

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ogrizek Woermann, R. 2012. Problematika na pregled naravno prisotnih radionuklidov ter njihova pojavnost v komunalnih dejavnostih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Grilc, V., somentor Manojlović, S.): 93 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ogrizek Woermann, R. 2012. Problematika na pregled naravno prisotnih radionuklidov ter njihova pojavnost v komunalnih dejavnostih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Grilc, V., co-supervisor Manojlović, S.): 93 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
VODARSTVA IN
KOMUNALNEGA
INŽENIRSTVA

Kandidat:

ROK OGRIZEK WOERMANN

**PROBLEMATIKA IN PREGLED NARAVNO
PRISOTNIH RADIONUKLIDOV TER NJIHOVA
POJAVNOST V KOMUNALNIH DEJAVNOSTIH**

Diplomska naloga št.: 192/VKI

**CONCERNS AND REVIEW OF NATURALLY
OCCURRING RADIOACTIVE MATERIALS AND THEIR
OCCURRENCE IN MUNICIPAL ACTIVITIES**

Graduation thesis No.: 192/VKI

Mentor:

izr. prof. dr. Viktor Grilec

Predsednik komisije:

doc. dr. Dušan Žagar

Somentor:

Stanko Manojlović, univ.dipl.fiz.

Član komisije:

doc. dr. Mojca Šraj

prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 25. 09. 2012

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Rok Ogrizek Woermann izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Problematika in pregled naravno prisotnih radionuklidov ter njihova pojavnost v komunalnih dejavnostih«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 12.9.2012

Rok Ogrizek Woermann

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 628.1+628.3(043.2)
Avtor: Rok Ogrizek Woermann
Mentor: izr. prof. dr. Viktor Grilc
Somentor: Stanko Manojlovič, univ. dipl. fiz.
Naslov: Problematika in pregled naravno prisotnih radionuklidov ter njihova pojavnost v komunalnih dejavnostih
Tip dokumenta: diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 93 str., 18 pregl., 39 sl., 5 pril.
Ključne besede: NORM, TENORM, odpadki, radionuklidi, priprava pitne vode, čiščenje odpadnih voda, odpadno blato

Izvleček

Ionizirajoče sevanje iz naravnih virov (radioaktivna jedra v zemeljski skorji, kozmični žarki) je prisotno povsod na Zemlji. Naravno prisotni radionuklidi, predvsem v zemljinah in kamninah tako predstavljajo možne vire izpostavljenosti prebivalstva. Če so snovi, ki vsebujejo naravne radionuklide, v prvinski oz. nedotaknjeni obliki, govorimo o tērminu NORM, čim pa človeške dejavnosti, npr. rudarjenje in sežig premoga, posegajo oz. spreminjajo naravno stanje pa lahko pride do povišanih koncentracij NORM. Kadar pa so koncentracije naravno radioaktivnih snovi znatno povišane uporabljamo akronim TENORM.

NORM in TENORM se pojavljata v različnih nejedrskih industrijah, ki pridelujejo oz. predelujejo naravne materiale, kot so rudarjenje, pridobivanje zemeljskega plina in nafte, fosfatna industrija, proizvodnja TiO₂, predelava cirkonija, keramična industrija in izdelava gradbenih materialov.

Teoretični del zajema pregled osnov radioaktivnosti, biološke učinke ionizirajočih sevanj, mednarodno in slovensko zakonodajo na področju NORM in splošen pregled problematičnih industrij, kjer se pojavlja NORM in TENORM, prisotnih v Sloveniji. Glavni poudarek pa je na dveh komunalnih industrijah: priprava pitne vode in čiščenje odpadnih voda.

Eksperimentalni del zajema opis izbire merilnih lokacij. Nato je predstavljen merilni instrument in metoda *in situ* merjenja ultrafiltracijskih modulov ter odpadnega blata s komunalnih čistilnih naprav po Sloveniji. V zadnjem delu smo podali še spektrometrično analizo vzorca ter diskusijo vseh rezultatov in navedli predloge za zmanjšanje izpostavljenosti ionizirajočemu sevanju na razumni minimum.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 628.1+628.3(043.2)
Author: Rok Ogrizek Woermann
Supervisor: assoc. prof. Viktor Grilc, Ph.D.
Cosupervisor: Stanko Manojlović, B.Sc.
Title: Concerns and review of naturally occurring radioactive materials and their occurrence in municipal activities
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 93 p., 18 tab., 39 fig., 5 ann.
Keywords: NORM, TENORM, wastes, residues, radionuclides, drinking water treatment, wastewater treatment, sewage sludge

Abstract

Ionizing radiation from natural sources (radioactive nuclei in the earth's crust, cosmic rays) is present everywhere on Earth. Naturally occurring radionuclides, primarily in soil and rock also represent potential sources of exposure to the population. If materials containing natural radionuclides are in the unaltered form then they are described by the term NORM. Human activities such as mining and coal combustion can interfere or alter the natural state and lead to elevated concentrations of NORM. When the concentrations of naturally occurring radioactive materials are significantly increased i.e. technologically enhanced, we use the acronym TENORM.

NORM and TENORM occur in a variety of non-nuclear industries producing processed natural materials, such as extraction of natural gas and oil, phosphate industry, TiO₂ production, mineral sands production, ceramic industry and production of building materials.

The theoretical section provides an overview of the radioactivity basics, biological effects of ionizing radiation, international and Slovenian legislation in NORM regulations and an overview of the problematic industries in Slovenia, where NORM may be enhanced to TENORM. The main focus is on two municipal industries: drinking water and wastewater treatment.

The experimental section begins with a description of measurement location selection. It then presents the measuring equipment and method used for measuring the ultrafiltration modules and sewage sludge from preselected wastewater treatment plants in Slovenia. The final part of the experimental section presents spectrometric analysis of a specific sewage sludge sample and discusses the results. Finally the proposals for reducing ionizing radiation exposure to a reasonable minimum are presented.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju izr. prof. dr. Viktorju Grilcu in somentorju Stanku Manojloviću za strokovno svetovanje, potrpežljivost ter spodbudo pri nastajanju diplomskega dela. Hvala tudi vsem na Upravi RS za jedrsko varnost ter dr. Gregorju Omahnu iz Zavoda za varstvo pri delu za vso pomoč in prijaznost.

Zahvalil pa bi se tudi vsem odgovornim na čistilnih napravah, ki so me prijazno sprejeli in mi omogočili izvedbo meritev.

Posebna zahvala gre tebi Bianca. Pri vseh vzponih in padcih si verjela vame, me navdajala z optimizmom ter mi vedno stala ob strani.

Iskrena hvala tudi dragima mami Anici in očetu Jožetu za vso moralno in finančno podporo v času študija. Draga omica in Ksenija, hvala. Vajine tople besede so mi vedno bile v bodrilo.

Dragi prijatelji, posebno Ana, hvala za nasvete, ko sem jih potreboval.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Hipoteze	2
1.2	Namen dela	2
2	OSNOVE RADIOAKTIVNOSTI	3
2.1	Jedro atoma	3
2.2	Radioaktivno sevanje	4
2.3	Radioaktivni razpadi	5
2.3.1	Razpad alfa	5
2.3.2	Razpad beta	6
2.3.3	Razpad gama	6
2.4	Pregled ionizirajočih sevanj	6
2.5	Dozimetrične količine	8
2.5.1	Absorbirana doza D	8
2.5.2	Ekvivalentna doza H	8
2.5.3	Efektivna doza E	9
3	BIOLOŠKI UČINKI IONIZIRAJOČEGA SEVANJA	10
3.1	Učinki sevanja na celico	10
3.2	Učinki sevanja na človeka	11
3.3	Deterministični učinki sevanja	12
3.4	Stohastični učinki sevanja	12
4	PROBLEMATIKA TER DEFINICIJA NORM IN TENORM	14
5	ZAKONODAJA	15
5.1	Pregled mednarodnih organizacij in sporazumov	15
5.1.1	Mednarodna Agencija za atomsko energijo (IAEA)	15
5.1.2	Komite Združenih Narodov o učinkih atomske radiacije (UNSCEAR)	15
5.1.3	Mednarodna komisija za varstvo pred sevanji (ICRP)	16
5.1.4	Ameriški energetske institut (EPRI)	16
5.2	Evropska direktiva 96/29/EURATOM	17
5.3	Slovenska zakonodaja	18
5.3.1	Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV)	18
5.3.2	Uredba o sevalnih dejavnostih (UV1)	20

5.3.3	Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih (UV2)	21
6	SPLOŠEN PREGLED INDUSTRIJ S POJAVNOSTJO NORM IN TENORM	23
6.1	Rudarjenje in predelava uranove rude	23
6.2	Fosfatna industrija	24
6.3	Pridobivanje zemeljskega plina in nafte	26
6.4	Rudarjenje premoga in sežiganje v termoelektrarnah	27
6.5	Proizvodnja titanovega dioksida (TiO ₂)	28
6.6	Gradbeni materiali	29
6.7	Priprava pitne vode	31
6.7.1	Radon	33
6.7.2	Radij	34
6.7.3	Uran	34
6.7.4	Postopki za odstranjevanje radioaktivnih onesnažil	34
6.7.5	Ravnanje z odpadki	35
6.7.6	Karakterizacija odpadkov	35
6.7.6.1	Radioaktivni odpadki	35
6.7.6.2	Odstranjevanje radioaktivnih odpadkov	36
6.7.7	Možnosti odstranjevanja tekočih odpadkov	38
6.7.7.1	Direkten izpust	38
6.7.7.2	Izpust na KČN	38
6.7.7.3	Podzemno injektiranje	38
6.7.8	Možnosti odstranjevanja trdnih odpadkov	39
6.8	Čiščenje komunalne odpadne vode	39
6.8.1	Prisotnost radioaktivnih snovi v odpadnem blatu ter pepelu iz sežiga blata	39
6.9	Priprava industrijske tehnološke vode	41
6.10	Komentar na IJS poročilo	41
7	EKSPERIMENTALNI DEL	44
7.1	Metoda merjenja in opis merilne opreme	44
7.1.1	Princip delovanja detektorja	45
7.2	Postopek dela	46
7.3	Opis navezave stikov	46
7.4	Metodologija izbire lokacij	47
7.5	Čistilna naprava Idrija	48
7.6	Vodarna Cepki, Rižanski vodovod	50

7.7	Čistilna naprava Brestanica	52
7.8	Centralna čistilna naprava Škofja Loka	54
7.9	Centralna čistilna naprava Šaleške doline, Šoštanj	56
7.10	Centralna čistilna naprava Kočevje	58
7.11	Čistilna naprava Celje	59
7.12	Centralna čistilna naprava Ljubljana	62
7.13	Odlagališče sadre ob Velenjskem jezeru	64
7.14	Diskusija rezultatov	65
8	ZAKLJUČEK	67
	VIRI	69

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Utežni faktorji sevanja za različne energije ionizirajočih sevanj [23]	9
Preglednica 2: Tkivni utežni faktorji [23]	9
Preglednica 3: Ocenjene mejne vrednosti determinističnih učinkov sevanja in povzročene poškodbe na človeških organih [3]	12
Preglednica 4: Odstranjevanje radioaktivnih onesnažil [54]	34
Preglednica 5: Pregled procesov čiščenja in tipov odpadkov, nastalih pri odstranjevanju radionuklidov iz surove vode [54]	36
Preglednica 6: Pregled procesov čiščenja in njihovih odpadnih produktov [54]	36
Preglednica 7: Opcije odstranjevanja glede na tip TENORM odpadka [54]	38
Preglednica 8: Potrjene lokacije, termini obiskov ter pooblaščen kontaktne osebe	46
Preglednica 9: Rezultati meritev hitrosti doze na ČN Idrija	48
Preglednica 10: Rezultati meritev hitrosti doz v vodarni Cepki	51
Preglednica 11: Rezultati meritev hitrosti doz na ČN Brestanica	53
Preglednica 12: Rezultati meritev hitrosti doz na ČN Škofja Loka	56
Preglednica 13: Rezultati meritev hitrosti doz na CČN Šaleške doline	57
Preglednica 14: Rezultati meritev hitrosti doz na ČN Kočevje	59
Preglednica 15: Rezultati meritev hitrosti doz na ČN Celje	60
Preglednica 16: Karakteristike procesa obdelave blata na CČN Ljubljana [58]	63
Preglednica 17: Specifične aktivnosti radionuklidov v povprečnem vzorcu blata s CČN Ljubljana	64
Preglednica 18: Rezultati meritev hitrosti doz ob deponiji sadre v občini Šoštanj	65

KAZALO SLIK

Slika 1: Odvisnost števila nerazpadlih jeder od časa oz. eksponentni zakon radioaktivnega razpada	5
Slika 2: Ročni prenosni merilnik gama in nevtronskega sevanja FieldSPEC IdentiFINDER	44
Slika 3: Shematski prikaz najpomembnejših sestavnih delov instrumenta	46
Slika 4: Karta naravne radioaktivnosti Slovenije z označenimi merilnimi lokacijami [5]	47
Slika 5: Čistilna naprava Idrija [40]	49
Slika 6: Bazeni za nedehidrirano blato na ČN Idrija	49
Slika 7: Zabojujnik za dehidrirano blato na ČN Idrija	49
Slika 8: Vzorčevalna mesta na ČN Idrija [41]	49
Slika 9: Glavna procesna stavba vodarne Cepki [43]	50
Slika 10: Moduli ultrafiltracije v vodarni Cepki	51
Slika 11: Dehidrirano blato v zabojujniku vodarne Cepki	51
Slika 12: Vzorčevalna mesta na področju vodarne Cepki [41]	51
Slika 13: Stranski pogled na ČN Brestanica [45]	52
Slika 14: Nedehidrirano blato v procesu pred centrifugiranjem	53
Slika 15: Dehidrirano blato v zbirnem zabojujniku	53
Slika 16: Vzorčevalna mesta na ČN Brestanica [41]	53
Slika 17: Pogled na CČN Škofja Loka [44]	55
Slika 18: Gnilišča oz. zbiralniki nedehidriranega blata	55
Slika 19: Vzorec nedehidriranega blata	55
Slika 20: Pregled vzorčevalnih mest na ČN Škofja Loka [41]	55
Slika 21: Pogled na CČN Šaleške doline, Šoštanj [46]	56
Slika 22: Dehidrirano blato na poti iz centrifuge	57
Slika 23: Centrifuga za dehidracijo blata	57
Slika 24: Vzorčevalna mesta meritev ozadja in blata na CČN [41]	57
Slika 25: Pregled usedalnikov na CČN Kočevje [47]	58
Slika 26: Gnilišča na CČN Kočevje	58
Slika 27: Vzorec nedehidriranega blata iz gnilišča	58
Slika 28: Tlorisni prikaz vzorčevalnih mest (CČN Kočevje) [41]	59
Slika 29: Aeroposnetek ČN Celje [48]	60
Slika 30: Zalogovnik za nedehidrirano blato na ČN Celje	61
Slika 31: Nedehidrirano blato v notranjosti zalogovnika	61
Slika 32: Tlorisni prikaz vzorčevalnih mest na ČN Celje [41]	61
Slika 33: Dehidrirano blato v velikem 30 m ³ zabojujniku	61
Slika 34: Shematski prikaz CČN Ljubljana [57]	62
Slika 35: Mokro blato med procesom dehidracije	63
Slika 36: Zunanji jekleni zalogovnik za dehidrirano blato na CČN Ljubljana	63
Slika 37: Odlagališče sadre	64
Slika 38: Odlagališče sadre	64
Slika 39: Vzorčevalna mesta meritev ob Velenjskem jezeru v občini Šoštanj [41]	65

SEZNAM PRILOG

Priloga A1: Razpadna veriga U-238

Priloga A2: Razpadna veriga Th-232

Priloga B1: Poročilo o meritvah radioaktivnosti vzorca blata s CCN Ljubljana

Priloga C1: Dopis, ki smo ga poslali pristojnim komunalnim podjetjem po Sloveniji

Priloga D1: Certifikat o kalibraciji za uporabljen merilni instrument FieldSPEC identiFINDER

OKRAJŠAVE

ALARA	Tako nizko kot je še smiselno dosegljivo
CČN	Centralna čistilna naprava
ČN	Čistilna naprava
EMS	Elektromagnetno sevanje
EPA	Ameriška agencija za varovanje okolja
EPRI	Ameriški elektroenergetski inštitut
EU	Evropska unija
GAC	Granulirano aktivno oglje
IAEA	Mednarodna Agencija za atomsko energijo
ICRP	Mednarodna komisija za varstvo pred sevanji
KČN	Komunalna čistilna naprava
NORM	Naravno prisotne radioaktivne snovi
TDS	Skupno raztopljene trdne snovi
TENORM	Tehnološko povišane koncentracije naravno prisotnih radioaktivnih snovi
UNSCEAR	Komite Združenih Narodov o učinkih atomske radiacije
URSJV	Uprava Republike Slovenije za Jedrsko Varnost
URSVS	Uprava Republike Slovenije za Varstvo pred Sevanji
ZDA	Združene države Amerike
ZVISJV	Zakon o Varstvu pred Ionizirajočimi Sevanji in Jedrski Varnosti

SIMBOLI IN ENOTE

Be	Berilij
Bi	Bizmut
C	Ogljik
Cs	Cezij
Fe	Železo
H	Vodik
I	Jod
K	Kalij
Mn	Mangan
Pb	Svinec
Po	Polonij
Ra	Radij
Rn	Radon
Th	Torij
U	Uran
Bq	Bekerel
eV	Elektron-volt
Gy	Gray
J	Joule
ppm	Parts per million
Sv	Sievert
$t_{1/2}$	Razpolovni čas
λ	Razpadna konstanta

1 UVOD

Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) oz. naravno prisotni radioaktivni materiali potencialno vključujejo vse radioaktivne elemente, ki jih najdemo na Zemlji in niso nastali kot posledica človeških dejavnosti. *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials* (TENORM) pa so naravno prisotni radioaktivni materiali, kjer so človeške dejavnosti povečale koncentracijo radionuklidov v primerjavi z naravno, prvotno situacijo. Radioaktivni elementi, kot so uran, torij, radij in radon, so najbolj pogosti primeri NORM. S tem pojmom torej razlikujemo med naravno prisotnimi radioaktivnimi materiali in antropogenimi viri radioaktivnih materialov, kot so jedrski reaktorji, pospeševalniki delcev, generatorji radionuklidov in jedrske eksplozije.

NORM se lahko pojavlja v različnih nejedrskih industrijskih procesih, pri čemer lahko pride do povišanja koncentracij radioaktivnih materialov oz. do nastanka TENORM. Med te procese spadajo rudarska industrija, pridobivanje nafte in zemeljskega plina, taljenje kovin, proizvodnja mineralnih peskov, fosfatna industrija itd. Prav tako pa se lahko povišane koncentracije naravnih radionuklidov pojavljajo tudi pri komunalnih dejavnostih, kot je priprava pitne vode in čiščenje odpadne vode.

Na področju NORM ni enotnih direktiv, veljavnih za celotno evropsko skupnost, zato je vsaka država članica pristojna za ustrezno zakonodajno ureditev NORM. V Sloveniji omenjeno področje pokriva Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji (ZVISJV) in uredbe, ki ga dopolnjujejo.

Izpostavljenost višjim stopnjam radioaktivnega sevanja odpira številne zdravstvene probleme za delavce v teh industrijah ter prebivalstvo. Zato je nujno potrebna identifikacija pojavljanja TENORM v Sloveniji. Leta 2004 je Institut Jožef Stefan pripravil poročilo z naslovom »Identifikacija TENORM v Sloveniji kot posledica preteklih dejavnosti in njihova inventarizacija« [9] o pojavljanju TENORM v slovenskih industrijah. V raziskavi ni bila zajeta industrija priprave pitne vode in čiščenja odpadne vode.

V diplomskem delu bomo naredili teoretični pregled pojavljanja TENORM v industrijah, ki so še vedno prisotne v Sloveniji ter z *in situ* meritvami empirično analizirali omenjeni industriji obdelave pitnih in odpadnih voda. Naše ravnanje utemeljuje načelo previdnosti: »uvajanje novih tehnologij, proizvodnih postopkov in izdelkov je dopustno le, če ob upoštevanju stanja znanosti in tehnike ter možnih varstvenih ukrepov ni pričakovati nepredvidljivih škodljivih učinkov na okolje ali zdravje ljudi« [50].

1.1 Hipoteze

Na začetku diplomskega dela predvidevamo:

- obstoječi postopki priprave pitne vode v Sloveniji ne povzročajo povišanih koncentracij NORM v odpadkih in ostankih,
- odpadno aktivno blato na empirično analiziranih čistilnih napravah po Sloveniji ne vsebuje povišanih koncentracij NORM.

1.2 Namen dela

Namen diplomskega dela je preveriti stanje oz. identificirati in izmeriti morebitne povišane koncentracije naravnih radionuklidov v komunalnih dejavnostih v Sloveniji ter predlagati ustrezne ukrepe za zaščito delavcev oz. prebivalstva pred ionizirajočim sevanjem. V primeru, da bi z meritvami zaznali povišane koncentracije NORM, bi bilo potrebno izvesti ukrepe, da bi znižali prejeto efektivno dozo delavcev in prebivalstva. Med standardne ukrepe za zniževanje izpostavljenosti radioaktivnosti štejemo:

- čim krajši čas izpostavljenosti radioaktivnemu sevanju
- čim večja razdalja med virom sevanja in delavcem
- v primeru možnosti aerosolnih izpustov zagotoviti delavcem ustrezne respiratorje
- skrbno analizirati in narediti načrt ravnanja z ostanki oz. odpadki, ki vsebujejo TENORM.

2 OSNOVE RADIOAKTIVNOSTI

Atomi so sestavni delci vsake snovi, ki se pri kemijskih reakcijah ohranjajo. Trenutno poznamo 118 kemijskih elementov, od tega jih samo prvih 98 najdemo v naravi, ostali so umetno pridobljeni [27]. Atomi istega elementa so med seboj lahko različni v številu nevtronov, atomi različnih elementov pa so si različni po številu protonov in elektronov.

Premeri atomov, npr. vodika so reda velikosti okrog 10^{-10} m. Atom sestavljajo jedro in elektroni, ki krožijo okoli jedra. Jedro atoma je približno 10.000 krat manjše od premera celega atoma (okrog 10^{-14} m), v jedru pa je tudi skoncentrirana glavnina mase atoma. Elektroni se gibljejo v atomu kot nekakšen oblak okoli jedra, ki določa zunanjo »mejo« atoma. Ta oblak imenujemo elektronska ovojnica in ta določa kemične, mehanske, električne in druge lastnosti elementa. Vsak atom istega elementa vsebuje enako število protonov, na tej podlagi pa so elementi tudi razdeljeni v periodni sistem. Število protonov v nevtralnem atomu se imenuje vrstno število, ki ga označimo s simbolom Z . Načeloma so atomi električno nevtralni, kar pomeni, da je negativni naboj elektronov enak pozitivnemu naboju jedra. Atom, ki pridobi ali izgubi elektrone, se spremeni v negativni ali pozitivni ion.

Za merjenje atomskih energij se uporablja energijska enota elektron-volt ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), ki je definirana kot energija, ki jo pridobi elektron, ko ga pospešimo z napetostjo 1 V. V atomu lahko elektroni zasedajo različna energijska stanja. Elektron lahko z višjega energijskega stanja »preskoči« v nižje energijsko stanje in pri tem odda razliko energije v obliki fotona (najmanjšega paketa elektromagnetnega sevanja). Odvisno od energijske razlike obeh energijskih stanj se lahko pri tem izseva foton vidne svetlobe ali foton rentgenske svetlobe, ki ga imenujemo tudi žarek X .

2.1 Jedro atoma

Za razumevanje nastanka radioaktivnega sevanja moramo poznati predvsem jedro atoma. Atomsko jedro je sestavljeno iz osnovnejših delcev, imenovanih nukleoni. Podvrsti nukleonov so protoni in nevtroni. Nevtroni so nevtralni, protoni pa imajo pozitiven osnovni naboj. Skupno število protonov in nevtronov v jedru se imenuje masno število A . Atom, čigar jedro ima določeno vrstno in masno število, imenujemo nuklid. Nuklid je popolnoma definiran z navedbo kemijskega elementa X in z nukleonskimi števili Z , N in A .

$$N = A - Z$$



Izkaže se, da lahko posamezen nuklid določimo že z navedbo kemijskega elementa in masnega števila:



Nuklidi z enakim vrstnim številom Z se imenujejo izotopi. Izotopi imajo torej enako število protonov oz. vrstno število Z , razlikujejo pa se v številu nevtronov (nevtronsko število N). Večina kemijskih elementov v naravi ima določeno izotopsko sestavo. Pojem izotopska sestava določa relativne masne deleže različnih izotopov v elementu. Na primer uran, ki ga najdemo v naravi, ima izotopsko sestavo: 0,0050 – 0,0059 % ^{234}U ; 0,7198 – 0,7202 % ^{235}U ; 99,2739 – 99,2752 % ^{238}U [26].

Znanih je več kot 3.300 nuklidov, od tega jih je le 255 stabilnih [28]. Vsa ostala jedra doživijo eno ali več jedrskih sprememb (radioaktivnih razpadov), dokler se ne spremenijo v stabilno jedro. Območje stabilnosti je določeno s takšnim razmerjem med protoni in nevtroni, da je notranja energija najnižja.

Nestabilni nuklidi se z notranjimi spremembami in oddajanjem delcev ter energije spreminjajo v stabilne. Temu procesu pravimo radioaktivni razpad, nestabilne nuklide pa imenujemo radioaktivni nuklidi ali radionuklidi.

