uporabljali pa sva le nekalibriran cenejši detektor, dostopen na prostem trgu. Kljub temu sva dobili uporabne rezultate, ki sva jih nato lahko primerjali z uradno objavljenimi rezultati. Glavni zaključek eksperimentalnega dela je, da se najine meritve ujemajo z uradnimi. Čeprav ujemanje ni preveč točno, so rezultati zadosti zanesljivi, da lahko zaključiva, da v

svojem bivalnem okolju in v okolju v katerem se gibljeva, nisva izpostavljeni prevelikemu radioaktivnemu sevanju. Sedaj veva tudi, da lahko zaupava uradnim meritvam in se zanašava na objave strokovnjakov glede sevanja ozadja.

Izvedeli sva, da v Ljubljani, kjer živiva, ni velikega tveganje radona. Vseeno pa sva veseli, da v šoli redno prezračujejo kletne prostore, kjer imamo garderobe in eno učilnico. Doma živiva v pritličnem stanovanju, ki je podkleteno samo v približno tretjini površine in še ta klet je zemeljna, saj je bila naša hiša zgrajena leta 1898. V preteklosti so v okolici in tudi na dvorišču naše hiše odlagali saje in žlindro z domačih kurišč ter ob čiščenju kurišč parnih lokomotiv. Zato pomagava staršema vsakodnevno prezračevati stanovanje »na prepih«, saj imamo na hiši moderno izolacijo in kakovostna okna, ki preprečujejo samodejno prezračevanje. Na ta način skrbimo za boljši zrak in seveda za odstranjevanje morebitnih sevanj zaradi radonovega razpada.

Pri pripravi raziskovalne naloge sva se naučili veliko novega o raziskovalnem delu: kako najti in uporabiti vire, kako pravilno zasnovati in izvesti eksperiment ter kako prikazati zbrane podatke in nato te podatke razumeti. Predvsem pa sva tekom raziskovalnega procesa pridobili veliko izkušenj, kako dejansko izvesti meritev na terenu, saj nikoli ne gre le za pritisk na gumb za vključitev merilnika. Pomembne so priprave na sam eksperiment, tehnična izvedba in predhodni razmislek, kaj sploh želimo izmeriti v posameznem poskusu. Naučili sva se tudi, da raziskovanje zahteva čas in veliko dela, predvsem pri pripravi poskusa in pisanju poročila.

»Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.«

(Nič v življenju se ne bi smelo bati, ampak samo razumeti. Zdaj je čas, da razumemo več, zato se lahko bojimo manj.)

*Marie Curie*

# 7. SEZNAM VIROV IN LITERATURE


[1] Bekerel, Wikipedija (elektronski vir). Uporabljeno 19. 01. 2023, dostopno na https://sl.wikipedia.org/wiki/Bekerel.

[2] Dozimetrija, Wikipedija (elektronski vir). Uporabljeno 19. 01. 2023, dostopno na https://sl.wikipedia.org/wiki/Dozimetrija.

[3] GORENC, Jernej. 2018. Radon in njegovi potomci: diplomsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta. Uporabljeno 28. 01. 2023, dostopno na http://pefprints.pef.uni-lj.si/5379/1/JG_DN.pdf.

[4] GQ Electronics LLC. GQ GMC-300E Plus/GMC-300S: Geiger Counter User Guide, Revision 2.13 June 2022 (elektronski vir). Uporabljeno 02. 11. 2022, dostopno na https://www.gqelectronicsllc.com/GMC_300E_Plus_User_ Guide.pdf.

[5] GQ Geiger Counter Data Viewer Re. 2.63 (elektronski vir). Uporabljeno 02. 11. 2022, dostopno na http://www.gqelectronicsllc.com/downloads/download.asp? DownloadID=61.

[6] JENČIČ, Igor. 2013. Osnove jedrske fizike. Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo »Milana Čopiča«.

[7] Kozmični žarki, Wikipedija (elektronski vir). Uporabljeno 05. 11. 2022, dostopno na https://sl.wikipedia.org/wiki/Kozmi%C4%8Dni_%C5%BEarki.

[8] Mreža zgodnjega obveščanja. Trenutne vrednosti sevanja gama v okolju (interaktivni zemljevid). Uporabljeno 07. 02. 2023, dostopno na https://www.radioaktivnost.si/rvo_public/RVO/Map.

[9] Mreža zgodnjega obveščanja. Radioaktivnost v okolju (elektronski vir). Uporabljeno 07. 02. 2023, dostopno na https://www.radioaktivnost.si/.

[10] PODHRAŠKI, Matija. 2012. Geiger-Müllerjev števec: projektna naloga pri predmetu Seminar. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. Uporabljeno 29. 01. 2023, dostopno na http://lpvo.fe.uni-lj.si/fileadmin/files/Izobrazevanje/SEM/Seminarji/Podhraski%20-%20Geigerjev_stevec.pdf.

[11] Polarni sij, Wikipedija (elektronski vir). Uporabljeno 05. 11. 2022, dostopno na https://sl.wikipedia.org/wiki/Polarni_sij.

[12] Radioaktivno onesnaženje, Wikipedija (elektronski vir). Uporabljeno 05. 11. 2022, dostopno na https://sl.wikipedia.org/wiki/Radioaktivno_onesna %C5%BEenje.

[13] Rovi pod starim Kranjem (elektronski vir). Uporabljeno 15. 02. 2023, dostopno na https://www.visitkranj.com/rovi-pod-starim-kranjem.

[14] Strah pred sevanjem – brez radioaktivnosti nas ne bi bilo. (elektronski vir). Uporabljeno 04. 02. 2023, dostopno na https://www.bodieko.si/sevanje-radioaktivnost.

[15] Uredba o mejnih dozah, referenčnih ravneh in radioaktivni kontaminaciji (Ul. l. RS. št. 18/18). Uporabljeno 24. 02. 2023, dostopno na http://www.pisrs.si/ Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7605.

[16] Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih (Ul. l. RS. št. 49/04, 76/17 – ZVISJV-1 in 18/18). Uporabljeno 24. 02. 2023, dostopno na http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED2715.

[17] WAHLSTRÖM, Björn. 1998. Spoznajmo radioaktivnost. Ljubljana: Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije.

[18] ZADNIK, Vesna, in ŽAGAR Tina. SLORA: Slovenija in rak (elektronski vir). Epidemiologija in register raka. Onkološki inštitut Ljubljana. Uporabljeno 12. 12. 2022, dostopno na www.slora.si.

[19] Zmanjševanje izpostavljenosti radonu (elektronski vir). Uporabljeno 28. 01. 2023, dostopno na https://www.gov.si/teme/zmanjsevanje-izpostavljenosti-radonu/.