2.2 Radioaktivno sevanje

Radioaktivno sevanje nastane, ko se pri radioaktivnem razpadu nestabilnih jeder notranja energija jedra zmanjša in se razlika energije spremeni v elektromagnetno valovanje ali delce, ki z veliko kinetično energijo izletijo iz jedra. Radioaktivni razpad poteka spontano in naključno, način in hitrost razpada sta odvisna samo od notranje zgradbe nestabilnega jedra. Na razpad zunanji dejavniki (npr. temperatura in tlak) nimajo vpliva. Definiramo lahko tudi razpadno konstanto λ , ki predstavlja verjetnost za razpad in je enolična za vsak posamezen radionuklid [59]:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

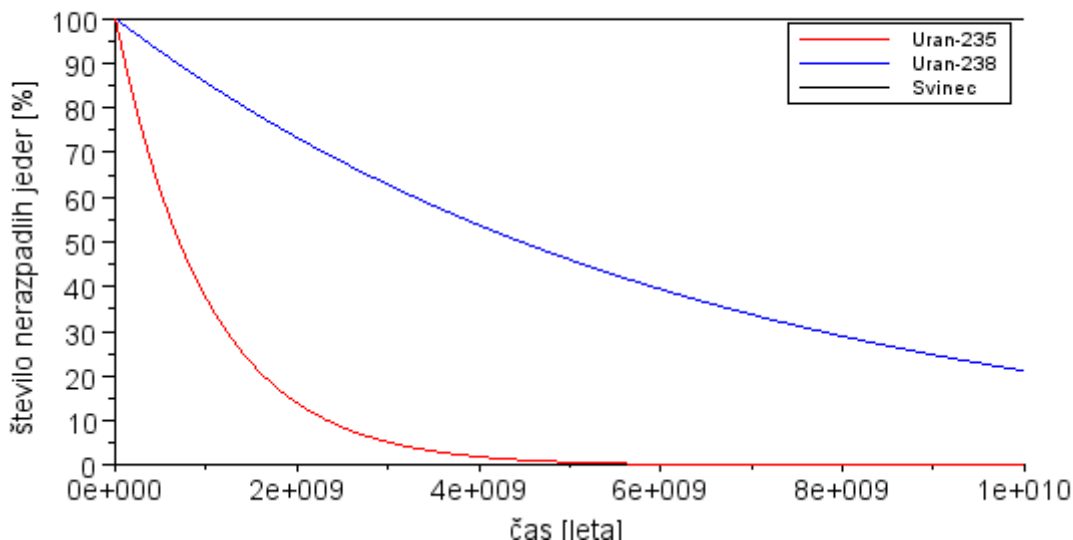
Število radioaktivnih jeder se eksponentno zmanjšuje s časom. Pri tem lahko definiramo razpolovni čas $t_{1/2}$ kot čas, v katerem se število radioaktivnih jeder zmanjša za polovico.

$$n(t) = n_0 * 2^{\left(-\frac{t}{t_{1/2}}\right)},$$

kjer je $n(t)$ število nerazpadlih jeder ob času t in n_0 začetno število jeder.

Radionuklide lahko glede na njihov razpolovni čas ločimo na kratkožive in dolgožive. Slednji imajo zelo velike razpolovne čase (reda velikosti 10^7 let in več), kar pomeni, da se število radioaktivnih jeder s časom zmanjšuje zelo počasi. Primer dolgoživega radionuklida je ^{238}U z razpolovnim časom $4,468 \cdot 10^9$ let [62], medtem ko ima kratkoživi radionuklid ^3H , razpolovni čas le 12,32 let [63]. Na sliki 1 vidimo odvisnost števila nerazpadlih jeder od časa za ^{235}U , ^{238}U in svinec. ^{238}U je tipičen predstavnik dolgoživih radionuklidov (majhen λ), ^{235}U pa lahko v primerjavi z njim opredelimo kot relativno

kratkoživega (velik λ). Najbolj dolgoživi pa so stabilni nuklidi, kot na primer svinec, pri katerem je razpadna konstanta $\lambda = 0$.



Slika 1: Odvisnost števila nerazpadlih jeter od časa oz. eksponentni zakon radioaktivnega razpada

Pri delu z radioaktivnimi viri je pomembno predvsem, koliko radioaktivnih jeter razpade v enoti časa, kakšne vrste razpad poteka in energija, ki jo ima izsevani delec. Potreben je podatek, kakšna energija sevanja se izseva v enoti časa in tip razpada. Tako lahko definiramo aktivnost vira kot produkt števila radioaktivnih jeter in razpadne konstante radionuklida. Aktivnost radioaktivnega vira se tako s časom spreminja enako kot število radioaktivnih jeter, kar pomeni, da se eksponentno zmanjšuje. Fizikalna enota aktivnosti je definirana kot 1 razpad na sekundo in se imenuje bekerel (Bq). Pogosto se uporablja tudi enota specifična aktivnost, to je aktivnost na enoto mase oz. volumna.

2.3 Radioaktivni razpadi

V naravi potekajo tri različne vrste radioaktivnega razpada, ki so določene z notranjo zgradbo jedra. Tako glede na vrsto sevanja, ki ga jedro ob razpadu oddaja, ločimo razpad alfa, razpad beta in razpad gama.

2.3.1 Razpad alfa

Alfa aktivna jedra so praviloma težka jedra, pri katerih zaradi močnih elektrostatskih odbojnih sil med protoni ni mogoče doseči stabilnosti. Jedro zmanjša svojo notranjo energijo tako, da odda delec alfa (helijevo jedro – dva nevtrona in dva protona). Delci alfa imajo kinetično energijo reda nekaj MeV oz. hitrost okrog 15.000 km/s. Zaradi relativno velike mase in nizke hitrosti se ustavijo že v zelo tanki plasti snovi. V zraku imajo doseg nekaj centimetrov. V gradbeništvu je še posebej pomemben plin radon (^{222}Rn), ki razpada z alfa razpadom. Sevanje alfa torej ne more penetrirati kože, največje

tveganje pa ta vrsta sevanja povzroči, če so alfa sevalci (npr. radon, torij in uran) zaužiti (ingestirani) ali vdihnjeni (inhalirani) [60].

2.3.2 Razpad beta

Beta aktivna jedra so jedra, pri katerih razmerje med številom protonov in nevtronov ne ustreza območju stabilnosti; imajo lahko bodisi presežek nevtronov, bodisi protonov. Jedra s presežkom nevtronov razpadajo z razpadom β^- , kjer se izseva elektron, jedra s presežkom protonov pa z razpadom β^+ , kjer se izseva pozitron – antidelec elektrona oz. elektron s pozitivnim nabojem. Energije delcev beta znašajo od nekaj 10 keV do 1 MeV. So bolj prodorni kot delci alfa. V zraku imajo doseg nekaj metrov, v kovinah (aluminij) nekaj milimetrov. V naravi poteka le β^- razpad, β^+ razpadi pa so bolj pogosti le pri umetno pridelanih radionuklidih. Znan naravni beta sevalec je ^{228}Ra , ki lahko penetrira zunanje plasti kože, vendar večje tveganje povzroča njegova ingestija ali inhalacija [61].

2.3.3 Razpad gama

Jedro, ki nastane po alfa ali beta razpadu, je pogosto v vzbujenem energijskem stanju. Vzbujejeno jedro ni stabilno, zato običajno hitro preide v osnovno stanje. Višek energije pri prehodu jedra v nižje oz. osnovno energijsko stanje, pa odnese en ali več fotonov, ki izletijo iz jedra. Seštevek energij fotonov ustreza razliki med energijskima stanjema jedra in je reda velikosti MeV. Razpad gama je torej prehod med vzbujenimi stanji jedra. Fotoni, ki se sprostijo pri prehodu, pa se imenujejo žarki gama. Ti žarki imajo precej višjo energijo od rentgenskih žarkov, zato so tudi bolj prodorni. Pri razpadu gama se torej notranja sestava jedra ne spremeni (število protonov in nevtronov ostane nespremenjeno), z njim se jedro le »ohladi«.

Eksterna izpostavljenost gama sevalcem (npr. ^{226}Ra , sevalec alfa in gama) je nevarna zaradi velike penetracijske globine gama žarkov. Zaščita pred gama žarki zahteva veliko količino mase na površino. Zaradi tega je svinec samo 20 do 30 % boljši ščit kot pa enaka masa drugih materialov, kot so aluminij, beton, voda ali tla. Prednost svinca je v kompaktnosti - zaradi visoke atomske gostote in težkih jeder. Višja kot je energija gama žarkov, debelejši ščit je potreben. Materiali za zaščito pred žarki gama se običajno merijo z debelino, potrebno za zmanjšanje intenzitete žarkov za polovico (ang. *half value layer* - *HVL*). Tako na primer enako zmanjšanje intenzitete žarkov gama z določeno energijo dosežemo z 1 cm svinca, 6 cm betona ali 9 cm kompaktne zemljine [29].

2.4 Pregled ionizirajočih sevanj

Elektromagnetna sevanja nastanejo kot posledica gibanja električno nabitih delcev. Ti delci so elektroni, ki imajo negativni električni naboj in protoni, ki imajo pozitivnega. Spreminjajoče se električno polje proizvaja spreminjajoče se magnetno polje in tako ta proces ustvari elektromagnetno sevanje (EMS). EMS potuje skozi prazen prostor s svetlobno hitrostjo (~ 300.000 km/s). To sevanje

lahko opišemo s frekvenco ali energijo. Višja frekvenca sevanja pomeni višjo energijo. EMS se glede na njihovo energijo delijo na ionizirajoča in neionizirajoča.

Foton je elektromagnetno valovanje in njegova energija je obratno sorazmerna z valovno dolžino valovanja. Z vidika varstva pred sevanji so posebej zanimiva tista sevanja, ki imajo valovne dolžine krajše od 100 nm, oz. energijo višjo od 10 eV [30]. EMS s tako energijo je sposobno »odtrgati« oz. izbiti elektrone iz atomov v snovi, skozi katero se giblje. Med prehodom sevanja, z dovolj visoko energijo fotonov v snovi, nastajajo ionski pari. Ta pojav imenujemo ionizacija in takšno sevanje ionizirajoče sevanje. V elektromagnetnem spektru sodijo med ionizirajoča sevanja del ultravijoličnega spektra ter rentgensko in gama sevanje.

Rentgensko sevanje je leta 1895 odkril nemški fizik Wilhelm Röntgen. Radioaktivnost pa je odkril Henri Becquerel leto pozneje na podlagi razpadov posameznih izotopov. Veliko znanstvenikov je nato raziskovalo ta pojav in predvsem njegovo uporabo v medicini. To je vodilo v identifikacijo različnih tipov sevanja kot posledica razpada atomskih jeder in razumevanje narave atomov. Nevtroni (delci brez naboja) so bili odkriti leta 1932, ob koncu 30. let prejšnjega stoletja pa je bila odkrita jedrska cepitev oz. jedrska fisija z obstreljevanjem urana z nevtroni, kar je vodilo v kontrolirano količino cepitev jeder in posledično obvladovanje energije.

Radioaktivnost in ionizirajoče sevanje sta na Zemlji prisotna že vse od njenega nastanka oz. od t.i. »velikega poka«. Tako je določena izpostavljenost temu sevanju kontinuirana in neizogibna za vsa živa bitja na Zemlji. Ločimo dva glavna vira naravne izpostavljenosti: visokoenergijske kozmične delce, ki vstopajo skozi Zemljino atmosfero (naravno kozmično sevanje) in radionuklide, ki izvirajo iz zemeljske skorje (naravno zemeljsko sevanje) ter so prisotni povsod v naravnem okolju in organizmih.

Tudi kozmično sevanje je ionizirajoče sevanje, ki prihaja iz vesolja. Prispeva pomemben delež k naravnemu ozadju, oz. naravni obsevanosti ljudi. Izpostavljenost kozmičnemu sevanju narašča z nadmorsko višino. Kozmogeni radionuklidi nastajajo kot posledica kozmičnega sevanja. Imajo razmeroma kratke razpolovne čase, a stalno nastajajo z jedrskimi reakcijami, ki jih v ozračju povzroča kozmično sevanje. Najpomembnejši kozmogeni radionuklidi so tritij (^3H), berilij (^7Be) in ogljikov izotop (^{14}C) [51].

V zemeljski skorji so problematični zelo dolgoživi radionuklidi, ki imajo tako dolg razpolovni čas, da od nastanka Zemlje še niso razpadli. Mednje sodijo ^{232}Th , ^{235}U in ^{238}U ter njihovi radioaktivni potomci, ki tvorijo radioaktivne verige, ki se končajo s svincem, ki je stabilen. Pomembna radionuklida uranove razpadne verige sta tudi radij in njegov potomec, brezbarvni žlahtni plin radon (^{222}Rn).

Druga velika skupina ionizirajočih sevanj pa so umetni radioaktivni viri, ki jih je ustvaril človek oz. so posledica človekovih dejavnosti. Z umetnimi viri se ukvarjajo jedrska fizika, medicina, radiologija, najpomembnejši vir umetnih radionuklidov pa so jedrski in oplojevalni reaktorji.

Razvoj znanosti o sevanju se je začel l. 1895 z odkritjem rentgenskih žarkov. Kmalu zatem so radioaktivne snovi začeli uporabljati v fiziki, kemiji in medicini, niso pa se zavedali, da prekomerna izpostavljenost ionizirajočim sevanjem lahko povzroči resne biološke posledice. Razmeroma kmalu se je tako razvila posebna znanstvena disciplina varstvo pred sevanji. Danes so biološke posledice ionizirajočih sevanj obširno raziskane in poznane, še vedno pa je edina možnost iz podatkov kratkotrajne visoke izpostavljenosti sevanju ovrednotiti tveganje zaradi dolgotrajne, a nizke izpostavljenosti sevanju pri poklicno izpostavljenih delavcih.

2.5 Dozimetrične količine

2.5.1 Absorbirana doza D

Kvantitativni opis sevanja zahteva uvedbo določenega nabora fizikalnih količin in enot. Osnovna dozimetrična količina se imenuje absorbirana doza, ki je definirana kot energija sevanja, ki se absorbira v enoti mase oz. $D = \frac{d\bar{E}}{dm}$, kjer je $d\bar{E}$ povprečna energija, ki jo ionizirajoče sevanje odda snovi v danem prostorninskem elementu, dm pa je masa snovi v tem prostorninskem elementu [23]. Enota za absorbirano dozo se imenuje gray (Gy) in je definirana kot: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. Pogosto se uporabljata tudi manjši enoti mikro in mili Gy.

Druga količina, ki jo uporabljamo, pa je hitrost absorbirane doze, ki nam pove, kako hitro (s časom) se povečuje oz. spreminja absorbirana doza v nekem telesu oz. tarči. Za hitrost absorbirane doze se uporabljajo enote $\mu\text{Gy/h}$, mG/h ...

2.5.2 Ekvivalentna doza H

Do sedaj še ni bilo dokazano, da bi bili učinki sevanja direktno sorazmerni absorbirani dozi. Poleg energije, ki jo sevanje odloži v organizmu, je stopnja bioloških poškodb oz. posledic odvisna tudi od vrste vpadnega sevanja ter včasih tudi od energije delcev. Biološki učinki naraščajo z močjo ustavljanja delcev, ki se imenuje tudi linearni prenos energije (ang. *linear energy transfer* - *LET*). To pomeni, da pri enaki absorbirani dozi delci z visokim LET (delci alfa ter nevtroni) povzročijo večjo škodo, kot delci z nižjim LET (delci beta in gama). Odvisnost bioloških posledic od linearnega prenosa energije lahko matematično opišemo z utežnim faktorjem sevanja w_R , ki upošteva razlike različnih sevanj. Za oceno stopnje bioloških poškodb vpeljemo novo dozimetrično količino, imenovano ekvivalentna doza, ki je definirana kot produkt absorbirane doze ter utežnega faktorja sevanja oz. $H = w_R \cdot D$. Enota za ekvivalentno dozo je sievert (Sv). Podobno kot za absorbirano dozo,

tudi pri ekvivalentni dozi velja: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$, pri $w_R = 1$. Utežni faktor sevanja w_R je določen v preglednici 1 [23].

Preglednica 1: Utežni faktorji sevanja za različne energije ionizirajočih sevanj [23]

Vrsta in območje energije sevanja	w_R
Fotoni, elektroni in mioni, vse energije	1
protoni, razen odzivnih protonov, energija $> 2 \text{ MeV}$	5
nevtroni, energija; $< 10 \text{ keV}$; $> 20 \text{ MeV}$	5
nevtroni, energija; $10 - 100 \text{ keV}$; $> 2 - 20 \text{ MeV}$	10
nevtroni, energija; $> 0,1 - 2 \text{ MeV}$	20
delci alfa, cepitveni produkti, težka jedra	20

Podobno kot pri absorbirani dozi lahko definiramo tudi hitrost ekvivalentne doze, ki nam pove, kako hitro se povečuje ekvivalentna doza v tarči. Za hitrost ekvivalentne doze se uporabljajo enote Sv/h, mSv/h, $\mu\text{Sv/h}$ in nSv/h.

2.5.3 Efektivna doza E

Biološke posledice so različne, če je z določeno ekvivalentno dozo obsevano celo telo ali samo del telesa oz. organ. Prav tako vsi organi niso enako občutljivi na sevanje, kar pomeni, da enaka ekvivalentna doza v nekaterih organih povzroči bolj škodljive učinke oz. posledice kot v drugih. Zato definiramo novo količino »efektivna doza« kot vsoto uteženih ekvivalentnih doz od notranjega in zunanega obsevanja po vseh tkivih in organih telesa oz. z enačbo: $E = \sum_T w_T \cdot H_T$, kjer je w_T tkivni utežni faktor podan v preglednici 2 [23].

Preglednica 2: Tkivni utežni faktorji [23]

Tkivo ali organ	w_T
reproduktivni organi	0,2
rdeči kostni mozeg; debelo črevo; pljuča; želodec	0,12
mehur; prsi; jetra; požiralnik; ščitnica	0,05
koža; pokostnica	0,01
drugi organi	0,05

Enota za efektivno dozo je enaka enoti za ekvivalentno dozo. Uporaba koncepta efektivne doze pa je smiselna samo pri nizkih dozah, saj tudi vrednosti tkivnih utežnih faktorjev veljajo le za nizke doze.

3 BIOLOŠKI UČINKI IONIZIRAJOČEGA SEVANJA

3.1 Učinki sevanja na celico

Celice so osnovni gradniki živih organizmov. Da lahko razumemo učinke ionizirajočega sevanja na živa bitja, moramo v grobem razumeti sestavo celice in procese, ki potekajo v celicah. Celica je najmanjši samostojni del organizma. V grobem je celica sestavljena iz citoplazme in različnih organelov. Najpomembnejši organel je celično jedro, ki ima glavno vlogo pri delitvi celice. Naraven proces je odmiranje starih in nastanek novih celic v telesu. Podlaga za to je delitev celice oz. mitoza. V celičnem jedru je zbran genski material, ki je zelo pomemben za natančno delitev celic. Glavna sestavina genskega materiala je skupek prepletenih nitk makromolekul, t.i. deoksiribonukleinske kisline (DNK). Kadar pride do poškodb DNK, to posledično lahko pomeni napake pri novo nastalih celicah [64].

Večina atomov v človeškem telesu je vezanih v molekule. Molekularne vezi tvorijo elektroni, zato lahko sevalna ionizacija povzroči razbitje molekul ali pa tvorbo pozitivnih radikalov iz prej nevtralnih molekul. Ko ionizirajoče sevanje pretrga organsko molekulo v celici, to imenujemo neposredni učinek ionizirajočega sevanja. Prav tako poznamo posredni učinek ionizirajočega sevanja, kar pomeni, da sevanje ionizira vodo v celici, pri čemer pride do radiolize vode. Med produkti radiolize nastajajo prosti hidroksilni radikali. Hidroksilni radikali so močni oksidanti, ki agresivno vplivajo na sestavne dele celice tako, da razbijajo druge molekule. Tako neposredni kot posredni učinek sta kemična procesa [64].

Ionizirajoče sevanje lahko na različne načine poškoduje celice. Izkaže se, da je na sevanje najbolj občutljivi del celice njeno jedro oz. kromosomi. Posledično so učinki sevanja najbolj izraziti na organih, katerih celice se najhitreje delijo, kot so kostni mozeg, limfne žleze, vranica, črevesje, želodec, jetra in reproduktivni organi. Celice, katerih delitev ne poteka tako pogosto, so zato manj občutljive na poškodbe ionizirajočih sevanj, kot je živčevje in mišično tkivo [64].

Študije kažejo, da lahko zelo natančno izmerimo odmiranje celic v odvisnosti od doze pri kratkotrajni akutni dozi sevanja. Vidimo lahko, da sevanje alfa z visokim linearnim prenosom energije (LET) pri isti absorbirani dozi povzroči mnogo večje odmiranje celic kot sevanji beta in gama z nizkim LET. Ta pojav tudi pojasni, zakaj za opis bioloških učinkov ionizirajočega sevanja potrebujemo ekvivalentno dozo, ki vključuje utežni faktor sevanja. Sklepamo lahko, da pri nizkih dozah in pri sevanjih z nizkim LET v celicah obstaja določena sposobnost popravljanja napak, ki zmanjšuje število odmrlih celic.

Če se poškodovane celice delijo naprej, torej ne odmrejo, lahko pride do mutacij. Mutacije povzročijo nenormalno delovanje posameznih organov ali pa povečanje delitev celic v nekem tkivu ali organu. Tako lahko nastane rak [65].

3.2 Učinki sevanja na človeka

Učinki sevanj na človeka še niso popolnoma raziskani. V radiološki in medicinski fiziki obstaja več fizikalnih modelov, ki predpostavljajo učinke ionizirajočega sevanja na človeka, najbolj uporabljen in priznan pa je linearni model brez praga oz. ang. *linear no-threshold* model (LNT) [3]. Ta model predpostavlja, da kakršnokoli ionizirajoče sevanje škoduje človeku ne glede na hitrost doze. Dolgotrajna izpostavljenost nizkim dozam sevanja se tako smatra enako kot kratkočasno izpostavljanje veliki hitrosti doze.

Ameriški energetske institut (EPRI) je leta 2009 opravil sistematični pregled nedavno objavljenih znanstvenih študij na področju epidemiologije in radiobiologije, ki so raziskovale tveganje za zdravje z izpostavljenostjo ionizirajočemu sevanju z nizkimi dozami. Tveganje za nastanek raka je bilo historično ocenjeno s predpostavko, da je frekvenca tveganja opazovana pri visokih dozah proporcionalna frekvenci tveganja pri nizkih dozah; ta pristop LNT temelji na študijah preživelih ljudi iz napadov atomskih bomb. Trenutno je LNT še vedno uradna podlaga za oceno tveganja. Poročila UNSCEAR, ICRP in BEIR zaključujejo, da ni dovolj dokazov, da bi spremenili to podlago. Poročilo Francoske akademije pa poudarja celične popravne mehanizme, ki lahko eliminirajo poškodovane celice in tako kot edina obravnavana institucija zaključuje, da LNT model ni več verjeten [2].

Zaključki EPRI analize so:

- nedavne radiobiološke študije na področju nizkih doz dokazujejo, da so biološki učinki drugačni od tistih v področju visokih doz,
- če je sevanje prejeta z nizko dozno hitrostjo oz. v daljšem časovnem intervalu, je veliko manj učinkovito pri povzročanju bioloških sprememb kot pa, če je enaka doza prejeta v kratkem času. Zato je mogoče, da so tveganja zaradi učinkov nizkih doznih hitrosti precenjena,
- iz epidemiološke perspektive je individualna doza 100 mSv v enkratni izpostavljenosti prenizka, da bi zaznali detekcijo statističnega povečanja rakastih obolenj glede na naravno pojavnost raka,
- raziskave učinkov na zdravje zaradi nizkih doz naj se nadaljujejo s holističnim, sistemskim pristopom, da se razvije modele odnosa med dozo in učinki na področju nizkih doz,
- nedavne študije katarakte (sive mreže) predlagajo ponovno oceno oz. možno znižanje dozne meje za očesne leče. Takšno znižanje bi lahko imelo učinek na delavce v jedrski industriji ter radiologe,
- nove paradigme in epidemiološki dokazi na področju nizkih doz bodo direktno uporabni za uveljavitev novih standardov in odločitev v prihodnje.

Glede na ugotovitve inštituta EPRI je v prihodnosti mogoče pričakovati spremembo modela na podlagi dokazov, da imajo celice pri nizkih dozah resnično popravne mehanizme.

Biološke učinke sevanja na človeka lahko delimo na somatske (pojavi se pri obsevani osebi) in genetske (pojavi se pri potomcih obsevane osebe) ter na deterministične (zanesljivo se pojavijo nad določeno dozo prejetega sevanja) in stohastične (z določeno verjetnostjo se pojavijo le na določenem deležu obsevanih oseb).

Pri tem je potrebno upoštevati tudi, kako je prejeta efektivna doza:

Na določen časovni interval:

- akutno (visoka doza v kratkem času),
- kronično (dolgotrajna izpostavljenost z nizkimi dozami),

ali na določeno lokacijo:

- lokalno (izpostavljen je samo določen organ ali del telesa),
- totalno (izpostavljeno je celo telo).

3.3 Deterministični učinki sevanja

Deterministični učinki sevanja so tisti, ki se po obsevanju z dovolj visoko dozo zanesljivo pojavijo, torej je stopnja poškodb odvisna od absorbirane doze. Pri tem je pomemben dozni prag oz. najmanjša doza, pri kateri se ti učinki z določeno verjetnostjo pojavijo. Med deterministične učinke sodijo pordečitev kože (eritem), izpadanje las, zmanjšanje števila rdečih krvnih teles (anemija), slabost in bruhanje (nausea), siva mrena (katarakt), driska ... V preglednici 3 je prikazan verjetni deterministični učinek, ki je odvisen od prejete doze.

Preglednica 3: Ocenjene mejne vrednosti determinističnih učinkov sevanja in povzročene poškodbe na človeških organih [3]

Organ	Učinek	Akutna izpostavljenost [Sv]	Kronična izpostavljenost [Sv]
Testis	Permanentna sterilnost	3,5 - 6,0	2,0
Jajčnik	Permanentna sterilnost	2,5 - 6,0	> 0,2
Očesna leča	Motnost leče	0,5 - 2	> 0,1
	Siva mrena	5,0	> 0,15
Kostni mozeg	Onemogočena proizvodnja krvničk	0,5	> 0,4

Zaščitimo se lahko tako, da poskrbimo, da so doze, ki jih prejmejo posamezni organi, nižje od doznega praga. S tem zelo zmanjšamo verjetnost nastanka bolezenskih sprememb.

3.4 Stohastični učinki sevanja

Resnost stohastičnih učinkov izpostavljenosti radioaktivnemu sevanju je neodvisna od absorbirane doze. Za stohastične učinke lahko napovemo le verjetnost za njihov pojav. Minimalne doze, pod

katero učinki ne bi bil možni, se ne da dokazati. Verjetnost za bolezensko stanje se povečuje z naraščajočo dozo. Poudariti je potrebno, da je nemogoče neizpodbitno povezati pojav bolezenskega stanja z izpostavljenostjo sevanju kot pri determinističnih učinkih, ugotovimo lahko le statistično povečanje bolezenskih stanj nad njihovo povprečno pojavnostjo. Glavna stohastična učinka sta rak in genetske spremembe na potomcih obsevanih ljudi. Glavnino podatkov o dodatnem obolevanju za rakom so raziskovalci pridobili z opazovanjem preživelih iz Hirošime, Nagasakija in nekaterih drugih jedrskih nesreč. Za te situacije je bilo značilno, da so posamezniki prejeli sorazmerno velike doze sevanja. Tako je bilo ugotovljeno, da je pri visokih dozah verjetnost za pojav raka sorazmerna s prejetjo dozo. Pri nizkih dozah pa tega ni mogoče statistično dokazati. Tako se je oblikovala linearna hipoteza brez praga (LNT), kar pomeni, da je tudi pri nizkih dozah tveganje za raka sorazmerno in da ne obstaja določen prag varne doze [2].

4 PROBLEMATIKA TER DEFINICIJA NORM IN TENORM

Naravno prisotne radionuklide najdemo v številnih naravnih virih oz. surovinah. Problematične so predvsem višje koncentracije teh radionuklidov, ki so pogoste v določenih geoloških materialih, kot so magmatske kamnine in rude. Kljub temu pa nedotaknjeno naravno stanje ne predstavlja problema za prebivalstvo, čeprav je na določenih področjih na svetu lahko naravno sevanje ozadja tudi za faktor 10 večje od svetovnega povprečja, npr. območje Kerala v Indiji [51].

Problem pa lahko nastane pri človeških aktivnostih, ki izkopavajo, predelujejo in izrabljajo naravne vire. Različne industrijske dejavnosti tako lahko vodijo v tehnološko povišane koncentracije naravnih radionuklidov, kar poznamo pod kratico TENORM.

V viru [[11], str. 1] je podana definicija: »Akronim NORM obsega vse naravno prisotne radioaktivne materiale, kjer so človeške dejavnosti povečale potencial za izpostavljenost v primerjavi s prvotno situacijo. Koncentracije radionuklidov so se morda povečale (TENORM) ali pa tudi ne.«

Odpadki in ostanki, ki vsebujejo (TE)NORM v industrijskih procesih izven jedrske industrije, so se v zadnjih treh desetletjih razvili iz malo poznanega problema do teme, ki prejema veliko globalne pozornosti. Pomembni razlogi za naraščajočo skrb so: velike količine odpadkov in drugih materialov, ki vsebujejo NORM, potencialno dolgoročna ogroženost zaradi dejstva, da NORM sestavljajo dolgoživi radionuklidi z relativno visoko radiotoksičnostjo ter večja verjetnost za izpostavljenost javnosti produktom in odpadkom z vsebnostjo NORM kot pri večini drugih radioaktivnih virov [11].

5 ZAKONODAJA

Na področju jedrske fizike in varstva pred ionizirajočimi sevanji obstaja na mednarodnem nivoju precej internacionalnih teles in organizacij, ki preučujejo učinke sevanja, izdajajo priporočila ter vršijo nadzor nad uporabo jedrskih programov. V nadaljevanju bomo predstavili evropsko in slovensko zakonodajo, ki neposredno in posredno ureja področje NORM.

5.1 Pregled mednarodnih organizacij in sporazumov

5.1.1 Mednarodna Agencija za atomsko energijo (IAEA)

IAEA je neodvisna, medvladna organizacija, ki temelji na znanosti in tehnologiji. Deluje v okviru Združenih narodov ter služi kot osrednja točka za globalno sodelovanje na področju reaktorske tehnike in zaščite. Zavzemajo se za pomoč svojim državam članicam v okviru socialnih in ekonomskih ciljev in pri načrtovanju ter uporabi jedrske znanosti in tehnologije za različne miroljubne namene, vključno s proizvodnjo električne energije ter prenosom novih tehnologij in znanja v svoje države članice.

IAEA razvija jedrske varnostne standarde in na podlagi teh standardov spodbuja doseganje in vzdrževanje visoke ravni varnosti pri uporabi jedrske energije, prav tako pa se zavzema za varstvo zdravja ljudi in okolja pred ionizirajočimi sevanji.

Njena naloga je tudi preverjanje prek lastnega kontrolnega sistema, da njene države članice izpolnjujejo svoje obveznosti v skladu s pogodbo o neširjenju jedrskega orožja in drugih sporazumov za uporabo jedrskega materiala in objektov le v miroljubne namene [32].

5.1.2 Komite Združenih Narodov o učinkih atomske radiacije (UNSCEAR)

UNSCEAR je ustanovila Generalna skupščina Združenih Narodov leta 1955. Njegov mandat je ocenjevanje, ovrednotenje ter poročanje o nivojih in učinkih izpostavljenosti ionizirajočemu sevanju. Mnogo nacionalnih vlad in organizacij po svetu se zanaša na ocene UNSCEAR, kot znanstveno podlago za vrednotenje tveganja izpostavljenosti sevanju ter za določanje zaščitnih ukrepov.

Člani Komiteja so ugledni znanstveniki iz 27 držav, ki jih je izbrala Generalna skupščina združenih narodov (GSZN). Od ustanovitve je Komite izdal 20 obsežnih publikacij, ki predstavljajo osnovni vir avtoritativnih informacij.

Program dela Komiteja je odobren s strani GSZN in posamezen cikel se običajno razteza od 4 do 5 let. Sekretariat zbira ustrezne podatke, ki jih predložijo države članice ZN, mednarodne organizacije in nevladne organizacije ter vključi strokovnjake, ki te podatke analizirajo, preučijo znanstveno literaturo in izdelajo znanstvene ocene in poročila. Sekretariat predloži te ocene letno za pregled na vsaki seji UNSCEAR in na koncu cikla objavi končno poročilo oz. publikacijo [33].

5.1.3 Mednarodna komisija za varstvo pred sevanji (ICRP)

Delo ICRP pomaga pri preprečevanju raka in drugih bolezni ter učinkov, povezanih z izpostavljenostjo ionizirajočemu sevanju ter pri zaščiti okolja.

Od leta 1928 ICRP razvija, vzdržuje in pripravlja mednarodni sistem varstva pred sevanji, ki se uporablja po vsem svetu kot skupna podlaga za standarde, predpise, smernice, programe in prakso na področju radiološke zaščite.

Komisija je od svoje ustanovitve objavila že več kot sto poročil o vseh vidikih varstva pred sevanji. Večina jih obravnava določeno področje znotraj varstva pred sevanji, vendar nekatere publikacije, t.i. temeljna priporočila, vsako posebej pokriva celoten sistem varstva pred sevanji. Mednarodni sistem varstva pred sevanji je ICRP razvil na podlagi sedanjega razumevanja znanosti na področju izpostavljenosti sevanju ter vrednostnih sodb. Te vrednostne sodbe upoštevajo družbena pričakovanja, etiko ter pridobljene izkušnje pri uporabi sistema.

ICRP je ugledna neodvisna mednarodna organizacija z več kot 200 prostovoljci iz približno 30 držav na šestih celinah. Njeni člani predstavljajo vodilne znanstvenike in strokovnjake na področju varstva pred sevanji. Financira se s pomočjo številnih tekočih prispevkov različnih organizacij z interesom izboljšati mednarodno zaščito pred sevanji [34].

Skozi desetletja delovanja organizacije so prihajala nova spoznanja in ugotovitve glede učinkov ionizirajočih sevanj. V skladu z novimi spoznanji je ICRP z leti zniževala priporočene mejne doze. Zadnja veljavna učinkovita mejna doza je tako od leta 1990 (ICRP Publication 60) postavljena pri 20 mSv/leto za poklicno izpostavljene delavce ter 1 mSv/leto za prebivalstvo. Najnovejša publikacija z enako tematiko ICRP Publication 103 iz leta 2007 je obdržala večino obstoječih priporočil. Trenutna slovenska zakonodaja je tako skladna s priporočili iz publikacije ICRP 60.

ICRP je vzpostavila sistem omejevanja izpostavljenosti sevanju, ki temelji na treh principih:

- upravičenost: sevalna dejavnost se lahko izvaja le, če so neto koristi večje od škode,
- optimizacija: vsaka izpostavljenost mora biti zadržana na razumnem minimumu (ALARA), pri čemer se morajo upoštevati tudi socialno-ekonomski faktorji,
- omejitev: prejete individualne doze ne smejo prekoračiti mejnih priporočenih doz [35].

5.1.4 Ameriški energetski institut (EPRI)

EPRI opravlja raziskave in razvoj v zvezi s proizvodnjo, dobavo in uporabo električne energije v korist javnosti. Je neodvisna in neprofitna organizacija, ki združuje znanstvenike in inženirje ter strokovnjake iz univerz in industrije, ki ji pomagajo pri spopadanju z izzivi na področju električne energije. EPRI tudi zagotavlja tehnologijo, politiko ter ekonomske analize, ki poganjajo dolgoročne raziskave in razvoj. Člani EPRI predstavljajo proizvajalce več kot 90 % proizvedene elektrike v ZDA,

aktivno mednarodno sodelovanje pa zajema 40 držav. Glavni sedež EPRI se nahaja v Kaliforniji, ZDA [36].

5.2 Evropska direktiva 96/29/EURATOM

Evropska direktiva 96/29/EURATOM iz leta 1996 določa osnovne varnostne standarde (ang. *Basic Safety Standards*) za varovanje zdravja poklicno izpostavljenih delavcev ter prebivalstva pred nevarnostmi zaradi izpostavljenosti ionizirajočemu sevanju. Direktiva je v veliki meri prevzela priporočila ICRP, prav tako pa predstavlja obvezujočo podlago za prenos v nacionalne zakonodaje držav članic. Direktiva predpisuje maksimalne omejitve, posamezne države članice pa lahko po svoji presoji predpišejo tudi strožje vrednosti.

Nekaj pomembnih določb iz direktive [15]:

- najvišja efektivna doza za izpostavljene delavce je 100 mSv v obdobju zaporednih 5 let in največ 50 mSv v enem letu,
- letna omejitev ekvivalentne doze za oko je 150 mSv, za kožo, roke, podlakti, stopala in gležnje je 500 mSv,
- izjemoma, izključujoč izredne dogodke, lahko poklicne doze za določene delavce presežejo gornje omejitve, če so te izjeme časovno in krajevno omejene in pod pogojem, da so znotraj omejitve za petletno obdobje,
- omejitve doz za študente in praktikante, starejše od 18 let, so enake kot za delavce. Za študente in praktikante v starosti od 16 do 18 let pa so omejene na celotelesno dozo 6 mSv na leto. V tej starostni skupini so nižje tudi letne omejitve za oči (50 mSv), kožo (150 mSv) in roke (150 mSv),
- najvišja dovoljena doza za prebivalstvo je 1 mSv. V posebnih primerih je lahko dovoljena višja efektivna doza, pod pogojem, da povprečje v petih zaporednih letih ne presega 1 mSv na leto,
- najvišja letna ekvivalentna doza prebivalstva za oči je 15 mSv in 50 mSv za kožo,
- delo z viri sevanja mora biti organizirano na način, da je izpostavljenost prebivalstva čim nižja v okviru razumnih možnosti (načelo ALARA),
- poklicno izpostavljeni delavci so razdeljeni v dve kategoriji. Za delavce kategorije A predvidevamo, da bi lahko dobili letno dozo več kot 6 mSv oziroma ekvivalentne doze oči, kože in okončin večje od 3/10 ustrezne omejitve. Delavci kategorije B pa delajo v območjih, kjer lahko dobijo dozo več kot 1 mSv/leto. Dejansko prejete doze morajo biti seveda individualno merjene z ustreznimi dozimetri. Prav tako je potrebno upravičiti razvrstitev delavcev v kategorijo B. V primeru nesreče je potrebno določiti prejete doze in njihovo porazdelitev v telesu,

- prejete doze vsakega poklicno izpostavljenega delavca je potrebno dokumentirati in jih hraniti do starosti delavca 75 let oziroma najmanj 30 let po prenehanju njegovega dela z viri sevanja,
- delavci kategorije A morajo pri pooblaščenem zdravniku opraviti zdravniški pregled pred zaposlitvijo in nato najmanj enkrat na leto,
- dodatno pa direktiva določa tudi meje izvzetja oz. absolutne in specifične aktivnosti radionuklidov, pod katerimi se jih ne obravnava kot vire sevanja.

5.3 Slovenska zakonodaja

Osnovni zakon, ki ureja varstvo pred ionizirajočimi sevanji ter uporabo virov sevanja v Sloveniji, je Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV). Prvo verzijo zakona je leta 2002 sprejel zakonodajni organ (Državni zbor RS), vsebuje pa splošne, prehodne ter kazenske določbe. Podrobnosti in izvršilna določila pa urejajo izvršilni predpisi, kot so uredbe (sprejete s strani vlade RS) in pravilniki (sprejeti s strani ministrstev). Trenutno zakon podpira šest uredb vlade, deset pravilnikov ministrstva, pristojnega za okolje in prostor, deset pravilnikov ministrstva, pristojnega za zdravje ter dva pravilnika ministrstva, pristojnega za notranje zadeve.

Predpisi, ki obravnavajo tehnološko povišane vire naravne radioaktivnosti (TENORM) so:

- Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV), Ur. l. RS št. 67/2002, 24/2003, 50/2003, 46/2004, 102/2004, 60/2011,
- Uredba o sevalnih dejavnostih (UV1), Ur. l. RS št. 48/2004, 9/2006,
- Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih (UV2), Ur. l. RS št. 49/2004.

S temi predpisi so določbe Direktive Sveta št. 96/29/EURATOM dokončno implementirane v slovensko zakonodajo.

5.3.1 Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV)

- *2. člen, odstavek (3): »Določbe tega zakona se glede varstva ljudi pred ionizirajočimi sevanji ne uporabljajo za izpostavljenost naravnemu sevanju, kot so obsevanost od radionuklidov, ki jih vsebuje človeško telo, od kozmičnega sevanja na površini tal ali radionuklidov, ki se nahajajo v nedotaknjeni zemeljski skorji.«* S to določbo je definirana izključitev veljavnosti zakona za prvotno, naravno stanje, torej pred posegom človeških dejavnosti, ki bi lahko pripeljale do povišane izpostavljenosti sevanju,
- *pojem 34: »Naravni vir sevanja je vir ionizirajočih sevanj naravnega zemeljskega ali kozmičnega izvora.«* Ta pojem torej definira naravne vire sevanja, umetni viri pa so vsi tisti, ki niso naravni,
- *pojem 63: »Sevalna dejavnost je vsaka človekova dejavnost ali dejanje, ki lahko poveča izpostavljenost ionizirajočim sevanjem posameznikov zaradi umetnih virov ali naravnih virov*

sevanja z naravnimi radionuklidi, predelanimi zaradi njihovih radioaktivnih cepljivih ali oplodnih lastnosti. Za sevalno dejavnost se ne štejejo intervencijski ukrepi in dejavnost, pri kateri so posamezniki izpostavljeni radonu v bivalnih prostorih ali naravni ravni sevanja, ki je posledica radionuklidov v človeškem telesu, na površini tal ali v tleh ali zaradi kozmičnega sevanja na površini tal.« S to določbo je definirana sevalna dejavnost, ki lahko pripelje do povišanja koncentracij naravnih radionuklidov oz. TENORM ali pa vsaka manipulacija z umetnimi viri,

- *pojem 77: »Vir sevanja je radioaktivna snov, naprava ali objekt, ki lahko oddaja ionizirajoča sevanja ali radioaktivne snovi. Viri sevanja so naravni in umetni.«*
- *7. člen, odstavek (1): »Podatki o izvajanju sevalnih dejavnostih, uporabi virov sevanja, sevanju naravnih virov, načrtovanju, gradnji in obratovanju sevalnih objektov in jedrskih objektov, statistično obdelanih dozah, ki so jih prejeli izpostavljeni delavci in posamezniki iz prebivalstva, ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom, o vnosu iz držav članic EU, o iznosu v države članice EU, uvozu, izvozu in tranzitu radioaktivnih odpadkov, izrabljenem gorivu ali radioaktivnih snoveh, radioaktivni kontaminiranosti okolja, živil, krme in izdelkov za široko rabo, o izrednih dogodkih, načrtih zaščite in reševanja v primerih izrednega dogodka so javni, razen če ni s tem zakonom drugače določeno zaradi varovanja jedrskih snovi in fizičnega varovanja.«* Ta določba pomeni, da so omenjene dejavnosti oz. podatki o njihovem izvajanju javni, razen v primerih varovanja radioaktivnih virov. Ta določba je pomembna, ker omogoča javnost podatkov in s tem transparentnost pred domačo in tujo javnostjo,
- *45. člen, odstavek (1): »Organ, pristojen za varstvo pred sevanji in organ, pristojen za jedrsko varnost zagotavljata varstvo pred povečano izpostavljenostjo delavcev in posameznikov iz prebivalstva zaradi naravnih virov sevanja s sistematičnim pregledovanjem delovnega in bivalnega okolja.«* Ta člen določa pristojna upravna organa, to sta Uprava RS za varstvo pred sevanji (URSVS) ter Uprava RS za jedrsko varnost (URSJV), ki opravljata naloge iz tega odstavka,
- *45. člen, odstavek (3): »Organ, pristojen za jedrsko varnost zagotavlja varstvo iz prvega odstavka tega člena: pri dejavnostih, ki obsegajo delo ali skladiščenje materialov, ki se jih običajno ne obravnava kot radioaktivne, vendar vsebujejo naravno prisotne radionuklide, ki povzročajo znatno povečanje izpostavljenosti delavcev ali posameznikov iz prebivalstva; pri dejavnostih, ki vodijo do pridobivanja ostankov, ki se jih običajno ne obravnava kot radioaktivne, vendar vsebujejo naravno prisotne radionuklide, ki povzročajo znatno povečanje izpostavljenosti delavcev ali posameznikov iz prebivalstva.«* S tem odstavkom je torej neposredna pristojnost za TENORM podeljena URSJV,
- *128. člen, odstavek (1): »Organ, pristojen za jedrsko varnost v sodelovanju z organom, pristojnim za varstvo pred sevanji, ministrstvom, pristojnim za kmetijstvo, ministrstvom,*

pristojnim za varstvo pred naravnimi in drugimi nesrečami, in ministrstvom, pristojnim za notranje zadeve, vsako leto do 31. julija pripravi poročilo o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti za preteklo leto.» Ta člen zahteva od URSJV, da v sodelovanju z URSVS in ministrstvu pripravi poročilo o stanju na področju jedrske varnosti in varstva pred sevanji za vsako preteklo leto. Poročilo se obravnava in sprejme na vladi, po tem pa je dostopno javnosti. Poročilo med drugim vsebuje tudi podatke o izpostavljenosti zaradi naravnih virov sevanja,

- *141. člen, odstavek (3): »Vlada najkasneje v 18 mesecih po uveljavitvi tega zakona sprejme program sistematičnega pregledovanja delovnega in bivalnega okolja zaradi varstva pred naravnimi viri sevanja iz tretjega odstavka 45. člena tega zakona.*» Ta določba nalaga vladi, da sprejme program, ki je podlaga za izvajanje nalog iz 45. člena.

5.3.2 Uredba o sevalnih dejavnostih (UV1)

S to uredbo so določene sevalne dejavnosti, za katere je potrebno pridobiti dovoljenje ter pogoji za uporabo virov, prav tako pa tudi ravni izvzetja.

Pomemben je 3. člen, ki določa, da *»Proizvodnje, predelave, uporabe, skladiščenja, pošiljanja, vnašanja iz držav članic EU, uvoza, izvoza, tranzita in odlaganja radioaktivnih snovi ali drugega izvajanja sevalne dejavnosti ali uporabe vira sevanja pristojnemu upravnemu organu ni treba priglasiti, če so izpolnjeni naslednji pogoji (...)*« in nadaljuje da so pogoji izpolnjeni, če *»aktivnost posameznega radionuklida v snovi ne presega ravni izvzetja za aktivnost iz drugega stolpca tabele 1 iz priloge te uredbe*« in če *»specifična aktivnost posameznega radionuklida v snovi ne presega specifične aktivnosti iz tretjega stolpca tabele 1 iz priloge te uredbe*«.

V istem členu, odstavek (3) je tudi zanimivo določilo: *»Pogoji (...) so izpolnjeni tudi za: (...), radioaktivno kontaminirane snovi, za katere je upravni organ, pristojen za sevalno in jedrsko varnost, odobril izpust v okolje.*« Ta določba torej pomeni, da je možen tudi izpust TENORM v naravo, vendar mora to odobriti URSJV, kar pa zagotavlja vsaj minimalno raven institucionalnega nadzora.

V 4. členu je podana določitev petih skupin radiotoksičnosti radionuklidov glede na aktivnost odprtega vira sevanja. V nadaljevanju so navedeni pogoji za opustitev nadzora nad radioaktivnimi snovmi z odločbo upravnega organa ali brez odločbe upravnega organa, če *»specifična aktivnost radioaktivne snovi ne presega vrednosti iz drugega stolpca tabele 3 v prilogi te uredbe.*« Prav tako je v 6. členu določena enačba, s katero se lahko preveri skupna aktivnost snovi, ki vsebuje več radionuklidov:

$$\sum_i \frac{KA_i}{OVKA_i} \leq 1,$$

kjer je KA_i specifična aktivnost in $OVKA_i$ vrednost specifične aktivnosti posameznega radionuklida, ki ga radioaktivna snov vsebuje. Če je ta pogoj izpolnjen lahko za radioaktivno snov preneha nadzor brez odločbe pristojnega upravnega organa.

7. člen obravnava izpolnjevanje pogojev za opustitev nadzora nad radioaktivnimi snovmi. Med drugim določa, da mora uporabnik vira voditi evidenco o datumu opustitve nadzora, količini radioaktivnih snovi in načinu ravnanja po opustitvi nadzora. Prav tako je uporabnik dolžan o nameravani opustitvi nadzora obvestiti pristojni upravni organ (URSVJ).

V 8. členu so določene tudi vrste sevalnih dejavnosti, za katere je potrebno dovoljenje. Za določene vire sevanja je potrebno pridobiti tudi dovoljenje za uporabo vira in potrdilo o vpisu v register virov sevanja.

Glavna priloga te uredbe, tabela 1, pa vključuje seznam posameznih radionuklidov, ravni izvzetja aktivnosti (Bq) ter ravni izvzetja specifične aktivnosti (Bq/g).

5.3.3 Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih (UV2)

Tudi ta uredba prenaša določbe Direktive Sveta 96/29/EURATOM v slovensko zakonodajo in tako določa:

- mejne doze za izpostavljenе delavce, praktikante, študente, nerojene otroke in posameznike iz prebivalstva,
- z mejnimi dozami povezane obvezne ukrepe ter način izračuna doznih ograd in njihovo uporabo pri načrtovanju in optimiziranju sevalne dejavnosti,
- način izračuna in uporabe doznih ograd za primere izpostavljenosti ionizirajočim sevanjem posameznikov, ki zavestno in prostovoljno izven svoje poklicne dejavnosti pomagajo pri negi in skrbi za udobje bolnika med zdravstvenim pregledom ali zdravljenjem ali prostovoljcev, ki sodelujejo pri medicinskih in biomedicinskih raziskavah in so seznanjeni s tveganjem,
- mejne vrednosti radioaktivne kontaminacije zraka, površinskih in podzemnih voda, namenjenih za pripravo pitne vode, živil, radioaktivne kontaminacije človekovega telesa, površin delovnega in življenjskega okolja, tal, krme, izdelkov za osebno higieno in nego, tobaka in tobačnih izdelkov, gradbenega materiala ter drugih izdelkov,
- intervencijske nivoje ter mejne doze za izpostavljenost ionizirajočim sevanjem delavcev pri izvajanju intervencijskih ukrepov.

Uredba prav tako definira različne pojme, kot so absorbirana doza, aktivnost, efektivna doza, kategoriji A in B izpostavljenih delavcev, kontaminirano območje, operativni intervencijski nivo (ob izrednih dogodkih), deterministični in stohastični učinki, tkivni utežni faktor, utežni faktor sevanja itd. Vse definicije, mejne doze in faktorji so direktno preneseni iz omenjene Direktive Sveta.

V prilogi uredbe je tudi šest tabel, kjer so navedene izračunane efektivne doze zaradi inhalacije in ingestije, dozni koeficienti ter meje letnega vnosa izbranih radionuklidov. V tabeli 4 pa najdemo tudi izpeljane koncentracije v zraku in pitni vodi za 30 radionuklidov.

Izpeljane mejne specifične koncentracije v pitni vodi za nekatere naravne radionuklide so: 190 Bq/m³ za ²¹⁰Pb, 480 Bq/m³ za ²²⁶Ra, 580 Bq/m³ za ²³²Th ter 3000 Bq/m³ za ²³⁸U [23].

6 SPLOŠEN PREGLED INDUSTRIJ S POJAVNOSTJO NORM IN TENORM

Industrijske dejavnosti po svetu, v katerih je bila identificirana pojavnost NORM oz. možno povečanje koncentracij (TENORM) ter so bile oz. so še vedno prisotne v Sloveniji, so podane v nadaljevanju [povz. po [11], [14]].

6.1 Rudarjenje in predelava uranove rude

V današnjem času se uran v glavnem uporablja za jedrske reaktorje in jedrsko orožje. Okrog 64 % svetovne proizvodnje urana iz rude prihaja iz rudnikov v Kazahstanu, Kanadi in Avstraliji. V Evropi so največje proizvajalke uranove rude Ukrajina, Češka in Romunija. Vedno večji delež urana (trenutno 45 %) je pridobljen z *in situ* izluževanjem. V letu 2011 je letna svetovna proizvodnja urana pokrila 85 % povpraševanja za potrebe jedrskih elektrarn [37].

Rudarjenje uranove rude lahko poteka na 3 načine: v odprtih kopih, podzemno ali z *in situ* izluževanjem. Leta 2011 je rudarjenje potekalo v odprtih kopih (17 %), podzemno (30 %) ali z naraščajočo metodo *in situ* izluževanja (ISL) (45 %), preostali delež pa kot stranski proizvod fosfatne ali kovinske rude [37]. Po kopu rude in njenem drobljenju je ta podvržena izluževanju s kislino ali bazo. Ko se uranovi minerali raztopijo, se raztopina loči od trdnih ostankov. Raztopljen uran se iz raztopne pridobi z nevtralizacijo, ki ji sledi usedanje ali s procesom ionske izmenjave. Končni prodajni produkt je rumena pogača (ang. *yellowcake*). Pri postopku ISL se topilo podzemno injektira v rudo in nato sledi ekstrakcija raztopine skozi poseben nabor vrtin, pri tem pa je preprečen izliv raztopine v morebitne bližnje vodonosnike.

Odpadki rudarjenja uranove rude so dveh vrst: prekrivni kamniti materiali, izkopani iz podzemlja ali v odprtih kopih pri dostopu do depozitov U_3O_8 rude. Ta material se običajno odlaga na kupe ob rudniku. Druga vrsta pa so odpadki iz predelave uranove rude. Osiromašeni ostanki uranove rude se skladiščijo na odlagališču jalovine, pogosto še vedno vsebujejo različne radionuklide ter težke kovine. Koncentracije NORM v odpadkih se lahko od rudnika do rudnika zelo razlikujejo. Obstaja verjetnost, da lokalno prebivalstvo želi novo stanovanjsko gradnjo v bližini rudnika ali odlagališča jalovine, še posebej, ker ostanki rude zaradi majhnih debelin zrn predstavljajo atraktiven agregat za uporabo v gradbeništvu. Pri izgradnji cest to ne predstavlja posebnega radiološkega problema, pri gradnji stavb pa seveda ga.

V primerih po zaprtjih rudnikov uranove rude in novem razvoju teh območij za industrijsko in stanovanjsko namembnost so lahko problem emisije radona iz podzemlja, zato je priporočljiv kontinuiran monitoring. Ravnanje z ostanki rudarjenja uranove rude običajno vključuje izolacijo oz. prekrivanje, da se prepreči ekshalacija radona in minimizira generiranje kislin zaradi infiltracije deževnice. Dobra, a zahtevna in draga opcija je tudi premestitev izkopenega materiala v podzemne in opuščene jaške.

6.2 Fosfatna industrija

Z NORM kontaminirani ostanki oz. odpadki nastanejo kot posledica rudarjenja in predelave fosfatne rude (fosforit) v dva produkta: fosforno kislino in elementarni fosfor. Iz teh dveh vmesnih produktov se nato izdelujejo fosfatna gnojila, detergenti, krmila, prehrabeni dodatki, pesticidi in ostale fosfatne kemikalije.

Fosfati, primerni za rudarjenje, se v naravi koncentrirajo s sedimentnimi, magmatskimi, preperevalnimi in biološkimi procesi (gvano). V sedimentnih fosforitnih rudah je lahko prisoten uran, v magmatskih pa je običajno manj urana in več torija. Navadno visoka vsebnost fosfata v rudi pomeni tudi visoko vsebnost urana (50-300 ppm). Skoraj vsa fosfatna ruda se pridobiva v odprtih kopih, glavne proizvajalke so države severne Afrike, ZDA, Kitajska in države bivše Sovjetske zveze.

Predelava fosfatne rude lahko poteka s kislim izluževanjem za proizvodnjo fosforne kisline ali s termičnim procesom za proizvodnjo elementarnega fosforja. Vhodni material za proizvodnjo fosforne kisline je obogatena fosfatna ruda. Bogatenje rude je lahko preprosto z mehanskimi postopki (sejanje) ali bolj kompleksno (pranje, flotacija). Pri bogatenju se navadno ne zmanjša koncentracija radionuklidov v rudi. Tipične koncentracije v rudi so okrog 1500 Bq/kg urana in radija, ponekod celo do 20.000 Bq/kg U_3O_8 (triuranov oktoksid) [14].

Večina izluževanja (90 %) poteka z žveplovo kislino, pri katerem nastane sadra ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), ki ni dobro topna v reakcijski mešanici. Trdni kristali sadre se usedajo in se z lahkoto ločijo od fosforne kisline s filtracijo. Pri proizvodnji 1 t fosfata (P_2O_5) nastane od 4 do 5 t fosforne sadre. Običajno ostane v sadri okrog 80 % ^{226}Ra , 30 % ^{232}Th in 5 % ^{238}U , te vrednosti pa se lahko tudi močno razlikujejo [14].

Pri proizvodnji elementarnega fosforja s termičnim procesom se fosfatna ruda stopi v peči pri 1400 °C, pri čemer fosfor in CO v plinasti obliki izhajata iz peči. Plina nato potujeta čez zbiralnike praha in čez kondenzatorje, kjer se elementarni fosfor kondenzira in postane ujet v vodi. Ostanki v peči so železofosfor (uporaben tudi kot stranski produkt) in kalcijev silikat ($CaSiO_3$), imenovan tudi žlindra, ki je glavni odpadek termičnega procesa. Žlindra zadrži skoraj vse izotope urana, torija in radija ter nekaj svinčevih izotopov, del izotopov svinca in polonija pa zapusti peč z dimnimi plini zaradi visokih temperatur. Prašni filter del radionuklidov sicer odvzame iz plinskega toka, polonij pa običajno zapusti proces kot izpušni plin.

Glavni odpadni produkt procesa kislega izluževanja je fosforna sadra v obliki gošče. Običajno se odlaga na odlagališčih fosforne sadre ali pa se izpušča v vodotoke in morja. Odlagališča so običajno nastala direktno na zemljini, z malo ali celo brez predhodne priprave odlagalne površine. Če niso zaščitena pred dežjem, lahko postanejo hidravlično povezana s površinskimi vodami in plitkimi vodonosniki [14]. Vsak proizvodni obrat fosforne kisline lahko ima eno ali več odlagališč sadre.

Koncentracije ^{226}Ra v evropski sadri segajo od vrednosti ozadja do 1700 Bq/kg. Dodaten tok odpadkov predstavljajo obloge in usedline v proizvodnih cevovodih ter filtracijskih rezervoarjih, koncentracije radionuklidov pri teh odpadkih pa so lahko tudi za faktor 1000 višje kot v sadri. Zaradi majhne količine teh odpadkov v primerjavi s sadro ne prispevajo bistveno k izpostavljenosti sevanju pod pogojem, da se s temi odpadki ravna primerno. Primer dobre prakse je Nizozemska, kjer imajo urejeno odlagališče za nizko in srednje radioaktivne odpadke (COVRA), ki sprejema tudi odpadke iz jedrskih industrij in jih primerno zapakirane skladišči za predvideno obdobje 100 let [38].

Količina žindre predstavlja 85 % količine surove fosfatne rude in vsebuje glavni delež (93 %) ^{238}U (koncentracija okrog 1100 Bq/kg) in ^{226}Ra (koncentracija okrog 1300-1500 Bq/kg). Lahko se uporabi kot nadomestek za naravne materiale, npr. kot agregat pri gradnji cest in betonu. Znan primer je iz zvezne države Idaho, ZDA, kjer se je žindra s koncentracijami ^{226}Ra od 750 do 1100 Bq/kg uporabljala kot gradbeni material za gradnjo cest in manjši delež za gradnjo stanovanj. Najvišja individualna doza je bila ocenjena 1,3 mSv/leto [14]. To kaže na relativno sprejemljivost uporabe žindre v gradbeništvu, vendar ne za stanovanjsko gradnjo.

Količina finega pepela v procesu termične obdelave je manjša od 1 % surove rude in vsebuje radionuklida ^{210}Pb ter ^{210}Po v koncentracijah reda velikosti 1000 Bq/kg. Ta dva radionuklida se lahko imobilizira s cementom oz. s cementno pasto. Pogosta praksa ravnanja z žindro je deponiranje na odlagališču žindre skupaj s finim pepelom.

Praviloma je topnost sadre zelo nizka (spiranje radijevih ionov v podtalje in površinski odtok je odvisno od topnosti), zato je doza zaradi izpostavljenosti kontaminaciji podtalnice in pridelkov zanemarljiva tudi pri življenju ob odlagališču. Nasilen vdor v kup fosforne sadre pa lahko sproži izpostavljenost radonu in eksterni gama radiaciji (do 0,3 $\mu\text{Sv/h}$). Izpuščanje sadre v vodotoke lahko vodi v kontaminacijo brežin in povečano izpostavljenost radonu ter eksterni gama radiaciji. Žindra iz termične obdelave fosforne rude zaradi svojih lastnosti naj ne bi dopuščala topnosti radionuklidov, vendar EPA poroča o kontaminaciji podtalnice na več odlagališčih fosforne žindre, zato lahko sklepamo, da je žindra vseeno dovzetna za izpiranje, ki pa je verjetno odvisno od vremenskih pogojev.

V večini držav EU fosfatna industrija ni podvržena ukrepom radiološkega nadzora, vendar je potrebno upoštevati glavne razloge za okoljsko tveganje zaradi:

- potenciala za izpiranje radija in neradioaktivnih kontaminantov v okolje,
- ekshalacije radona v atmosfero,
- potencialne ponovne uporabe teh materialov zaradi izgube ali pomanjkanja institucionalnega nadzora.

Odpadki iz fosfatne industrije tudi na dolgi rok pomenijo probleme pri ravnanju z njimi zaradi velike količine teh odpadkov, dolgoročnega obstanka tveganja zaradi dolgoživih radionuklidov in topnosti v vodi.

Uvoz fosfatne rude v EU se je med letoma 1985 in 1992 zmanjšal za faktor 2, kar kaže tendenco v smeri uvažanja fosforne kisline namesto surove rude. To je pomenilo zmanjšanje vnosa urana v morje in posledično veliko zmanjšanje koncentracij ^{210}Po v okolju, predvsem v Franciji, kjer so do leta 1990 izpustili okrog 3 mio t fosforne sadre v zaliv Baie de la Seine. S tem pa se je problem ravnanja s tem odpadkom prenesel na države proizvajalke surove rude (npr. Maroko) [14].

6.3 Pridobivanje zemeljskega plina in nafte

Pri ekstrakciji nafte in zemeljskega plina radionuklidi iz podzemnih formacij pridejo na površje. Mešanica nafte, olja in vode se črpa na površino, nato ločilnik odstrani plin, ki se transportira v objekt za pripravo plina in tam se plin razdeli v različne plinske produkte. Po odstranitvi plina se mešanica nafte in vode separira na dve ločeni fazi. Surova nafta se prečrpa v rezervoarje, kjer je pripravljena na transport v rafinerijo, formacijska voda pa je speljana v objekt za obdelavo vode in je nato v primeru naftnih ploščadi izpuščena v morje, na kopnem pa se skladišči v pogosto nepodloženih shranjevalnih bazenih za nadaljnjo uporabo ali pa se ponovno injektira v vrtino.

Ostanki iz te industrije so različni. Na opremi črpališča se lahko pojavijo trde zelo radioaktivne obloge in mehkejša blata, ki se pojavljajo kot nanosi ali sedimenti. Obloge se usedajo na cevi zaradi sprememb temperature, tlaka in slanosti med črpanjem mešanice na površje. Obloge so običajno sestavljene iz mešanice karbonatnih in sulfatnih mineralov, kot je barit (BaSO_4), ki zlahka vključi Ra v svojo strukturo. Izotopi Ra so najpomembnejši radionuklidi v oblogah, usedlinah in drugih sedimentih. Koncentracije so občutno višje od koncentracij v naravnem okolju s specifičnimi koncentracijami od 100 do 1000 Bq/kg [14]. V zemeljskem plinu in tankih plasteh v notranjosti plinskih cevovodov pa je prisoten radon in njegovi potomci, predvsem problematična ^{210}Pb in ^{210}Po . Podatki kažejo, da se v ZDA nabere povprečno okrog 100 t oblog na vrtino [11].

Pomemben odpadek NORM pa je tudi formacijska voda, ki se je ločila od začetne mešanice nafte, plina in vode. V vodi so srednje koncentracije 2 Bq/l za ^{226}Ra in 2,3 Bq/l za ^{228}Ra [14], lahko pa se pojavijo koncentracije Ra tudi do 111 Bq/l. Pogosto se ta voda injektira nazaj v vrtino, pri čemer se ta pristop v nekaterih državah smatra za primernega, saj predstavlja minimalno tveganje za zdravje ljudi pod pogojem, da ni hidravlične povezave z aktivnimi podtalnimi viri pitne vode ter da je vrtina po koncu življenjske dobe primerno zaprta in zapečaten. Velikokrat pa se vodo izpušča v zadrževalne bazene (če je vrtina na kopnem) ali direktno v morje v primeru naftne ploščadi. V zadrževalnih bazenih lahko ta voda pronica v podtalnico ali pa izhlapi, pri čemer se NORM koncentrira v blatu na dnu ali slanosti ostankih. Izmerjene aktivnosti teh sedimentov so bile izjemno visoke, v rangi $1 \cdot 10^4$ do

$4 \cdot 10^4$ Bq/kg. Problem nastane pri odstranjevanju usedlin in blata iz te industrije, kjer lahko pride do kontaminacije zemljine; primer so vzorci kontaminirane zemljine na črpališču nafte v zvezni državi Kentucky, ZDA, kjer so bile koncentracije radija 32.560 ± 340 Bq/kg [14].

Sorazmerno s časom obratovanja vrtine se povečujejo tudi NORM odpadki zaradi ekstrakcije in separacije. Odstranjevanje visoko radioaktivnih odpadkov zahteva večjo izolacijo od splošne javnosti, temu pa običajno sledijo tudi stroški ravnanja z odpadki. Predvsem je pomembno zavedanje o radiološki kontaminaciji v tej industriji od obratovanja do končne razgradnje. Nezavedna uporaba kontaminiranih materialov npr. za recikliranje lahko vodi v nepričakovano izpostavljenost.

6.4 Rudarjenje premoga in sežiganje v termoelektrarnah

Kljub vedno bolj zelenim oz. ekološkim usmeritvam mnogih držav premog še vedno zagotavlja 29,6 % globalnih potreb po energiji in generira kar 42 % svetovne elektrike. Celotna globalna proizvodnja črnega premoga in lignita v letu 2010 dosega $7229 \cdot 10^6$ t. Največje svetovne proizvajalke so Kitajska, ZDA in Indija. Opazna je rast svetovne proizvodnje, ki pa temelji predvsem na državah, nečlanicah OECD, v članicah pa se proizvodnja zmanjšuje [39].

Fosilna goriva, kot so premog in lignit, vsebujejo naravno prisotne radionuklide uranove in torijeve razpadne vrste ter ^{40}K . Koncentracije NORM v premogu, jalovini in odpadnih vodah so odvisne od geoloških formacij plasti premoga. Posledično so koncentracije NORM v pepelu in drugih ostankih povezane s karakteristikami premoga. Da lahko natančno predvidimo mobilnost radionuklidov med celotnim ciklom izkoriščanja premoga (od rudarjenja do sežiga) je potrebno določiti koncentracije, porazdelitev in obliko radionuklidov v premogu, jalovini, odpadnih vodah, pepelu, žlindri in drugih ostankih.

Premog se lahko pridobiva v odprtih kopih (večinoma ZDA in Avstralija) ali v podzemnih rudnikih (večinoma Kitajska, Evropa in Brazilija). Rudarjenje je povezano s hkratno proizvodnjo primerljivih količin jalovine in drenažne vode, ki lahko vključuje TENORM. Prav tako vpliv na zgornje geološke plasti lahko ustvari nove poti za izpust radona v okolje ter posledične povišane vrednosti v stanovanjskih objektih.

Konvencionalni sežig premoga v termoelektrarnah proizvaja pepel in leteči pepel. Običajno pa je prisotna tudi razžvepljevalna naprava za dimne pline, ki povzroča dodatne ostanke v obliki blata ali suhih snovi.

Večina odpadkov iz termoelektrarne na premog je v obliki letečega pepela, ostali pepel je težji in se useda na dnu zgorovalne komore. Hlapna radionuklida, kot sta ^{210}Pb in ^{210}Po se akumulirata v letečem pepelu in v notranjosti dimnika, medtem ko se dimni plini hladijo. Odvisno od hidroloških pogojev lahko ekstrakcijo premoga spremljajo tudi drenažne vode z visoko vsebnostjo raztopljenega

radija. Radij se pojavlja v visoko mineraliziranih vodah in splošna radioaktivnost je sorazmerno povezana s slanostjo vode. Posledično se tudi pri izpustih tehnološke vode iz termoelektrarn pojavljajo precej visoke koncentracije Ra, kar lahko vodi v akumulacijo ^{226}Ra in ^{228}Ra v usedalnih bazenih in vodotokih, kot npr. v Nemčiji in na Poljskem.

Večina ostankov rudarjenja premoga je odložena na površinskih odlagališčih, samo del odpadnih kamnin (radioaktivni sedimenti) se uporabi za zapolnjevanje jaškov. V rudnikih, kjer se Ra useda v zadrževalne bazene, se sedimenti mešajo z jalovino in se uporabijo za zapolnitev opuščenih rovov. Glede na velike količine sežganega premoga in količine ostankov v termoelektrarnah so tudi količine odpadkov v državah z veliko takšnimi objekti zelo velike. Pomanjkanje ali neustreznost čiščenja dimnih plinov, še posebno v starejših objektih, lahko vodi v disperzijo letečega pepela v atmosfero, v nekaterih opazovanih večjih elektrarnah pa se zdi, da je čiščenje dovolj uspešno, da se prepreči večje onesnaženje v okolici objekta. Ostali trdni ostanki iz procesa sežiga pa se ali odložijo v primernih površinskih odlagališčih ali pa se nasujejo nazaj v rudnik. Leteči pepel in sadra pa se lahko reciklirata in uporabita npr. kot dodatek k betonu, kar lahko vodi v izpostavljenost prebivalcev sevanju zaradi TENORM v gradbenem materialu. Na mednarodnem nivoju glede regulacije oz. omejitve takšnega recikliranja ni enotnih standardov oz. predpisov.

Pomembno pot za možno izpostavljenost predstavlja tudi ponovna suspenzija letečega pepela in drugih ostankov čiščenja dimnih plinov iz odprtih površinskih odlagališč. V razvitih državah ima večina termoelektrarn bolj ali manj ustrezno čiščenje dimnih plinov in opravljanje s pepelom. Velik problem pa še posebno v manj razvitih državah predstavljajo domače kurilne naprave za kurjenje premoga z namenom ogrevanja, kjer zaradi odsotnosti čiščenja dimnih plinov obstaja precejšen potencial za izpostavljenost.

6.5 Proizvodnja titanovega dioksida (TiO_2)

Pri proizvodnji titanovega dioksida se kot vhodne surovine uporabljata minerala ilmenit ter rutil. V njuni rudi so običajne koncentracije aktivnosti okrog 300 do 600 Bq/kg za ^{238}U razpadno verigo ter 35 do 600 Bq/kg za ^{232}Th razpadno verigo [14]. Pri kemični predelavi teh dveh mineralov bi lahko ^{232}Th in ^{238}U potencialno prešla v mokro frakcijo odpadkov, vendar so pričakovane doze zelo nizke. Pri odstranjevanju trdnih ostankov predelave ni pričakovati povečanje onesnaženja zaradi raztapljanja in migracije radionuklidov. Narava mineralov rutila, ilmenita in cirkona oz. njihova kemijska stabilnost pomeni, da je verjetnost za kontaminacijo podtalnice iz odlagališč težkih mineralov nizka.

Pri predelavi ilmenita v sintetičen rutil in pigment TiO_2 nastajajo velike količine hidriranega železovega oksida in sadre, ki se skladiščijo v usedalnih bazenih ali lagunah v bližini tovarne. Odlaganje odpadkov iz proizvodnje TiO_2 in razredčene žveplove kisline je povzročalo resen okoljski problem in je bilo vsaj v Evropi ustavljeno.

Pri predelavi 1 t TiO_2 se generira od 6 do 8 t razredčene (20-22 %) kisline. Le-ta je preveč razredčena za nadaljnjo komercialno uporabo in je pogosto kontaminirana s težkimi kovinami in NORM. V proizvodnem procesu se nato kislina spet koncentrira, usedline se odstranijo, sledi ponovna uporaba v proizvodnji.

Manj okoljskih problemov nastane pri proizvodnji titanovega pigmenta iz minerala rutila namesto iz ilmenita. Tako kloridni proces z uporabo rutila generira 0,2 t odpadkov na tono TiO_2 , sulfatni proces z uporabo ilmenita pa okrog 3,5 t odpadkov. Proizvodnja sintetičnega rutila iz ilmenita povzroči okrog 0,7 t odpadkov na 1 t produkta, predvsem železovih oksidov, ki se odlagajo. Direktno kloriranje ilmenita pa proizvede okrog 1,2 t odpadkov na 1 t TiO_2 .

V omenjenih kemičnih procesih se titan loči od drugih kovin. Vsi radionuklidi, ki so prisotni v vhodnih materialih, se pojavljajo tudi v toku odpadkov kemične predelave. Zelo redko se zgodi, da tudi končni proizvodi vsebujejo radioaktivne snovi. Običajno proizvajalec odstrani radionuklide samo, da spremeni lokacijo nastanka odpadka, namesto da bi proizvedel odpadke z manjšimi okoljskimi tveganji.

Odpadke iz kemične predelave surovin titana lahko označimo kot »mešane industrijske odpadke«, saj vsebujejo različne kovine (Pb, As, Zn, Mn, Mg, V, Nb), radionuklide ter nevtralizirane kisle odplake. Ti odpadki se morajo odlagati v primernih odlagališčih, ki so obdana z nepropustnim materialom za preprečevanje izpiranja.

6.6 Gradbeni materiali

Gradbeni materiali vsebujejo NORM zaradi naravnega porekla surovin (npr. naravni kamen) ali zaradi dodatka industrijskih produktov npr. cirkonijev pesek ali stranskih produktov npr. pepel, fosforna sadra, žlindra. Že dalj časa je spodbujano recikliranje industrijskih odpadkov in ostankov zaradi minimiziranja uporabe naravnih virov in je pogosto priljubljeno s strani industrije zaradi dodajanja vrednosti materialu, za katerega bi sicer nastali stroški zaradi odstranjevanja oz. odlaganja. Pri tem pa se pojavlja skrb zaradi potencialne vsebnosti radioloških in drugih kontaminantov v recikliranih materialih.

Odvzem naravnih sedimentov, kot sta pesek in gramoz, ki imajo običajno nizke vsebnosti radioaktivnosti, samo po sebi ne vodi v povišane koncentracije v proizvodu ali toku odpadkov. Kamnine iz kamnolomov, kot so granit ali tuf, ki so lahko bogate z naravnimi radionuklidi, lahko ali direktno izpostavijo prebivalstvo ali pa povečajo izpostavljenost zaradi izpusta radona v primerih vgradnje v notranjost stavb.

Malo verjetno je, da ostanki iz kamnoloma predstavljajo radiološko skrb, vendar o tej temi primanjkuje informacij. V literaturi težko najdemo koncentracije aktivnosti za surovine, uporabljene za izdelavo gradbenih materialov, dovolj pa je podatkov o specifikacijah končnih produktov.

Uporaba fosforne sadre kot gradbeni material je bila prepovedana v nekaterih evropskih državah (npr. Belgija in Romunija). Večina ostankov drugih procesov (sadra, pepel, žindra) ne dosega zahtevanih tehničnih specifikacij za uporabo v gradbeništvu, zato se običajno mešajo z naravnimi surovinami in tako se koncentracija NORM zmanjša v primerjavi s prvotno koncentracijo. V slovenski zakonodaji mejne vrednosti kontaminacije gradbenih materialov za gradnjo stavb določa UV2 [23] in sicer:

- 200 Bq/kg za ^{232}Th ,
- 300 Bq/kg za ^{226}Ra ,
- 3000 Bq/kg za ^{40}K , pri čemer mora biti izpolnjen pogoj:
- $\frac{n(^{226}\text{Ra})}{300} + \frac{n(^{232}\text{Th})}{200} + \frac{n(^{40}\text{K})}{3000} \leq 1$

Žal je na voljo le malo informacij o predelavi gradbenih materialov z vidika radiološke pomembnosti ostankov in odpadkov. Predelava gline, v kateri je lahko vezan uran in drugi radionuklidi v paleto keramičnih izdelkov in zidakov, lahko vodi v koncentracijo NORM v določenih izdelkih ali ostankih. Tudi tehnični procesi, kot so sejanje, flotacija in drugi postopki prečiščevanja, lahko pripeljejo do akumulacije NORM v odpadkih, posameznih frakcijah surovin ali v izdelkih. Pri žganju in podobnih postopkih toplotne obdelave lahko pride do hlapljivosti npr. ^{210}Po , ki se nabira v odsesovalnih sistemih, se useda na zidove dimnika ali se razprši po objektu. Navadno pa se koncentracije NORM v produktih in odpadkih ne razlikujejo bistveno od koncentracij v vhodnih materialih.

Ostanki lahko nastanejo kot odpadki iz predelave (trdni ali tekoči), kot izdelki z napako ali kot ruševine porušeni stavb. Izvajalci se pogosto ne zavedajo morebitnega radiološkega problema, zato ne uporabljajo posebnih varnostnih ukrepov pri delu z ostanki. Pri tem je pomembno, da ne pride do dodatne disperzije NORM v okolju. Zaradi keramične narave izdelkov iz termičnih procesov so radionuklidi trdno vezani v izdelek, zato je izpostavljenost zaradi izločanja skozi vodo zelo majhna. Kljub temu pa skrb predstavljajo prašni delci, ekshalacija radona in direktna izpostavljenost gama sevanju.

Čeprav je uporaba žindre in pepela dobro poznan vir izpostavljenosti sevanju gama zaradi prisotnosti ^{226}Ra , ^{232}Th in manjšega deleža ^{40}K , se žindra kljub temu v glavnem uporablja kot agregat pri izdelavi betona in kot dodatek cementu. Znani so tudi primeri uporabe fosforne sadre in sadre iz procesa razžvepljevanja dimnih plinov pri izdelavi mavčnih plošč, kar vzbuja skrb. Na splošno pa so aktivnosti gradbenih materialov odvisne od vrste rude, porekla surovine in metalurškega procesa.

6.7 Priprava pitne vode

Javni sistemi za oskrbo s pitno vodo črpajo vodo ali iz površinskih vodnih teles (reke, potoki, jezera) ali iz podzemnih virov. V Sloveniji kar 97 % prebivalstva uporablja podtalne vire za oskrbo s pitno vodo [6]. Večina vode potrebuje dodatno pripravo za odstranitev onesnažil in nečistoč. V večini razvitih držav morajo upravljavci vodovodov upoštevati mejne vrednosti različnih kontaminantov, ponekod tudi radiološke kriterije. V Sloveniji mejne vrednosti in splošne zahteve, ki jih mora izpolnjevati pitna voda, določa Pravilnik o pitni vodi [17].

Velikost oskrbovalnih sistemov je odvisna od velikosti odjemne populacije oz. števila odjemalcev. Podtalnica je prisotna skoraj povsod po svetu, zelo različna pa je njena globina in kvaliteta. Koncentracije radionuklidov v podtalnici so odvisne predvsem od lokalne geologije. Tako višje koncentracije najdemo v granitnih kamninah in kamninah z vsebnostjo urana. Naravni radionuklidi se spirajo v vodo v stiku z geološkimi mediji, ki vsebujejo uran in torij. Prevladujoči radionuklidi naravnega izvora, ki jih najdemo v vodi, so uran, radij ter radon in njegovi potomci [11].

V ZDA koncentracije ^{226}Ra variirajo od $4 \cdot 10^{-4}$ do $4 \cdot 10^{-2}$ Bq/L v površinski vodi in od 0,02 do 0,93 Bq/L v podtalnici. Najbolj topen radionuklid v vodi je radij, kljub temu pa najdemo tudi ^{238}U , ^{232}Th ter njune potomce. Povprečna koncentracija urana v ZDA je v površinski vodi 0,037 in podtalnici 0,11 Bq/L [11].

Za primerjavo smo iz arhiva URSJV o radioaktivnosti v okolju (ROKO) [71] pridobili podatke o specifičnih aktivnostih naravnih radionuklidov v pitni vodi za različne kraje po Sloveniji. Poiskali smo maksimalne vrednosti v zadnjih nekaj letih in ugotovili naslednje specifične koncentracije:

- ^{238}U od 1,2 do 20,29 Bq/m³
- ^{226}Ra od 0,77 do 28 Bq/m³
- ^{228}Ra od 0,52 do 8 Bq/m³
- ^{210}Pb od 0,6 do 20 Bq/m³

Vidimo lahko, da so celo maksimalne vrednosti koncentracij v Sloveniji še vedno precej nizke v primerjavi s koncentracijami po ZDA.

Torijeva izotopa ^{230}Th in ^{234}Th sta običajno pod mejo zaznave v vzorcih podtalnice, tudi prisotnost ^{232}Th v podtalnici je ocenjena kot zelo nizka (okrog $4 \cdot 10^{-4}$ Bq/l). Razpadna produkta ^{222}Rn , relativno dolgoživa ^{210}Pb in ^{210}Po sta običajno prisotna v zelo nizkih koncentracijah v podtalnici, od $7 \cdot 10^{-4}$ do $4,4 \cdot 10^{-3}$ Bq/L. Koncentracije radona v podtalnici imajo velik razpon, v ZDA so bile na 2457 analiziranih vzorcih povprečne koncentracije od 29,6 Bq/L do 513,6 Bq/L [11].

Bolj verjetno je, da bodo višje koncentracije radionuklidov prisotne v podtalnici, kot v površinskih vodah zaradi razlik v kemični sestavi. Nekatere vode zahtevajo odstranjevanje radionuklidov za zadostitev zakonskim omejitvam, kar pa predstavlja tudi osnovni problem priprave pitne vode, to je akumulacija radionuklidov v filtrih in blatu ter možna kontaminacija filtracijske opreme. Kontaminirana oprema nato lahko potrebuje servis in čiščenje, nastali koncentrirani odpadki, preostalo blato, filtri in drugi ostanki pa zahtevajo primerno odstranitev. Celo v primerih, kjer so koncentracije radionuklidov povišane, vendar ne presegajo standardov, lahko že običajna priprava vode npr. mehčanje vodi v akumulacijo NORM v procesnih odpadkih oz. ostankih [11].

V industriji obstaja več različnih procesov priprave pitne vode. Nekateri so specifično zasnovani za odstranjevanje radionuklidov, veliko pa je zasnovanih za hkratno odstranjevanje drugih onesnažil hkrati z NORM. Navadno sistemi, zasnovani samo za odstranjevanje NORM, vodijo k odpadkom z višjo vsebnostjo NORM. V nekaterih primerih so te koncentracije lahko znatne. V literaturi najdemo številne procese za odstranjevanje radionuklidov iz pitne vode: kationska izmenjava (radij), filtracija z zelenim peskom (radij), koprecipitacija z barijevim sulfatom (radij), tekoči magnezijevi oksidi (radij), anionska izmenjava (uran), koagulacija/filtracija (uran), mehčanje z apnom (radij in uran), reverzna osmoza (radij in uran), granulirano aktivno oglje (radon) in aeracija (radon) [11].

Primeri z NORM kontaminiranih ostankov obdelave pitne vode so: blata in trdni odpadki, vključno s filtrnim blatom, izrabljene smole ionskih izmenjevalcev, izrabljeno granulirano aktivno oglje, voda, porabljena za pranje filtrov (pralna voda). Običajno bolj učinkovita metoda odstranjevanja pomeni višje specifične aktivnosti v procesnih odpadkih, kar predstavlja pomemben problem gospodarjenja z odpadki [11].

Blata od procesa obdelave pitne vode se stekajo v lagune in lahko vključujejo apneno blato, pralno vodo, izrabljene medije ionske izmenjave in elemente peščenih filtrov. Odlaganje blata v lagune povzroča nabiranje radija v sedimentih na dnu, ki bi jih bilo morda potrebno izkopati in primerno odstraniti. Z naravnimi radionuklidi kontaminirano blato se odlaga na odlagališčih odpadkov (deponijah), se izpušča v kanalizacijo, se injektira v globoke vrtine ali pa celo posipava po kmetijskih zemljiščih. Predvsem zadnja praksa je sedaj marsikje prepovedana zaradi onesnaževanja s težkimi kovinami [11].

Glede na velike količine pripravljene pitne vode je tudi količina ostankov znatna. EPA z določeno negotovostjo ocenjuje približno 260.000 t z NORM kontaminiranih ostankov letno, pri čemer se količina lahko postopoma povečuje zaradi novih zahtev, npr. odstranjevanja urana. V Nemčiji je ocenjeno, da letno nastane okrog 125.000 t različnih tipov blata iz opazovanih oskrbovalnih objektov [11].

Večina odpadkov iz industrije obdelave vode je v obliki blata, kar lahko predstavlja problem s perspektive varstva podtalnice. Odlaganje blata v lagunah in shranjevalnih bazenih lahko povzroča kontaminacijo podtalnih vodnih teles, prav tako tak način odlaganja zahteva dolgotrajno skrbništvo za preprečevanje izpostavljenosti ljudi in okolja zaradi migracije ali zaradi ponovne uporabe teh ostankov brez nadzora [11].

Posebno radiološko skrb predstavljajo smole ionske izmenjave ter filtrski mediji. Verjetno je, da radionuklidi v le-teh niso tako mobilni kot pri blatu. Ker znatno zmanjšanje koncentracij s časom ni pričakovano, je možna tako eksterna izpostavljenost kot potencialna izpostavljenost radonu [11].

Odstranjevanje odpadkov TENORM v komunalne kanalizacijske sisteme lahko vodi v akumulacijo radionuklidov v blatu čistilnih naprav. Prav tako je glede na stopnjo koncentracije aktivnosti v blatu potreben poseben poudarek na ponovni uporabi in odstranitvi oz. odlaganju tega odpadka [11].

Skoraj vsi pomembni radionuklidi v pitni vodi so naravnega porekla in so del treh radioaktivnih razpadnih verig: uranove (U), torijeve (Th) in aktinijeve (Ac). Posamezni radioaktivni elementi, ki nas zanimajo s stališča varstva pred ionizirajočimi sevanji, so radij (Ra), radon (Rn) in uran (U). Izotopi iz uranove razpadne verige, ki lahko povzročijo tveganje za zdravje zaradi prisotnosti v pitni vodi pa so: ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , in ^{222}Rn (vsi so alfa sevalci). Izotop ^{228}Ra (beta sevalec), ki je del torijeve razpadne verige, je prav tako lahko prisoten v pitni vodi, drugi izotopi iz te verige pa so bili zelo redko zaznani [54].

6.7.1 Radon

Radon hitro izhlapi iz vode, ko je ta na površini, zato je prisoten samo v podtalnici. Obstaja korelacija med velikostjo oskrbovalnega sistema in koncentracijami radona v vodonosniku. Manjši oskrbovalni sistemi običajno črpajo vodo iz manjših vodonosnikov, ki imajo običajno večje kontaktne površine granulata in s tem višje koncentracije radona.

Minimalni zaznavni prag radona v vodi je med 1,85 in 3,7 Bq/L. Povprečne koncentracije radona v podtalnicah v ZDA so v rangi med 7,4 do 22,2 Bq/L, najvišja izmerjena vrednost pa je bila 27.750 Bq/L.

Epidemiološke študije so pokazale, da inhalacija radona vodi do nastanka pljučnega raka. Radon po vdihu razpade z alfa razpadom v pljučih. Pri tem se sprostijo alfa delci, ki lahko poškodujejo pljučno tkivo in povečajo verjetnost za pljučnega raka skozi življenjsko dobo osebe. Radon v notranjosti življenjskih prostorov je drugi vodilni vzrok za nastanek pljučnega raka v ZDA, vendar samo okrog 1 do 2 % radona v prostoru pride iz pitne vode. Nekaj radona lahko ostane raztopljenega tudi v pitni vodi, pri čemer pitje z radonom bogate vode lahko vodi v nastanek raka notranjih organov, predvsem raka na želodcu [54].

6.7.2 Radij

Radij večinoma najdemo v podtalnici. Glede na podatke iz poročil je bilo v ZDA ugotovljeno, da 500 od približno 60.000 javnih oskrbovalnih sistemov presega koncentracijo radija 0,185 Bq/L. Najvišja izmerjena koncentracija je bila okrog 3,7 Bq/L, povprečje za ^{226}Ra je približno 0,0148 Bq/L, za ^{228}Ra pa približno 0,0259 Bq/L.

Radij je pri ingestiji biokemično podoben kalciju in bariju ter se koncentrira v kosteh. Učinki ingestiranega radija na zdravje so dobro poznani, opazovani skupini je bil diagnosticiran kostni sarkom (kostni rak) in možganski tumor [54].

6.7.3 Uran

Naravno prisoten uran lahko najdemo tako v površinskih, kot tudi podtalnih vodah. Najvišje koncentracije urana se v ZDA nahajajo v gorski regiji v zahodnem delu države. Analize 89.000 vzorcev površinskih in podtalnih voda v 60. in 70. letih so pokazale najvišjo koncentracijo 22,2 Bq/L, od takrat pa je meritev v nekem vodnjaku v Coloradu pokazala rekordno koncentracijo celo 255,3 Bq/L. Kar 20.000 od vseh 89.000 lokacij so nato identificirali kot obstoječa ali potencialna območja za oskrbo s pitno vodo. Povprečna koncentracija v teh sistemih je bila 0,0666 Bq/L. Nekatera druga poročila pa navajajo srednje koncentracije urana v podtalnicah po ZDA med 0,0888 in 0,111 Bq/L.

Ingestiran uran se večinoma odlaga v kosteh in ledvicah. Omejeni dokazi nakazujejo na podobne učinke na zdravje kot pri radiju. Poznano pa je tudi, da ima uran zelo škodljiv oz. kemotoksičen vpliv na ledvice [54].

6.7.4 Postopki za odstranjevanje radioaktivnih onesnažil

V preglednici 4 so predstavljene t.i. najboljše dosegljive tehnike (BAT), ki se lahko uporabijo za odstranjevanje različnih radioaktivnih onesnažil iz surove vode.

Preglednica 4: Odstranjevanje radioaktivnih onesnažil [54]

Radionuklid (onesnažilo)	Izvor	Najboljša dosegljiva tehnologija čiščenja (BAT)
Sevalci alfa	Naravni in umetni	Koagulacija-filtracija, Reverzna osmoza
Sevalci beta in sevalci fotonov	Naravni in umetni	Koagulacija-filtracija, Ionska izmenjava, Reverzna osmoza
Ra-226	Naravni	Mehčanje z apnom, Ionska izmenjava, Reverzna osmoza

Ra-228	Naravni	Mehčanje z apnom, Ionska izmenjava, Reverzna osmoza
Rn	Naravni	Aeracija (prezračevanje)
U	Naravni	Koagulacija-filtracija, Mehčanje z apnom, Anionska izmenjava

6.7.5 Ravnanje z odpadki

V procesu odstranjevanja onesnažil iz surove vode nastaja cela paleta odpadnih produktov, ki jih imenujemo procesni ostanki oz. odpadki. V vodi je lahko prisotna cela vrsta onesnažil: pesek in mulj, raztopljene organske snovi, suspendirani delci, ioni, ki povzročajo trdoto, celotne raztopljene snovi (TDS), nitrati, arzen, radionuklidi, bakterije in drugi organizmi ter naravno prisotne in umetne organske snovi. V ZDA so najbolj pogosto uporabljeni procesi čiščenja in priprave pitne vode, ki iz surove vode odstranjujejo omenjena onesnažila in posledično povzročajo odpadke: kemična koagulacija, mehčanje z apnom, sedimentacija, odstranjevanje železa in mangana, kontrola okusa in vonja, membranska separacija, ionska izmenjava ter adsorpcija z granuliranim aktivnim ogljem (GAC). Ostanki lahko vsebujejo glino, mulj, pesek, ogljik, kemične usedline, bakterije in druge organizme ter organske snovi. Odpadki iz teh procesov lahko nastajajo kontinuirano ali bolj poredko, tudi količina in vrsta odpadkov je odvisna od posameznega obrata in uporabljene tehnologije ter doziranja [54].

6.7.6 Karakterizacija odpadkov

6.7.6.1 Radioaktivni odpadki

Tip in količina radionuklidov v odpadkih je odvisna od sposobnosti procesa čiščenja, ki odstranjuje specifične radionuklide iz surove vode. V preglednici 5 so podani procesi čiščenja, specifična radioaktivna onesnažila in tipi proizvedenih odpadkov, ki nastanejo pri njihovem odstranjevanju.

Radon je hlapen plin, ki se lahko odstrani iz pitne vode s prezračevanjem ali z GAC. Oba procesa povzročata odpadke, ki niso primerni za rutinsko odstranjevanje, temveč zahtevajo primerno strokovno ravnanje. Radon (^{222}Rn) ima razpolovni čas približno 3,5 dni, po okvirno 28 dneh pa razpade do konca. Načeloma radon naj ne bi bil prisoten v katerem koli toku odpadkov iz konvencionalnega oskrbovalnega obrata, razen v zraku iz prezračevalne naprave. Razpadni produkt radona v uranovi razpadni verigi ^{210}Pb pa je prisoten v vseh materialih, ki adsorbirajo radon.

Nekateri materiali, ki se uporabljajo v procesih priprave pitne vode ali za direktno odstranjevanje kontaminantov (npr. GAC in smole iz ionske izmenjave) ali indirektno odstranjevanje adsorbirajo radionuklide. Ko je potrebna zamenjava teh materialov, je potrebno pravilno ravnanje s temi ostanki, saj vsebujejo med procesom čiščenja adsorbirane radionuklide [54].

Preglednica 5: Pregled procesov čiščenja in tipov odpadkov, nastalih pri odstranjevanju radionuklidov iz surove vode [54]

Proces čiščenja	Radionuklid, ki se odstranjuje	Tip ostanka/odpadka
Koagulacija/filtracija	Uran	Blato (alu/železo) Porabljena filtrska pralna voda
Mehčanje z apnom	Radij, uran	Apneno blato Porabljena filtrska pralna voda
Kationska izmenjava	Radij	Slanica Pralna voda
Anionska izmenjava	Uran	Slanica Pralna voda
Procesi odstranjevanja železa: Oksidacija/filtracija Adsorpcija na zelenem pesku	Radij	Porabljena filtrska pralna voda
Reverzna osmoza	Radij, uran	Nasičena (odpadna) raztopina
Elektrodializa	Radij, uran	Nasičena (odpadna) raztopina
Aeracija (prezračevanje)	Radon	Radon v zraku

V preglednici 6 so poleg postopkov čiščenja in radionuklidov, ki se odstranjujejo, navedeni tudi procesni materiali, ki so lahko kontaminirani z NORM in lahko zahtevajo posebno odstranjevanje.

Preglednica 6: Pregled procesov čiščenja in njihovih odpadnih produktov [54]

Proces čiščenja	Radionuklid, ki se odstranjuje	Procesni materiali
Koagulacija/filtracija	Radij, uran	Filtrski medij (pesek) Filtrski medij (ogljje)
Mehčanje z apnom	Radij, uran	Filtrski medij (pesek) Filtrski medij (ogljje)
Kationska izmenjava	Radij	Smola
Anionska izmenjava	Uran	Smola
Procesi odstranjevanja železa: Oksidacija/filtracija Adsorpcija na zelenem pesku	Radij	Filtrski medij (pesek) Filtrski medij (ogljje) Zeleni pesek
Reverzna osmoza	Radij, uran	Membrana
Elektrodializa	Radij, uran	Membrana
GAC adsorpcija	Radon, radij, uran	GAC
Selektivni sorbenti	Radij, uran	Selektivni medij sorbenta

6.7.6.2 Odstranjevanje radioaktivnih odpadkov

Za odstranjevanje radioaktivnih kontaminantov iz surove vode je na voljo paleta različnih postopkov, kot so: konvencionalna koagulacija/filtracija, ionska izmenjava, mehčanje z apnom, reverzna osmoza in adsorpcija z granuliranim aktivnim ogljem. Ti procesi kontaminante ločijo od pitne vode in jih

koncentrirajo v toku odpadkov. Prav tako te procese pogosto uporabljamo za odstranjevanje drugih neradioaktivnih onesnažil, zato obstaja verjetnost, da ti procesi koncentrirajo znatne stopnje radioaktivnosti v toku odpadkov, čeprav določen proces ni bil primarno konstruiran ali namenjen za odstranjevanje radioaktivnih snovi.

Poleg toka odpadkov, ki lahko vsebuje koncentrirane radioaktivne kontaminante nekateri materiali, ki se uporabljajo pri pripravi pitne vode, adsorbirajo radioaktivne snovi in jih permanentno zadržijo, kot npr. pesek, ki se uporablja pri filtraciji. Pesek adsorbira in zadrži radij na svojih površinah. Omenjeni radij sicer ne moti filtracijskega procesa, vendar je potrebno pesek ob zamenjavi odstraniti kot nevarni oz. radioaktiven odpadek.

V uporabljenem viru [54] iz leta 2001 je zapisano, da v ZDA do tega leta ni bilo obvezujoče zakonodaje na zvezni ravni glede odstranjevanja odpadkov NORM oz. TENORM iz industrije priprave pitne vode. Zaradi skrbi glede pravilnega ravnanja s temi odpadki pa je EPA že leta 1990 izdala priporočila z naslovom »Suggested Guidelines for the Disposal of Drinking Water Treatment Wastes Containing Naturally-Occurring Radionuclides«.

Pri lastnem raziskovalnem delu smo ugotovili, da tudi do časa pisanja diplomskega dela na zvezni ravni v ZDA ni obveznih zakonodajnih postopkov glede ravnanja s temi odpadki. Najnovejši dokument, ki ga je EPA izdala za to področje, je iz leta 2005 z naslovom »A Regulators' Guide to the Management of Radioactive Residuals from Drinking Water Treatment Technologies« [56]. Te smernice niso obvezujoče, so le priporočila za zvezne države in lokalne skupnosti, ki pa jih lahko upoštevajo ali pa tudi ne.

Glede regulacije na ravni EU smo našli projekt TENAWA [66] iz leta 1999, ki je preiskoval najbolj primerne metode za odstranjevanje naravnih radioaktivnih onesnažil iz pitne vode, eden izmed ciljev projekta je bil tudi podati priporočila za ravnanje in odstranjevanje radioaktivnih odpadkov, ki nastanejo pri pripravi pitne vode. Študija je sicer podala določena priporočila, vendar na podlagi našega raziskovanja ugotavljamo, da EU še ni izdala uradnih obvezujočih predpisov. Podobno kot v ZDA je ta problematika torej prepuščena posameznim državam.

V nadaljevanju bomo predstavili možne načine odstranjevanja tekočih in trdnih odpadkov ter blata s povišanimi vrednostmi TENORM iz industrije priprave pitne vode, podanih v preglednici 7, povzete po [54].

Preglednica 7: Opcije odstranjevanja glede na tip TENORM odpadka [54]

Tip odpadka	Opcije odstranjevanja				
	Direkten izpust	Izpust na KČN	Recikliranje	Podzemno injektiranje	Odlagališče odpadkov
Tekoči odpadki					
Raztopina od nevtralizacije kislin	✓	✓	✓	✓	
Pralna voda	✓	✓	✓	✓	
Slanica	✓	✓	✓	✓	
Koncentrat	✓	✓	✓	✓	
Izpiralna voda	✓	✓	✓	✓	
Trdni odpadki					
Blato		✓		✓	✓
Izrabljeni mediji					✓
Izrabljene membrane					✓

6.7.7 Možnosti odstranjevanja tekočih odpadkov

6.7.7.1 Direkten izpust

Direkten izpust je lahko možna opcija za odstranjevanje tekočih odpadkov, če ima industrijski obrat dostopno in primerno vodno telo. V ZDA mora vsak, ki spušča polutante iz točkovnih virov v vodna telesa, pridobiti ustrezno dovoljenje. Dovoljenje določa mejne vrednosti količin določenih polutantov, ki se lahko izpustijo ter zahteva monitoring in poročanje pristojnim organom. Na zvezni ravni v ZDA ni specifičnih mejnih vrednosti za izpuste radionuklidov v okolje, lahko pa jih določijo posamezne zvezne države. Dodaten problem pri tej opciji pa predstavlja tudi dejstvo, da BAT tehnike poleg radionuklidov hkrati odstranjujejo tudi druge kontaminante, za katere pa lahko veljajo mejne vrednosti za izpust, kar lahko močno omeji uporabo te opcije.

6.7.7.2 Izpust na KČN

Oskrbovalni obrati lahko tekoče odpadke izpustijo indirektno preko kanalizacije ali direktno s transportom odpadkov na KČN. Odpadki morajo ustrezati zahtevam posamezne KČN, drugače potrebujejo predčiščenje oz. predobdelavo. Vodstvo KČN lahko tudi zavrne sprejem takšnih odpadkov, če bi lahko povzročili probleme pri obratovanju. Pomembno je tudi, da EPA oz. njena zakonodaja v ZDA glede uporabe in odstranjevanja blata iz KČN ne pokriva radioaktivnih snovi. To pomeni, da TENORM v blatu iz KČN še vedno ni ustrezno reguliran.

6.7.7.3 Podzemno injektiranje

Ta opcija je problematična z vidika varstva podtalnice. V ZDA je dovoljena samo pod strogo določenimi pogoji. Najprej je potrebno ugotoviti klasifikacijo odpadka oz. ali je radioaktiven, nevaren

ali nenevaren odpadki. Če je odpadki radioaktiven (če presega koncentracije 2,22 Bq/L za ^{226}Ra , 2,22 Bq/L za ^{228}Ra ter 11,1 Bq/L za ^{238}U) je potrebno ugotoviti koncentracije posameznih omenjenih radionuklidov, vsota frakcij (relativnih deležev) pa ne sme presegati 1. Če pogojem ni zadoščeno, se tekoči odpadki ne sme injektirati.

6.7.8 Možnosti odstranjevanja trdnih odpadkov

Glede na karakteristike trdnih odpadkov, državnih in lokalnih specifičnih zahtev, cene in lokacije oskrbovalnega sistema se lahko odpadki odlagajo na odlagališčih komunalnih odpadkov, na odlagališčih nevarnih odpadkov ali na odlagališčih nizko radioaktivnih odpadkov. Primerno odlagališče se lahko določi na podlagi količine, koncentracije ter fizikalnih in kemijskih parametrov radiološko kontaminiranih odpadkov. Potrebne so tudi informacije o mobilnosti prisotnih radionuklidov in njihovih razpadnih produktov ter premislek o prihodnosti teh odpadkov ter odlagališča.

6.8 Čiščenje komunalne odpadne vode

Med pregledi in analizami blata iz komunalnih čistilnih naprav ter pepela iz sežiganja blata je bilo ugotovljeno, da včasih vsebujejo povišane koncentracije radionuklidov. Viri radioaktivnosti so ali povišane stopnje NORM v podtalnici ali (ne)avtorizirani izpusti v kanalizacijo iz različnih industrij [11].

Trdne organske snovi v odplakah koncentrirajo radionuklide, sežig takega blata pa jih še dodatno koncentrira. Nekdaj splošna praksa posipavanja blata iz čistilnih naprav ali pepela iz sežiga po kmetijskih zemljiščih lahko vodi v akumulacijo radionuklidov ter še posebno težkih kovin v zemljo in na koncu vnos v pridelke. Zaradi teh razlogov so številne države to prakso prepovedale ali pa so v tem procesu [11].

V Sloveniji je uporaba blata v kmetijstvu kot gnojilo regulirana z Uredbo o uporabi blata iz komunalnih čistilnih naprav v kmetijstvu (Ur. l. RS št. 62/08) [67]. Skladno s to uredbo se uporabljajo mejne vrednosti koncentracije težkih kovin v tleh, v ali na katera se vnaša obdelano blato, mejne vrednosti koncentracije težkih kovin v obdelanem blatu ter mejne vrednosti letnega vnosa težkih kovin. Uporaba blata v kmetijstvu je prepovedana, če koncentracija ene ali več težkih kovin v tleh oz. v obdelanem blatu presega mejne vrednosti. Mejnih dovoljenih radioloških parametrov za blato pa uredba ne zajema.

6.8.1 Prisotnost radioaktivnih snovi v odpadnem blatu ter pepelu iz sežiga blata

Radioaktivne snovi so večno prisotna komponenta naravnega okolja, prav tako pa se proizvajajo s človeškimi aktivnostmi. Prisotnost radioaktivnih materialov pa vzbuja skrb samo takrat, ko se

koncentracije dovolj povečajo nad naravno sevanje ozadja, da lahko povzročijo potencialno tveganje za zdravje.

V okolju so trije glavni viri radionuklidov, ki lahko vstopijo v komunalne vode in ČN:

- naravni viri (NORM),
- naravni viri s povišanimi koncentracijami zaradi človeških dejavnosti (TENORM) in
- umetni viri.

Naravni viri vključujejo geološke formacije (kamnine) in zemljine, ki vsebujejo uran, radij, torij, radon in druge radionuklide. Voda, ki izvira ali potuje skozi te formacije in zemljine, lahko transportira radioaktivne snovi, ki so ali raztopljene v sami vodi ali vezane na suspendirane trdne snovi v vodi. Radon se sprošča v atmosfero skozi zemljine in vodo in lahko vstopi v stavbe skozi porozne temelje. EPA svetuje meritve koncentracij radona v vseh domovih, šolah in javnih objektih, tudi na KČN.

TENORM kot drugi vir radionuklidov v okolju lahko vstopi v komunalni sistem iz podtalnice ali površinskih voda, rastlin in hrane, kot tudi iz potencialnih industrijskih izpustov iz drugih industrij, ki posredno proizvajajo TENORM odpadke (objekti priprave pitne vode, rudarjenje, fosfatna industrija, keramična industrija, papirnica ...).

Tretji vir radionuklidov pa predstavljajo človeški viri. Ti vključujejo materiale, proizvedene za ali kot rezultat obratovanja jedrskih reaktorjev in proizvodnje jedrskega goriva. Drugi umetni viri so posledica obratovanja pospeševalnikov, industrijskih aktivnosti, znanstvenega raziskovanja in uporabe v medicini. Umetni radionuklidi pa so lahko prisotni v okolju tudi zaradi jedrskih nesreč in testiranja jedrskega orožja (večinoma v preteklosti), vendar se ti običajno upoštevajo kot del sevanja ozadja.

Upravljalci KČN morajo dnevno nadzorovati več področij, upravljati monitoring in skrbeti za dobro obratovanje ČN. Eno teh področij pa je tudi zavedanje, da obstaja potencial, da se radioaktivni materiali lahko koncentrirajo v odpadnem blatu ali pepelu po sežigu tega blata. Radioaktivne snovi običajno sicer niso glavna skrb na KČN, kljub temu pa so komponenta toka odpadkov, ki ni vedno dobro razumljena s strani upravljalcev komunalnih naprav.

V poročilu [55] je navedeno, da od leta 1980 v ZDA ni bilo identificiranih primerov, kjer bi radioaktivni materiali v komunalnih napravah povzročili grožnjo za zdravje in varnost delavcev ter prebivalstva. Razlog za nadaljnje preiskave tega področja pa leži v tem, da je v nekaterih komunalnih napravah v preteklosti bilo odkrito povišanje koncentracij radioaktivnih snovi človeškega izvora. Glede na izkušnje iz preteklosti obstaja skrb, da se radioaktivne snovi lahko koncentrirajo v blatu KČN ter pepelu iz sežiga tega blata, kar lahko povzroči tveganje za zdravje in varnost delavcev ter splošne javnosti oz. prebivalstva.

V poročilu avtorji ugotavljajo, da koncentracije radionuklidov v analiziranih vzorcih blata in pepela 313 KČN v ZDA ne pomenijo povišane izpostavljenosti delavcev ali prebivalstva, vključujoč uporabo blata v kmetijstvu kot gnojilo in zato ne povzročajo zaskrbljenosti.

V 313 vzorcih blata in pepela so odkrili skupno 45 različnih radionuklidov, 8 radionuklidov (^7Be , ^{214}Bi , ^{131}I , ^{40}K , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{226}Ra , in ^{228}Ra) pa je bilo pristotnih v več kot 200 vzorcih. Najvišje koncentracije so bile izmerjene za ^{131}I , ^{201}Tl in ^{89}Sr (vsi so kratkoživi izotopi iz medicinske uporabe), prav tako pa je veliko vzorcev vsebovalo radij in uran. Vsi rezultati predstavljajo posamezno vzorčenje in ne upoštevajo različnih dnevnih, mesečnih ali sezonskih fluktuacij.

Trije glavni zaključki študije so:

- povišane koncentracije radioaktivnih snovi so bile najdene v nekaterih vzorcih blata in pepela, vendar niso nakazovale na obsežen problem,
- ocenjene doze potencialno izpostavljenih oseb so na splošno znatno pod vrednostmi, ki bi zahtevale ukrepe varstva pred sevanji,
- pri omejenih scenarijih (delavci na KČN, prebivanje na objektu) se lahko pojavijo doze nad mejnimi dovoljenimi dozami. To je bila primarno posledica radona v notranjosti objekta, ki se sprosti kot razpadni produkt NORM, kot npr. ^{226}Ra in ^{228}Th .

Poročilo tudi priporoča, da nadaljnje ukrepanje ni potrebno, če ocenjena efektivna doza (ne vključuje prispevka radona) ne presega 0,1 mSv/leto [55].

6.9 Priprava industrijske tehnološke vode

Več različnih industrij uporablja velike količine tehnološke vode npr. papirna industrija. Zaradi uporabljenih snovi se lahko znatne koncentracije radionuklidov akumulirajo v različnih proizvodih, stranskih produktih in odpadkih. Primer je papirna pulpa, ki lahko lovi težke kovine in radionuklide.

Določeni kemijski procesi vodijo v nabiranje usedlin znotraj cevi in napeljav, ki zahtevajo posebno obravnavo, če so radioaktivno kontaminirani. Znan je primer nekega odpadnega cevovoda, kjer je bila v reciklažnem obratu (železarni) ugotovljena povišana radioaktivnost. Pri raziskovanju vzroka na mestu nastanka je bilo ugotovljeno, da je cevovod iz procesa beljenja papirne gošče ter da so vir visoke radioaktivnosti usedline in obloge na ceveh. Po analizi vzorca je bila izmerjena specifična koncentracija 15.000 Bq/kg ^{226}Ra in okrog 4000 Bq/kg ^{230}Th .

6.10 Komentar na IJS poročilo

URSVJ je naročila študijo možnih NORM in TENORM virov z naslovom »Identifikacija TENORM v Sloveniji kot posledica preteklih dejavnosti in njihova inventarizacija« [9]. IJS je nato po navodilih

IAEA, ki so bila objavljena v »Technical Reports Series No. 419«, »EC RP115«, ter »UNSCEAR Report 1993« opravil celostni pregled možnih TENORM virov.

Poročilo povzema opravljene študije iz preteklih let, ki so zajemale: Rudnik urana Žirovski vrh, Rudnik živega srebra Idrija, Rudnik premoga v Kočevju, Rudnik rjavega premoga Senovo, Termoelektrarna Trbovlje, Termoelektrarna Šoštanj, Termoelektrarna – toplarna Ljubljana, TKI Hrastnik, Cinkarna Celje in Talum Kidričevo.

V okviru raziskovalne študije so bile identificirane tudi naslednje druge potencialne dejavnosti: železarstvo in jeklarstvo na Jesenicah (Acroni), železarska industrija (Metal Ravne), Rudnik črnega premoga Vremški Britof, Rudnik premoga Kanižarica, pridobivanje zemeljskega plina in olja (Nafta Lendava) in cirkonijevi minerali v industriji (Emo Kemija, Martex, Gorenje Keramika, Impol).

Vzorci so vzeli na specifičnih lokacijah v podjetjih, kjer so menili, da je koncentracija radionuklidov najvišja. Metodo imenujemo vzorčevanje na podlagi presoje oz. ang. *judgemental sampling approach*. Merilec je na podlagi subjektivne in vizualne ocene, zgodovinskih informacij ter meritev *in situ* sevanja gama zbral vzorce. Ti so bili najprej dehidrirani, pulverizirani ter odmerjeni na 100 cm³. Nato je bila izvedena laboratorijska meritev s HPGe detektorjem oz. visokoločljivostna spektrometrija gama.

Meritve so opravili skrbno in natančno ter vse rezultate in njihove negotovosti ustrezno tabelirali. Grafično so prikazali vzorčevalna mesta in povišane vrednosti ustrezno komentirali. Vrednosti, ki so jih izmerili leta 2004, so danes še vedno reprezentativne za posamezne industrije, kjer se industrijski postopki niso spremenili. Na deponijah, kjer so odloženi odpadki iz preteklosti, bi še danes izmerili podobne vrednosti, saj ima NORM zelo dolge razpolovne čase. Povišane vrednosti bi zaznali le v primerih, kjer se še vedno povečuje količina TENORM odpadkov oz. njihova koncentracija.

Trenutno (leta 2012) se stanje izboljšuje, saj je trend, da zmanjšamo svojo odvisnost od fosilnih goriv vedno večji. Tako rudarjenje ne bi vključevalo več premogovniške industrije, ki je bila po sežigu premoga velik vir TENORM odpadkov. Prav tako je prepovedana uporaba elektrofiltrskega pepela za izdelavo opek.

Pri veliko obravnavanih industrijah se prav tako pozna, da je ekonomsko in okoljsko bolj sprejemljivo reciklirati sekundarne surovine, kot pa rudariti za primarnimi.

Kot primer dobre remediacije nekdanje problematične industrije lahko navedemo Rudnik Žirovski vrh (RUŽV). Zapiralna dela v jami RUŽV so bila končana leta 2006, leta 2010 je bila dokončana sanacija odlagališča hidrometalurške jalovine Boršt, na zemljišču nekdanjega predelovalnega obrata je bila zgrajena gospodarska cona Todraž, prav tako pa je zagotovljen dolgoročen radiološki monitoring [68].

TENORM ni minljiva problematika, saj lahko vsako novo odpiranje primarnih industrij ponovno povzroči proizvodnjo z radionuklidi obremenjenih odpadkov in s tem možno izpostavljenost prebivalcev.

7 EKSPERIMENTALNI DEL

7.1 Metoda merjenja in opis merilne opreme

Za meritve zunanjega sevanja gama smo uporabljali kalibriran (priloga D1) prenosni instrument FieldSPEC IdentiFINDER, prikazan na sliki 2. IdentiFINDER je digitalni ročni gama spektrometer, namenjen za terensko merjenje. Omogoča:

- iskanje posameznih radioaktivnih virov ali območij, kontaminiranih z gama sevalci,
- samodejno identifikacijo radionuklidov na osnovi izmerjenega spektra gama žarkov,
- merjenje gama doze in hitrosti doze,
- indikacijo prisotnosti nevtronov na področju sevanja z določitvijo števila pulzov na sekundo (cps) in števila akumuliranih signalov nevtronov.

Instrument izvaja kvalitativno in kvantitativno analizo sevanja gama z uporabo scintilacijskega detektorja ($\emptyset 1,4'' \cdot 2''$ kristal NaI(Tl)) in interne Geiger-Müller (GM) cevi. Vgrajen digitalni procesor signalov s programsko opremo in interno bazo podatkov omogoča IdentiFINDER-ju izvedbo omenjenih funkcij.

Njegove prednosti so dimenzijska majhnost in nizka masa, enostavno upravljanje (s tremi gumbi) in pregledni meni, ki zagotavlja enostavnost uporabe. Zanesljiva in hitra začetna samo-kalibracija ter kontinuirana nadaljnja stabilizacija, ki teče v ozadju vzporedno z meritvijo, temelji na internem kalibracijskem viru ^{137}Cs , ki pa je pod mejo izvzetja. Uporabljeni instrument v tej različici žal ne omogoča prenosa rezultatov meritev na računalnik.

Primarno detekcijo zagotavlja scintilacijski detektor v območju od 10 nSv/h do 500 $\mu\text{Sv/h}$. Pri zelo visokih hitrostih doze (nad 500 $\mu\text{Sv/h}$) se scintilacijski detektor ugasne, prikaz pa nato temelji na GM cevi, vse do 1000 mSv/h [69].



Slika 2: Ročni prenosni merilnik gama in nevtronskega sevanja FieldSPEC IdentiFINDER

7.1.1 Princip delovanja detektorja

Kristal natrijevega jodida, dopiranega s talijem (NaI(Tl)) zaznava gama sevanje preko izbijanja elektronov iz orbital joda. Prosto potujoč elektron se nato rekonfigurira na atomih talija. Absorbiran elektron nato emitira elektromagnetni žarek oz. foton, ki potuje dalje po kristalu. Foton ima takšno energijo, da je kristal zanj skoraj prozoren, zato lahko pobegne iz kristala. Foton se nato absorbira v ploščah fotopomnoževalke, ki emitira snop elektronov. Količina elektronov je pod mejo merljive detekcije, zato je potrebno ta signal ojačiti. Fotopomnoževalka je priklopljena na visoko napetost, ki pospeši te elektrone do mere, da ponovno izbijajo še več elektronov iz naslednjih plošč. Ta plaz se nato stopnjuje, dokler ne dobimo merljivega pulza.

Detektor omogoča tudi identifikacijo gama sevalca, kar pomeni, da opravlja spektroskopske meritve. Energijo spektra določi tako, da izmeri zadostno količino fotonov različnih energij ter s tem določi vrsto sevalca. Foton višje energije odcepi sorazmerno večje število elektronov, ki nato potujejo po prej omenjenem postopku skozi fotopomnoževalko. Višina pomnoženega signala je zato sorazmerna z energijo fotona.

V primeru, ko pride do zasičenja signala oz. maksimalnega praga detekcije scintilacijskega detektorja, se detektor preklopi na Geigerjev števec. Ta ne omogoča spektroskopskih meritev, temveč le merjenje hitrosti doze.

V Geigerjevem števcu imamo tanko žičko v sredini dolge cevi. Cev in žička sta električno izolirana drug od drugega. Med njima je visoka napetost, ki je tik pod prebojno napetostjo. Vpadni gama žarek povzroči ionizacijo plina med žičko in cevjo, kar povzroči emisijo elektrona. Zaradi visoke napetosti se ta elektron začne pospešeno gibati proti žički. V svojem pospešenem potovanju se zaletava v druge atome plina in jih posledično ionizira. Tako ponovno nastane val oz. plaz elektronov, ki ga lahko izmerimo.

Na sliki 3 so shematsko prikazani najpomembnejši sestavni deli detektorja. Akumulator oz. vgrajena baterija skrbi za napajanje oz. zagotavlja potrebno napetost, digitalni signalni procesor obdeluje prejete signale iz fotopomnoževalke, kristal NaI(Tl) pa je sestavni del, ki sprejema gama sevanje.



Slika 3: Shematski prikaz najpomembnejših sestavnih delov instrumenta

7.2 Postopek dela

Ob obisku vsake lokacije smo si najprej ogledali celoten postopek čiščenja odpadnih oz. priprave pitnih voda. Po natančnem pregledu ČN oz. vodarne smo določili mesta meritev. Nato smo na dveh različnih točkah, blizu objektov, izmerili naravno sevanje ozadja na dogovorjeni višini 1 m od tal. Ta meritev je bila izvedena na prostem, na asfaltni oz. betonski podlagi.

Meritve gama aktivnosti odpadnega blata iz ČN ter filtrov ultrafiltracije so potekale neposredno ob viru tako, da smo prenosni detektor, kolikor je bilo mogoče, približali potencialnemu viru gama sevanja in po približno 1 minuti odčitali rezultat.

7.3 Opis navezave stikov

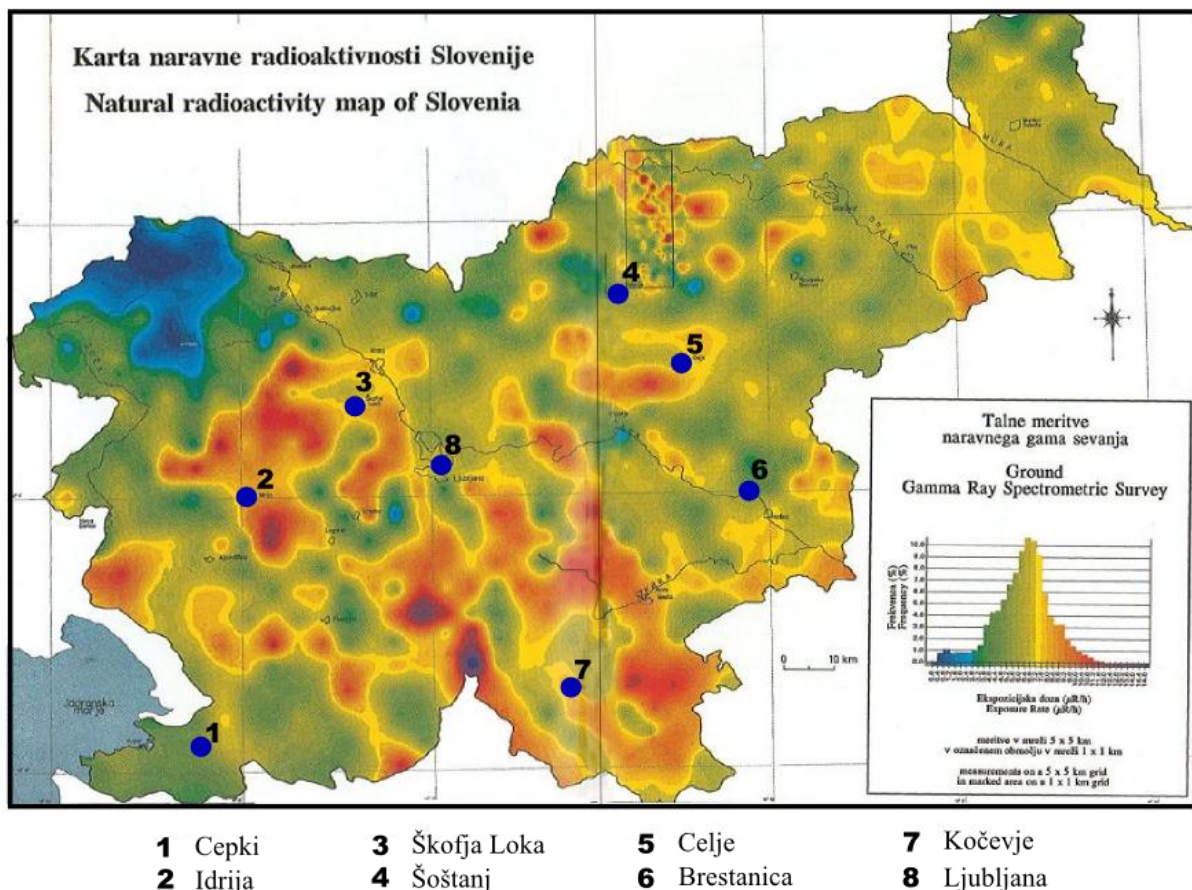
Po predhodni izbiri podjetij za izvedbo naloge smo sestavili dopis (priloga C1) in ga poslali komunalnim podjetjem po Sloveniji, ki upravljajo z dotičnimi ČN in vodarnami. Po prejetih pozitivnih odgovorih s strani pooblaščenih oseb, smo v korespondenci določili termine obiska vsake posamezne lokacije. Sodelovanje so potrdili v vseh zaprosenih komunalnih podjetjih, povzetih v preglednici 8.

Preglednica 8: Potrjene lokacije, termini obiskov ter pooblaščen kontaktne osebe

Javno podjetje	Termin obiska	Kontaktna oseba
Rižanski vodovod Koper	11.6.2012 ob 10h	David Bembič
Komunala Idrija	11.6.2012 ob 14h	Mateja Rejc
Kostak Krško	12.6.2012 ob 12h	Sabina Senica
Komunalno podjetje Velenje	13.6.2012 ob 10h	Nataša Uranjek-Ževart
Loška komunala (Škofja Loka)	14.6.2012 ob 11h	Mojca Mueller
Komunala Kočevje	18.6.2012 ob 12h	Bojana Klepac
VO-KA Celje	27.6.2012 ob 12h	Marko Planinšek
VO-KA Ljubljana	4.7.2012 ob 9h	Vesna Mislej

7.4 Metodologija izbire lokacij

Merilna mesta oz. lokacije smo izbrali na podlagi karte naravne radioaktivnosti: Idrija, Škofja Loka, Celje, Kočevje in Ljubljana. Iz slike 4 lahko razberemo talne meritve naravnega gama sevanja, kjer so dobro vidne intenzitete sevanj naravnih radionuklidov v zemlji na območju omenjenih mest.



Slika 4: Karta naravne radioaktivnosti Slovenije z označenimi merilnimi lokacijami [5]

Glavno vodarno rižanskega vodovoda smo izbrali zaradi velikega števila oskrbovancev (približno 86.000) [70] oz. posledično velikega pretoka pripravljene pitne vode ter metode ultrafiltracije, ki predstavlja najbolj napreden postopek priprave pitne vode v Sloveniji.

Centralno čistilno napravo Šaleške doline smo izbrali zaradi vplivnega območja premogovnika ter odlagališč sadre iz termoelektrarne Šoštanj. Izkopan premog običajno vsebuje veliko jalovinskih mineralov, med katerimi so lahko tudi radioaktivni. Posledično bi bilo mogoče, da se izkopani materiali skladiščijo na površini in pronicajo v podtalnico, pri čemer bi lahko opazili povišane vrednosti radioaktivnosti tudi v blatu iz ČN. Meritve zunanega gama sevanja smo izvedli tudi ob odlagališču odžveplevalne sadre ob Velenjskem jezeru, kjer se ta deponira skupaj s pepelom iz sežiga premoga.

V primeru, da bi na kateri od primarno preiskovanih lokacij izmerili povišanje naravne radioaktivnosti, smo potrebovali referenčno čistilno napravo, ki ni na območju povišanja talnih vrednosti. Pozitiven odgovor za meritev smo dobili od ČN Brestanica.

Zaradi dejstva, da je ČN Ljubljana po obsegu največja ČN v Sloveniji, smo tudi tam želeli izmeriti radioaktivnost odvečnega biološkega blata. Dehidrirano blato je skladiščeno v velikem betonskem zalogovniku in je zelo težko dostopno, zato ne dopušča možne izpostavljenosti delavcev. Manjšo količino povprečnega mesečnega vzorca granuliranega dehidriranega blata smo oddali na analizo s HPGe detektorjem v laboratorij Zavoda za varstvo pri delu v Ljubljani.

7.5 Čistilna naprava Idrija

Na čistilni napravi Idrija, prikazani na sliki 5, poteka čiščenje odpadnih voda iz celotne Idrije z okolico. Nazivna velikost ČN je 4000 PE [42]. V čistilni napravi uporabljajo mehansko in biološko čiščenje odpadnih voda. Odpadna voda po prvotnem mehanskem čiščenju potuje v primarni usedalnik, kjer poteka biološka stopnja, nato pa se mokro blato shranjuje v bazenu za nedehtirano blato, kot je prikazano na sliki 6. Sledi proces dehidracije blata s centrifugami, pri čemer nastane dehidrirano blato, ki se zbira v zabojniku, prikazanem na sliki 7.

Meritev je potekala v treh sklopih. Najprej smo izmerili sevanje ozadja na dveh lokacijah, kot je prikazano na sliki 8. Meritev je potekala nekaj minut, da se je napaka meritve ustrezno zmanjšala. Povprečno sevanje ozadja smo namerili 50 ± 10 nSv/h. Točki meritev sta označeni na sliki 8 z zeleno barvo. Na sliki 8 sta prav tako označeni točki meritev dehidriranega in nedehtiranega blata. Vsi rezultati so povzeti v preglednici 9.

Preglednica 9: Rezultati meritev hitrosti doze na ČN Idrija

Merilno mesto	Hitrost doze [nSv/h]
Nedehtirano blato v odprtem bazenu	60 ± 10
Dehtirano blato v zabojniku	60 ± 10
Sevanje ozadja	50 ± 10



Slika 5: Čistilna naprava Idrija [40]



Slika 6: Bazen za nedehidrirano blato na ČN Idrija



Slika 7: Zabojujnik za dehidrirano blato na ČN Idrija



- Meritev dehidriranega blata
- Meritev nedehidriranega blata
- Meritev ozadja

Slika 8: Vzorčevalna mesta na ČN Idrija [41]

7.6 Vodarna Cepki, Rižanski vodovod

Vodarna, ki smo jo obiskali, je bila zgrajena leta 1997 in je prikazana na sliki 9. Kot vir surove vode uporablja površinski vir in sicer reko Rižano. Ta predstavlja glavni vir pitne vode za celotno obalno regijo. Vodarna oz. rižanski vodovod tako oskrbuje od 86.000 do 120.000 (v turistični sezoni) oskrbovancev s pitno vodo. V vodarni se kot glavni postopek priprave pitne vode uporablja postopek ultrafiltracije [70].

V vodarni je nameščenih 10 ultrafiltracijskih blokov, vsak blok pa je sestavljen iz 30 modulov oz. filtrov (nekaj od teh je vidnih na sliki 10). V posameznem modulu je po celotnem prerezu modula nameščena membrana iz acetatne celuloze. Leta 2009 je bila opravljena menjava modulov in povečana zmogljivost čiščenja, ki trenutno znaša $40.200 \text{ m}^3/\text{dan}$ oz. 465 L/s [49].

Pri postopku ultrafiltracije kot stranski produkt nastajajo odpadne tehnološke vode in odpadno blato. V vodarni je v ta namen nameščena samostojna čistilna naprava, ki omogoča kosmičenje, usedanje, zgoščevanje in na koncu centrifugiranje blata. Na koncu postopka obdelave blata se dehidrirano blato odloži v zabojnik ob stavbi vodarne, ki je prikazan na sliki 11.

Meritve na lokaciji vodarne Cepki smo začeli v notranjosti objekta, kjer smo najprej izmerili naravno sevanje ozadja v središču nadstropja, kjer se nahajajo ultrafiltracijski bloki. Nato smo v neposredni bližini ultrafiltracijskih modulov oz. filtrov izmerili sevanje gama, kjer bi lahko prišlo do povišanja hitrosti doz. Po meritvah več različnih posameznih modulov smo dobili enak povprečni rezultat. Na koncu smo na prostem v zabojniku izvedli še meritev dehidriranega blata, ki predstavlja zadnji odpadni produkt procesa ultrafiltracije in izmerili enako vrednost, kot je bilo naravno ozadje na asfaltirani površini v bližini. Rezultati meritev so v tabelarični obliki predstavljeni v preglednici 10. Na sliki 12 pa so iz ptičje perspektive vidna vzorčevalna mesta na območju vodarne.



Slika 9: Glavna procesna stavba vodarne Cepki [43]



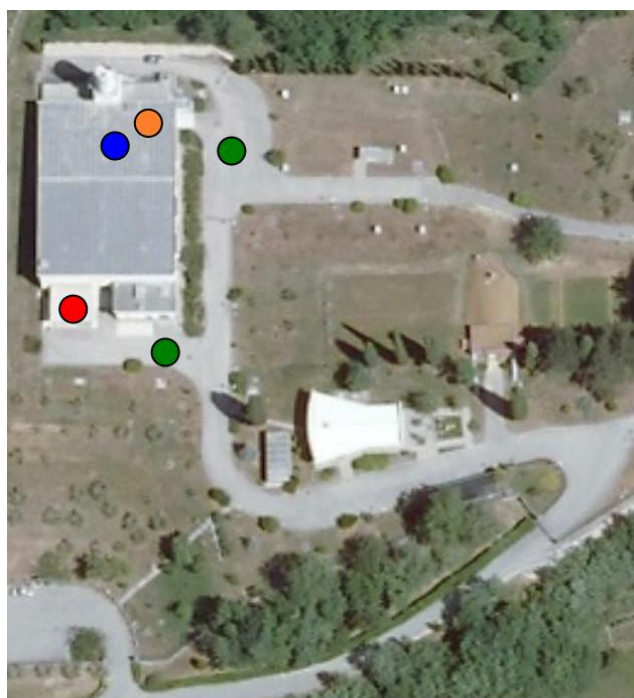
Slika 10: Moduli ultrafiltracije v vodarni Cepki



Slika 11: Dehidrirano blato v zabojniku vodarne Cepki

Preglednica 10: Rezultati meritev hitrosti doz v vodarni Cepki

Merilno mesto	Hitrost doze [nSv/h]
V notranjosti objekta (na sredini hale)	70 ± 10
Ob ohišju filtra	60 ± 10
Dehidrirano blato iz ČN v zabojniku	50 ± 10
Sevanje ozadja	50 ± 10



- Meritev dehidriranega blata
- Meritev filtrov ultrafiltracije
- Meritev ozadja
- Meritev ozadja v notranjosti objekta

Slika 12: Vzorcevalna mesta na področju vodarne Cepki [41]

7.7 Čistilna naprava Brestanica

S ČN Brestanica, prikazano na sliki 13, upravlja komunalno podjetje Kostak d.d. iz Krškega. Obratuje od leta 2005, njena projektirana velikost je 4800 PE. Po predhodnem mehanskem čiščenju odpadna voda potuje na radialni prezračevalni bazen, nato pa se preliva v naknadni usedalnik. Na dnu tega usedalnika se v lijaku useda blato, ki se nato gravitacijsko preliva v črpališče povratnega in odvečnega blata. Odvečno blato se periodično črpa v napravo za dehidracijo blata [45].

Najprej smo opravili meritev naravnega sevanja ozadja na asfaltni površini v neposredni bližini ČN. Obe točki meritev sta označeni na sliki 16. Povprečno sevanje ozadja v obeh točkah je bilo (70 ± 10 nSv/h). V nadaljevanju smo se v notranjosti objekta s prenosnim detektorjem gama sevanja približali nedehidriranemu blatu, pred vstopom v centrifugo (slika 14). Namerili smo aktivnost enako sevanju v notranjosti stavbe. Meritev smo zaključili z meritvijo dehidriranega blata, ki se zbira v zunanjem zabojniku (slika 15). Rezultat ni pokazal višje aktivnosti, temveč celo malo nižjo, vendar lahko to pripišemo merilni napaki oz. toleranci. Na sliki 16 pa so v tlorisu prikazana vsa merilna mesta. V preglednici 11 so podani vsi izmerjeni rezultati še v tabelarični obliki.



Slika 13: Stranski pogled na ČN Brestanica [45]



Slika 14: Nedehidrirano blato v procesu pred centrifugiranjem



Slika 15: Dehidrirano blato v zbirnem zabojniku



- Meritev dehidriranega blata
- Meritev nedehidriranega blata
- Meritev ozadja

Slika 16: Vzorcevalna mesta na ČN Brestanica [41]

Preglednica 11: Rezultati meritev hitrosti doz na ČN Brestanica

Merilno mesto	Hitrost doze [nSv/h]
Nedehidrirano blato	70 ± 10
Dehidrirano blato	60 ± 10
Notranjost stavbe	70 ± 10
Sevanje ozadja	70 ± 10

7.8 Centralna čistilna naprava Škofja Loka

»Centralna Čistilna Naprava (CČN) Škofja Loka je mehansko-biološka čistilna naprava z anaerobno stabilizacijo blata in izkoriščanjem bioplina za proizvodnjo elektrike in toplote.« [52]. Prikazana je na sliki 17.

»Njena kapaciteta (zmogljivost) je 85.000 PE (populacijskih enot). Lastnica čistilne naprave je občina Škofja Loka, v skladu s koncesijsko pogodbo pa jo upravlja Loška komunala d.d. Škofja Loka. CČN Škofja Loka deluje od leta 1974, zgrajena in dograjena pa je bila po posameznih stopnjah: leta 1981 je bila dograjena druga, leta 1991 pa tretja biološka stopnja.« [52].

»Na CČN Škofja Loka doteka odpadna voda iz gospodinjstev, industrije in negospodarskih dejavnosti, iz mesta Škofja Loka in naselij v okolici Škofje Loke. Ker je kanalizacija zgrajena v mešanem sistemu, se na CČN Škofja Loka čisti tudi padavinska odpadna voda.« [52].

Voda na CČN potuje skozi dve fazi čiščenja:

- predčiščenje oz. mehanska stopnja obsega grobe in fine grablje, peskolov in lovilec maščob,
- biološka stopnja sestoji iz primarnega usedalnika, prezračevalnika in sekundarnega usedalnika.

Očiščena odpadna voda odteka v reko Soro. Tretja stopnja čiščenja (odstranjevanje celotnega dušika in fosforja) še ni zgrajena. Usedline iz primarnih usedalnikov in presežki mikroorganizmov se prečrpajo v betonske zalogovnike oz. gnilišča (slika 18), kjer se torej zbira nedehidrirano blato. To se nato po potrebi dehidrira, končni produkt dehidrirano blato pa se odda pooblaščenemu prevzemniku.

Ob obisku CČN Škofja Loka smo najprej izmerili naravno sevanje ozadja v točkah, prikazanih na sliki 20. Povprečna vrednost obeh meritev je bila (50 ± 10 nSv/h). Nato smo dobili vzorec nedehidriranega blata iz betonskega zalogovnika, viden na sliki 19, čigar izmerjena aktivnost pa pričakovano ni zelo odstopala od naravne aktivnosti ozadja. Zaradi skladiščenja nedehidriranega blata v velikem betonskem zalogovniku ni verjetno, da bi lahko prišlo do višje izpostavljenosti delavcev, tudi če bi blato imelo povišano aktivnost. V preglednici 12 so podani rezultati meritev vzorca nedehidriranega blata in sevanja ozadja, žal pa v času obiska CČN ni bilo na zalogi večje količine dehidriranega blata, zato ta meritev ni bila mogoča.



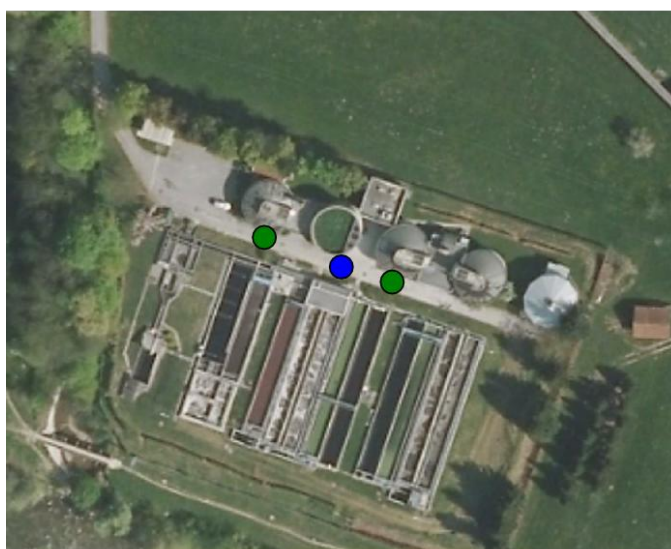
Slika 17: Pogled na ČČN Škofja Loka [44]



Slika 18: Gnilišča oz. zbiralniki nedehidriranega blata



Slika 19: Vzorec nedehidriranega blata



- Meritev nedehidriranega blata
- Meritev ozadja

Slika 20: Pregled vzorčevalnih mest na ČČN Škofja Loka [41]

Preglednica 12: Rezultati meritev hitrosti doz na ČN Škofja Loka

Merilno mesto	Hitrost doze [nSv/h]
Vzorec nedehidriranega blata	60 ± 10
Sevanje ozadja	50 ± 10

7.9 Centralna čistilna naprava Šaleške doline, Šoštanj

»Čiščenje odpadnih voda na CČN Šaleške doline, poteka po postopku biofiltracije s fiksirano biomaso, v katerih se ciljno vodi oksidacija ogljika, nitrifikacija in denitrifikacija. Ta tehnologija bistveno zmanjša potrebni volumen naprave ob enakih učinkih čiščenja.« [53].



Slika 21: Pogled na CČN Šaleške doline, Šoštanj [46]

CČN Šaleške doline (slika 21) ima torej vse tri stopnje čiščenja (primarno, sekundarno in terciarno), projektirano kapaciteto 50.000 PE in maksimalni dotok $2800 \text{ m}^3/\text{h}$.

»V liniji obdelave blata in izrabe bioplina se primarno in odvišno blato iz dveh primarnih usedalnikov črpa v zgoščevalnik, kjer se surovo blato delno zgosti od 2 do 4 % suhe snovi. Z doziranjem polielektrolita v mešalni posodi in napravi za mehansko zgoščevanje se blato z vsebnostjo do 6 % suhe snovi črpa v primarno gnilišče s pomočjo ekscentrične monočrpalkke. Ostanek, blatenica pa se odvaja v bazen za septiko, nato na začetek čiščenja odpadne vode. V sekundarnem gnilišču se delno blato dokončno anaerobno stabilizira. Pregnito blato se črpa v zalogovnik, kjer se meša s flokulantom ter prečrpava z dvema ekscentričnima črpalkama na centrifugo. Pogon bobna in polža odstranjuje dehidrirano blato iz centrifuge: na transportni trak in v kontejner.« [53].

Ob obisku CČN smo najprej izmerili aktivnost naravnega sevanja ozadja v točkah, prikazanih na sliki 24. Meritev nedehidriranega blata ni bila mogoča, saj je shranjeno v velikih betonskih zalogovnikih oz. gniliščih, kjer pa tudi ne predstavlja možne poti za izpostavljenost morebitnemu ionizirajočemu sevanju. Aktivnost dehidriranega blata smo izmerili v velikem 30 m^3 zabojniku za odvoz. Slika 23 prikazuje centrifugo za dehidracijo blata, na sliki 22 pa je vidno dehidrirano blato na poti iz centrifuge in naprej na transportni trak.

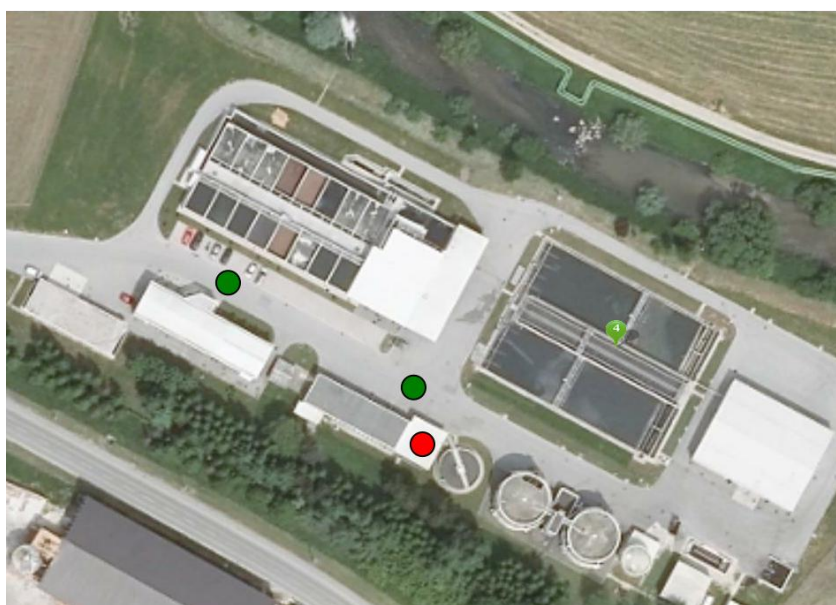
V preglednici 13 so tabelarično podani rezultati meritev dehidriranega blata ter naravnega sevanja ozadja tako na prostem, kot v procesnem objektu.



Slika 22: Dehidrirano blato na poti iz centrifuge



Slika 23: Centrifuga za dehidracijo blata



- Meritev dehidriranega blata
- Meritev ozadja

Slika 24: Vzorčevalna mesta meritev ozadja in blata na CČN [41]

Preglednica 13: Rezultati meritev hitrosti doz na CČN Šaleške doline

Merilno mesto	Hitrost doze [nSv/h]
Dehidrirano blato	45 ± 10
Notranjost stavbe	55 ± 10
Sevanje ozadja	55 ± 10

7.10 Centralna čistilna naprava Kočevje

CČN Kočevje obratuje od leta 1981, nanjo pa je priključeno mesto Kočevje in njegova bližnja okolica. Na ČN se prečiščujejo komunalne, tehnološke in padavinske vode (mešani sistem kanalizacije). Leta 2008 je bila izvedena razširitev in posodobitev ČN. Sedanja projektirana velikost je 30.000 PE, proces čiščenja odpadnih voda pa zajema vse tri stopnje, vključno z denitrifikacijo in defosforizacijo [54].

Na sliki 25 so vidni usedalniki novega dela CČN. Po meritvah ozadja (vzorčevalna mesta so vidna na sliki 28) smo izmerili aktivnost vzorca nedehidriranega blata, prikazanega na sliki 27. Po pričakovanih aktivnost ni odstopala od sevanja ozadja (50 ± 10 nSv/h). Večje količine nedehidriranega blata, ki bi podala bolj merodajno meritev, nismo mogli izmeriti, saj je skladiščena v betonskih gniliščih (slika 26) in tako ne predstavlja razloga za morebitno skrb s stališča varstva pred sevanji. V preglednici 14 je pregled meritev, izvedenih na CČN Kočevje. Vključen je tudi vzorec dehidriranega blata (z enako izmerjeno aktivnostjo kot ozadje objekta), žal pa v času obiska ni bila prisotna večja (nekaj m³) količina dehidriranega blata, da bi lahko dobili merodajno meritev.



Slika 25: Pregled usedalnikov na CČN Kočevje [47]



Slika 26: Gnilišča na CČN Kočevje



Slika 27: Vzorec nedehidriranega blata iz gnilišča



- Meritev nedehidriranega blata
- Meritev ozadja

Slika 28: Tlorisni prikaz vzorčevalnih mest (ČCN Kočevje) [41]

Preglednica 14: Rezultati meritev hitrosti doz na ČN Kočevje

Merilno mesto	Hitrost doze [nSv/h]
Vzorec nedehidriranega blata	50 ± 10
Vzorec dehidriranega blata	70 ± 10
Notranjost stavbe	70 ± 10
Ob zunanosti gnilišča (betonski zalogovnik)	50 ± 10
Sevanje ozadja	50 ± 10

7.11 Čistilna naprava Celje

Čistilna naprava Celje (slika 29) je pričela z obratovanjem leta 2005, maksimalna projektirana obremenitev znaša 85.000 PE. Sedanji deževni dotok znaša $1950 \text{ m}^3/\text{h}$, sušni pa $1230 \text{ m}^3/\text{h}$ [55].

»Biolško čiščenje odpadne vode se vrši s suspenzijo biološkega blata. Do obremenitve cca. 75.000 PE naprava obratuje kot naprava z aerobno stabilizacijo blata (podaljšana aeracija). Čiščenje odpadne vode obsega odstranjevanje mehanskih delcev, organskih, dušikovih in fosforjevih spojin. Dušikove spojine se odstranjujejo z izmenično nitri/denitrifikacijo, fosforjeve spojine pa s kombiniranim biološko - kemijskim izločanjem fosforja. V ta namen sta zgrajena anaerobna bazena.« [55].

»Potreben kisik za delovanje mikroorganizmov v suspenziji biološkega blata se v prezračevalne/aerobne bazene dovaja preko puhal s stisnjenim zrakom. Podvodna mešala, vgrajena v anaerobnem bazenu, anoksičnem in oksičnem delu prezračevalnega bazena, mešajo vsebino bazenov in preprečujejo usedanje biološkega blata na dnu bazenov.« [55].

Na sliki 30 je s strani viden betonski zalogovnik za nedehidrirano blato, slika 31 pa prikazuje to blato v notranjosti zalogovnika. Meritev aktivnosti nedehidriranega blata v notranjosti je pokazala samo minimalno povišanje glede na sevanje ozadja na asfaltu.

Odvečno blato iz zalogovnika se dehidrira na dveh centrifugah, nato potuje po polžnem vijaku do velikega, 30 m³ zabojnika (slika 33 prikazuje meritev dehidriranega blata v zabojniku) in se odvaža v Toplarno Celje, kjer se sežiga z lahkogorljivo frakcijo komunalnih odpadkov ter ogreva vzhodni del mesta Celje [55]. Meritev dehidriranega blata v zabojniku je sicer pokazala dvakratno aktivnost ozadja (70 ± 10 nSv/h), vendar je aktivnost še vedno popolnoma sprejemljiva.

Na sliki 32 so razvidna vzorčevalna mesta za meritev ozadja ter meritvi nedehidriranega in dehidriranega blata na ČN Celje. Preglednica 15 pa podaja rezultate še v pregledni tabelarni obliki.



Slika 29: Aeroposnetek ČN Celje [48]

Preglednica 15: Rezultati meritev hitrosti doz na ČN Celje

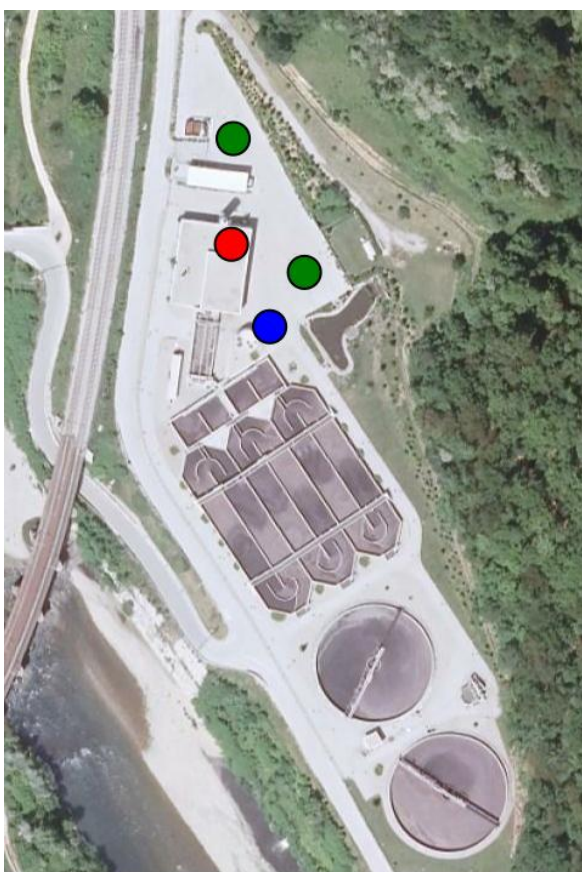
Merilno mesto	Hitrost doze [nSv/h]
Nedehidrirano blato v betonskem zalogovniku	50 ± 10
Dehidrirano blato v zabojniku	70 ± 10
Sevanje ozadja	35 ± 10



Slika 30: Zalogovnik za nedehidrirano blato na ČN Celje



Slika 31: Nedehidrirano blato v notranjosti zalogovnika



- Meritev dehidriranega blata
- Meritev nedehidriranega blata
- Meritev ozadja

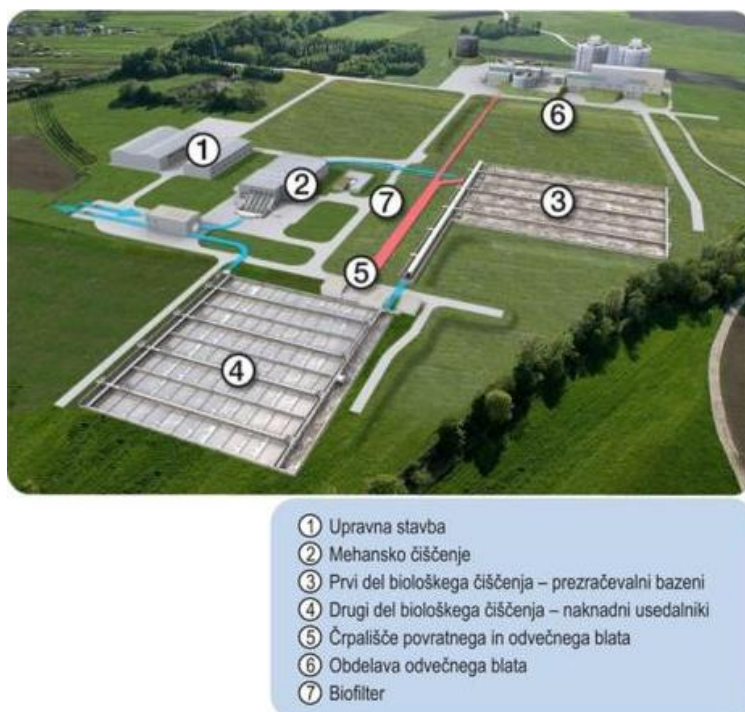
Slika 32: Tlorisni prikaz vzorčevalnih mest na ČN Celje [41]



Slika 33: Dehidrirano blato v velikem 30 m³ zabojniku

7.12 Centralna čistilna naprava Ljubljana

CČN Ljubljana (shematsko prikazana na sliki 34) je enostopenjska mehansko-biološka čistilna naprava in je namenjena za odstranjevanje neraztopljenih snovi, ogljikovih spojin in za nitrifikacijo. Za obdelavo odvečnega blata, ki nastaja v fazi biološkega čiščenja z aktivnim blatom, je predvidena anaerobna stabilizacija odvečnega blata v ogrevanih gniliščih, strojno zgoščanje in centrifugiranje ter sušenje blata do vsebnosti suhe snovi nad 90 %. Posušeno odvečno blato v obliki granul je zaradi primerne oblike in toplotne vsebnosti koristen odpadek – sekundarno gorivo. Bioplin, ki nastaja pri anaerobnem procesu stabilizacije svežega blata, se porabi v procesu za sušenje blata in ogrevanje gnilišč. Na CČN Ljubljana se dnevno očisti okoli 80.000 m³ odpadne vode. Projektirana zmogljivost čistilne naprave je 360.000 PE [57].



Slika 34: Shematski prikaz CČN Ljubljana [57]

CČN Ljubljana je največja ČN v Sloveniji, tako po projektirani zmogljivosti, kot tudi po volumnu dejansko očiščene odpadne vode. Največji delež odpadkov, ki nastajajo pri obratovanju ČN predstavlja odpadno blato, ki nastaja pri biološkem čiščenju. Blato ob začetku procesa obdelave vsebuje visok delež vode in organskih snovi (na sliki 35 je vidno mokro blato med procesom dehidracije), končni produkt pa je stabiliziran biološko razgradljiv odpadek, ki se ga lahko uporabi za kompostiranje ali kot sekundarno trdno gorivo.



Slika 35: Mokro blato med procesom dehidracije



Slika 36: Zunanji jekleni zalogovnik za dehidrirano blato na CČN Ljubljana

Preglednica 16: Karakteristike procesa obdelave blata na CČN Ljubljana [58]

Karakteristike	Vrednost
Povečanje suhe snovi blata v procesu obdelave	iz 0,8 % na min. 90 %
Zmanjšanje volumna blata v procesu obdelave	iz 900.000 m ³ na 6.000 m ³
Temperatura blata v gnilišču	36 °C ± 1 °C
Skupni volumen gnilišč	14.600 m ³
Temperatura sušenja blata	500 °C
Letna proizvodnja bioplina	2.000.000 m ³ (pri 1 bar in 20 °C)
Letna količina posušenega blata	4.500 t
Izgled pelet	Sive granule velikosti 2-4 mm

Zaradi popolnoma avtomatiziranega procesa od črpanja tekočega blata iz usedalnikov do sušenja in končnega skladiščenja dehidriranih pelet v jeklenem silosu (slika 36), meritve hitrosti doz blata na CČN Ljubljana fizično niso bile izvedljive. Zato smo se odločili za laboratorijsko analizo vzorca s HPGe detektorjem. Povprečni junijski vzorec (granulirani peleti, volumen vzorca 1 dm³) smo oddali v Laboratorij za merjenje specifičnih aktivnosti radionuklidov pri Zavodu za varstvo pri delu v Ljubljani. Rezultati analize meritev specifične aktivnosti radionuklidov so podani v spodnji preglednici.

Preglednica 17: Specifične aktivnosti radionuklidov v povprečnem vzorcu blata s CCN Ljubljana

Radionuklid	Specifična aktivnost [Bq/kg]
^7Be	$423,7 \pm 15,7$
^{40}K	$106,2 \pm 11,4$
^{210}Pb	$226,4 \pm 20,3$
^{232}Th (^{228}Ra)	$8,9 \pm 1,4$
^{232}Th (^{228}Th)	$6,8 \pm 1,4$
^{238}U	$45,5 \pm 11,3$
^{226}Ra	$8,1 \pm 0,8$
^{131}I	$506,3 \pm 13,6$
^{137}Cs	$9,4 \pm 0,7$

7.13 Odlagališče sadre ob Velenjskem jezeru

Odlagališče sadre je v lasti Premogovnika Velenje. Dostop na odlagališče je dovoljen samo pooblaščenim osebam, vendar je ob odlagališču speljana javna pešpot, na kateri smo tudi izvedli meritve. Sliki 37 in 38 prikazujeta pogled na odlagališče, na sliki 39 pa so vidna mesta meritev. Vse meritve so bile izvedene nad naravno podlago oz. zemljino.

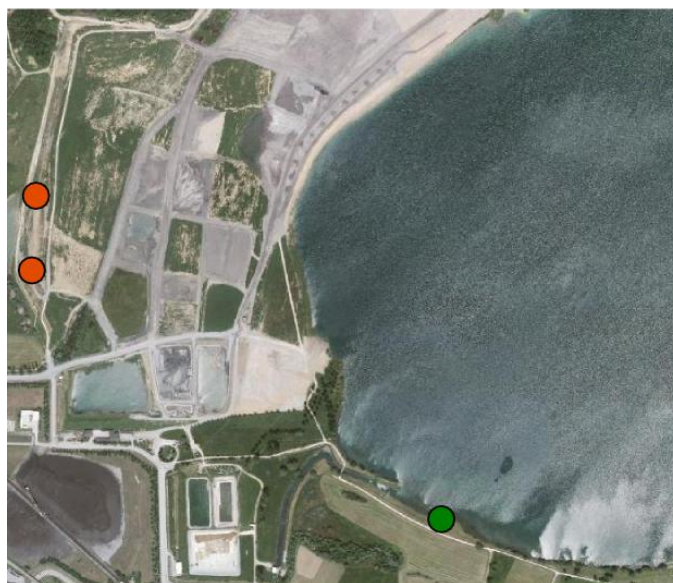
V preglednici 18 so podani rezultati meritev aktivnosti ozadja in sicer povprečna vrednost aktivnosti ob ograji ter meritev ozadja na razdalji približno 100 m od odlagališča. V neposredni bližini deponije (na pešpoti) smo izmerili določeno povišanje aktivnosti, vendar so vrednosti popolnoma sprejemljive. Ne moremo pa izključiti verjetnosti, da so lahko višje vrednosti prisotne na površini samega odlagališča, kar bi lahko odvisno od višine aktivnosti pomenilo določeno povišano izpostavljenost delavcev odpadkom, obremenjenih s TENORM.



Slika 37: Odlagališče sadre



Slika 38: Odlagališče sadre



● Meritev ob ograji odlagališča sadre
 ● Meritev ozadja

Slika 39: Vzorčevalna mesta meritev ob Velenjskem jezeru v občini Šoštanj [41]

Preglednica 18: Rezultati meritev hitrosti doz ob deponiji sadre v občini Šoštanj

Merilno mesto	Hitrost doze [nSv/h]
Ob ograji odlagališča	100 ± 10
Ozadje ob jezeru	60 ± 10

7.14 Diskusija rezultatov

Kot smo predvideli z uvodno prikazanima delovnima hipotezama, povišanih hitrosti doz, izvirajočih iz odpadkov priprave pitnih voda oz. čiščenja odpadnih voda glede na ozadje, nismo pričakovali. Membranska filtracija, kot je ultrafiltracija lahko na membrani zadrži koloide najmanjše velikosti 0,01 µm oz. 10 nm. V nobenem primeru ne more iz vode odstraniti posameznih atomov radionuklidov. Možno pa bi bilo, da so atomi radionuklidov vezani v večje koloide, kot so na primer delci kamnin oz. rude. V tem primeru bi se lahko na filtracijski membrani ustavili tudi radioaktivni delci. Glede na to, da preiskovana vodarna uporablja kot vir surove vode površinsko zajetje, pa je možnost radioaktivne kontaminacije filtrov zelo majhna.

Da lahko bolje razumemo pomen rezultatov meritev moramo poznati vrednosti hitrosti doz normalnega naravnega ozadja, opozorilne ravni ter alarmnega stanja. Iz vira [53] je razvidno, da je:

- do 250 nSv/h: normalno naravno ozadje,
- od 250 do 500 nSv/h: opozorilna raven,
- več kot 500 nSv/h: alarmno stanje.

Pri vseh merilnih mestih se je pokazalo, da hitrost doze iz izbranih merjencev ni presegala praga dvakratnega ozadja. Največje odstopanje je bilo v blatu ČN Celje, kjer se je hitrost doze povečala iz 35 nSv/h na 70 nSv/h. To odstopanje ni znatno, saj so ponekod v Sloveniji hitrosti doz tudi do 170 nSv/h na travniku, kot na primer v Kočevju [53]. V Kočevju pa smo namerili hitrost doze ozadja na asfaltu 55 nSv/h. Naše nižje izmerjene hitrosti doz so posledica ščitjenja asfalta oz. utrjenih površin pred radioaktivnim sevanjem, ki izhaja iz zemljin in kamnin.

V primerih, ko je hitrost doze ob morebitnem viru bila nižja od izmerjenega ozadja, moramo upoštevati merilno negotovost merilne metode. Znotraj 1 sigma npr. ± 10 nSv/h (kolikor je merilna negotovost uporabljene metode) je verjetnost za pravilno meritev kar 68 %, kar bi pomenilo, da če bi opravili tri meritve bi bile dve znotraj tega intervala, ena bi pa bila znotraj 2 sigma intervala npr. ± 20 nSv/h.

V primeru, da bi zaznali povišane hitrosti doz, bi morali opraviti spektrometrično meritev, da bi identificirali gama sevalce. Nizke hitrosti doz niso omogočale uporabo vgrajene funkcije merilnega instrumenta za določitev vrsto sevalca. Če bi nas vseeno zanimalo, kakšen sevalec smo našli, bi bilo potrebno opraviti laboratorijsko spektrometrično analizo z HPGe detektorjem (High Purity Germanium Detector). To analizo smo opravili, kljub temu, da so bile hitrosti doz nizke, saj nas je zanimala specifična aktivnost posameznih radionuklidov v vzorcu blata.

Po identifikaciji vira bi nato morali sprejeti ustrezne ukrepe za zaščito delavcev pred sevanjem. Najbolj pogosti in ekonomsko učinkoviti ukrepi so: čim krajši čas izpostavljenemu sevanju (nezadrževanju delavcev v okolici odpadnega blata) in shramba odpadnega blata čim dlje stran od funkcionalnih objektov. V izjemnem primeru, da ta ukrepa ne bi bila mogoča, bi morali zalogovnik ali zabojnik za zbiranje odpadnega blata ustrezno zaščititi z materiali primerne debeline, kot so: svinec, beton ali jeklo.

Daljša izpostavljenost povišanim hitrostim doz (nekajkratnik sevanja ozadja) bi lahko povzročile neželene stohastične posledice na delavcih, kot so: slabo počutje, bolewnost ali celo rak in genetske spremembe. Zelo težko pa bi bilo prav tako dokazati, da je izvor teh posledic dejansko odpadno blato.

8 ZAKLJUČEK

Glavni cilj diplomske naloge je bil preveriti možnost pojavljanja naravno prisotnih radionuklidov (NORM) oz. tehnološko povišanih koncentracij naravno prisotnih radionuklidov (TENORM) pri dveh komunalnih dejavnostih v Sloveniji: priprava pitne vode in čiščenje odpadnih voda. Na podlagi pregledane strokovne literature in opravljenih *in situ* meritev hitrosti doz ugotavljamo, da ti dve industriji v Sloveniji ne povzročata odpadkov oz. ostankov s povišano vsebnostjo NORM.

Proces priprave pitne vode lahko pod določenimi okoliščinami povzroča odpadke s povišanimi koncentracijami radionuklidov. To je odvisno predvsem od geološke sestave prispevnega območja vodonosnika, vira surove vode ter od postopkov priprave pitne vode. Če analize surove vode kažejo na povišane aktivnosti naravnih ali umetnih radionuklidov, je potrebno za zadostitev pogojem mejnih dovoljenih koncentracij na nivoju oskrbovalnega sistema oz. vodarne poskrbeti za odstranjevanje radionuklidov iz vode, da se tako zagotovi pitna voda za potrošnika, ki ustreza nacionalni zakonodaji. Na voljo je cela paleta t.i. najboljših razpoložljivih tehnik, ki lahko iz surove vode odstranjujejo različna radioaktivna onesnažila, kot npr. koagulacija/filtracija, reverzna osmoza, ionska izmenjava, mehčanje z apnom ter prezračevanje. Te tehnike iz vode odstranjene radionuklide nato koncentrirajo v procesnih odpadkih. Možnosti odstranjevanja teh odpadkov so različne, pomembno pa je zavedanje, da so to TENORM odpadki, ki zahtevajo posebno obravnavo s strani delavcev na oskrbovalnem sistemu ter vseh vpletenih na področju ravnanja z odpadki.

V Sloveniji imamo relativno precej ugodno geološko sestavo prispevnih območij, prav tako pa vodarne nimajo implementiranih omenjenih postopkov, ki bi lahko akumulirali NORM. Tako je po naših raziskavah najbolj napredna tehnika priprave pitne vode ultrafiltracija, ki pa na primeru Rižanskega vodovoda Koper ni pokazala nobenih povišanj in s tem povezanih tveganj za delavce in prebivalstvo.

Proces čiščenja odpadnih voda je zasnovan tako, da se odpadne vode preko mešanega ali ločenega kanalizacijskega sistema zbirajo na ČN, kjer se najprej mehansko in nato biološko očistijo. Največji procesni odpadek je odpadno oz. odvečno aktivno biološko blato. Z dehidracijo blata nastane končni produkt čiščenja odpadnih voda, ki se mora primerno odstraniti (kompostiranje, sežig ...). Dehidrirano blato bi lahko bilo obremenjeno s TENORM ali z umetnimi radionuklidi, če bi višje koncentracije radionuklidov bile prisotne že v komunalni ali tehnološki odpadni vodi.

Na podlagi *in situ* meritev zunanjskega gama sevanja blata na ČN Brestanica, Celje, Idrija, Kočevje, Škofja Loka in Šoštanj lahko zaključimo, da so hitrosti doz nizke in v nobenem primeru niso presegle dvakratnika naravnega sevanja ozadja. Laboratorijska analiza specifične aktivnosti radionuklidov v blatu iz ČČN Ljubljana je pokazala enako, poleg tega pa še identificirala poglavitne naravne radionuklide, kot so ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra in ^{228}Th . Specifične aktivnosti so zelo nizke. Kljub temu pa je

potrebno upoštevati, da so ^{238}U , ^{226}Ra in ^{228}Th alfa sevalci, ki lahko kot svoj razpadni produkt generirajo radioaktivni žlahtni plin radon (^{222}Rn), ki se nato zadržuje v prostorih in je nevaren pri vdihavanju. Zato priporočamo, da se osebe čim manj zadržuje v zaprtih prostorih, kjer se procesira in skladišči odpadno blato, zelo zaželeno pa je tudi pogosto zračenje teh prostorov.

VIRI

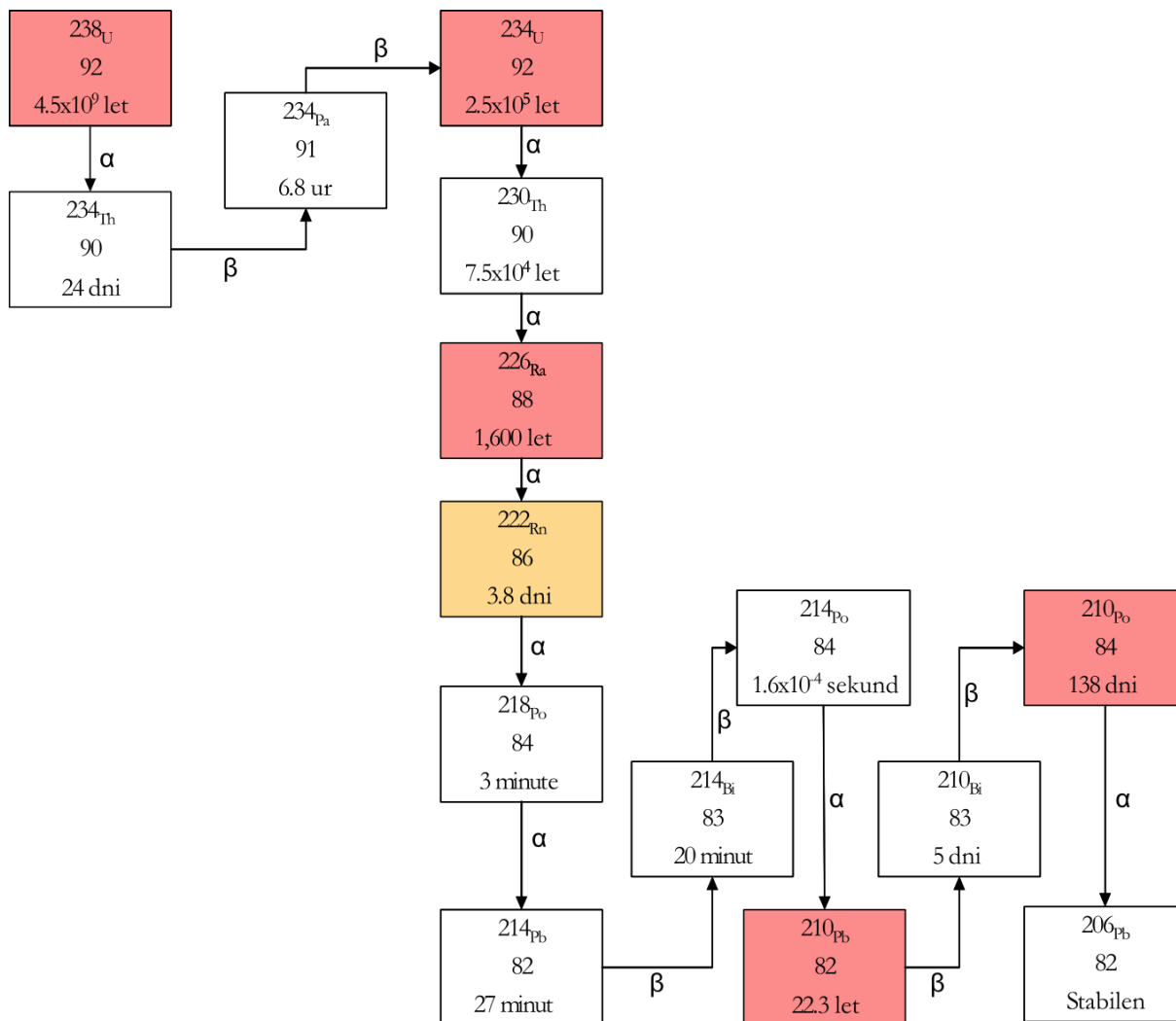
- [1] Beyermann, M., Bünger, T., Gehrcke, K., Obrikat, D. 2009. Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland. Salzgitter, Bundesamt für Strahlenschutz: 139 str.
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-20100319945> (Pridobljeno 20.02.2012.)
- [2] Program on Technology Innovation: Evaluation of Updated Research on the Health Effects and Risks Associated with Low-Dose Ionizing Radiation. 2009. Palo Alto, CA, EPRI.
http://my.epri.com/portal/server.pt?Abstract_id=00000000001019227 (Pridobljeno 22.02.2012.)
- [3] ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- [4] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [5] Andjelov, M. 1994. Rezultati radiometričnih in geokemičnih meritev za karto naravne radioaktivnosti Slovenije. Ljubljana, Geološki zavod Ljubljana: 15 str.
- [6] Poročilo o okolju v Republiki Sloveniji. 2009. Ljubljana, ARSO.
<http://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/poro%C4%8Dila/poro%C4%8Dila%20o%20stanju%20okolja%20v%20Sloveniji/> (Pridobljeno 10.03.2012.)
- [7] Poročilo o stanju okolja. 2002. Ljubljana, ARSO.
<http://eionet-si.arso.gov.si/publikacije> (Pridobljeno 24.03.2012.)
- [8] Kakovost površinskih virov pitne vode v Sloveniji. 2008. Ljubljana, ARSO.
http://www.arso.gov.si/vode/reke/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/PVOPV_publicacija-01.pdf (Pridobljeno 10.04.2012.)
- [9] Repinc, U. 2004. Identifikacija TENORM v Sloveniji kot posledica preteklih dejavnosti in njihova inventarizacija. Ljubljana, Institut Jožef Stefan: 78 str.
- [10] Assessment of Radioactivity in Sewage Sludge: Radiological Survey Results and Analysis. 2003. ISCORS.
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1775/> (Pridobljeno 17.02.2012.)
- [11] Technical reports series No. 419. Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation. 2003. Vienna, IAEA.
<http://www-ns.iaea.org/publications/norm-publications.asp> (Pridobljeno 23.02.2012.)
- [12] UNSCEAR 2010 Report: Summary of low-dose radiation effects on health. (A/65/46).
<http://www.unscear.org/unscear/en/publications.html> (Pridobljeno 02.04.2012.)
- [13] UNSCEAR 2008 Report: Sources and effects of ionizing radiation. Volume I: Report to the General Assembly. (A/63/46).
<http://www.unscear.org/unscear/en/publications.html> (Pridobljeno 02.04.2012.)
- [14] UNSCEAR 2008 Report: Sources and effects of ionizing radiation. Volume I. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. (A/63/46).
<http://www.unscear.org/unscear/en/publications.html> (Pridobljeno 02.04.2012.)
- [15] Direktiva Sveta 96/29/EURATOM. 1996. Uradni list Evropske unije.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31996L0029:SL:NOT> (Pridobljeno 12.05.2012.)
- [16] Direktiva Sveta 98/83/ES. 1998. Uradni list Evropske unije.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31998L0083:SL:NOT> (Pridobljeno 02.05.2012.)
- [17] Pravilnik o pitni vodi. Ur.l. RS št. 19/2004, 35/2004, 26/2006, 92/2006, 25/2009.
<http://pisrs.si/Predpis.aspx?id=PRAV3713&pogled=osnovni> (Pridobljeno 24.04.2012.)
- [18] Verordnung des EDI vom 26. Juni 1995 über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (Fremd- und Inhaltsstoffverordnung, FIV).
http://www.admin.ch/ch/d/sr/c817_021_23.html (Pridobljeno 24.04.2012.)
- [19] Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV). Ur.l. RS št. 67/02, 24/03, 46/04, 60/2011.

- http://www.ursjv.gov.si/si/zakonodaja_in_dokumenti/veljavni_predpisi/ (Pridobljeno 24.04.2012.)
- [20] Verordnung des Bundesministers für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. (Trinkwasserverordnung - TWV). 2001.
<http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20001483> (Pridobljeno 30.04.2012.)
- [21] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV. 2001.
http://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2001/index.html (Pridobljeno 30.04.2012.)
- [22] Uredba o sevalnih dejavnostih. Ur.l. RS št. 48/04, 9/06.
http://www.ursjv.gov.si/si/zakonodaja_in_dokumenti/veljavni_predpisi/ (Pridobljeno 24.04.2012.)
- [23] Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih. Ur.l. RS št. 49/04.
http://www.ursjv.gov.si/si/zakonodaja_in_dokumenti/veljavni_predpisi/ (Pridobljeno 24.04.2012.)
- [24] Guidelines for drinking-water quality: incorporating 1st and 2nd addenda, Vol.1, Recommendations. – 3rd ed. 2008. WHO.
http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/gdwq3rev/en/index.html (Pridobljeno 24.04.2012.)
- [25] Guidelines for drinking-water quality - 4th ed. 2011. WHO.
http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/dwq_guidelines/en/index.html (Pridobljeno 28.04.2012.)
- [26] Uranium Isotopes. 2012.
<http://www.globalsecurity.org/wmd/intro/u-isotopes.htm> (Pridobljeno 06.05.2012.)
- [27] Chemical Element. 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_elements (Pridobljeno 07.05.2012.)
- [28] Nuclide. 2012.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclide> (Pridobljeno 07.05.2012.)
- [29] Gamma rays. 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_rays (Pridobljeno 08.05.2012.)
- [30] Ionizing radiation. 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing_radiation (Pridobljeno 08.05.2012.)
- [31] Deterministic effects and stochastic effects. 2012.
http://www.hko.gov.hk/education/dbcp/rad_health/eng/r4_1.htm (Pridobljeno 12.05.2012.)
- [32] About the IAEA. 2012.
<http://www.iaea.org/About/mission.html> (Pridobljeno 17.05.2012.)
- [33] About us. 2012.
http://www.ans.org/ans/en/about_us.html (Pridobljeno 17.05.2012.)
- [34] About ICRP. 2012.
<http://www.icrp.org/> (Pridobljeno 17.05.2012.)
- [35] Evolution of ICRP Recommendations 1977, 1990 and 2007. 2011. Nuclear Energy Agency. OECD.
<http://www.oecd-nea.org/rp/reports/2011/nea6920-ICRP-recommendations.pdf> (Pridobljeno 26.05.2012.)
- [36] About EPRI. 2012.
<http://my.epri.com/portal/server.pt> (Pridobljeno 17.05.2012.)
- [37] World Uranium Mining. 2012.
<http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html> (Pridobljeno 20.05.2012.)
- [38] About COVRA. 2012.
<http://www.covra.nl/about-covra> (Pridobljeno 24.05.2012.)
- [39] Coal statistics. 2012.
<http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics/> (Pridobljeno 24.05.2012.)
- [40] Galerija. 2012.
http://www.komunalaidrija.si/10_galerija/index.php?cat_id=9 (Pridobljeno 02.07.2012.)

- [41]Zemljevid. 2012.
<http://zemljevid.najdi.si/> (Pridobljeno 02.07.2012.)
- [42]Čistilne naprave. 2012.
http://okolje.arso.gov.si/onesnazevanje_voda/tabela/4/page/8 (Pridobljeno 05.07.2012.)
- [43]Fotogalerija: Nova vodarna – ultrafiltracija. 2012.
http://www.rvk-jp.si/fotogalerija_nova_vodarna_ultrafiltracija (Pridobljeno 06.07.2012.)
- [44]Centralna čistilna naprava Škofja Loka. 2012.
<http://www.loska-komunala.si/centralna-cistilna-naprava-skofja-loka.html> (Pridobljeno 07.07.2012.)
- [45]Odvajanje odpadnih voda. 2012.
http://www.kostak.si/dejavn_odplake_cn_brestanica.htm (Pridobljeno 07.08.2012.)
- [46]Centralna Čistilna Naprava Šaleške Doline. 2012.
http://www.kp-velenje.si/index.php?option=com_content&view=article&id=126&Itemid=201
(Pridobljeno 07.08.2012.)
- [47]Čistilna naprava. 2012.
<http://www.komunala-kocevje.si/cistilna-naprava> (Pridobljeno 07.08.2012.)
- [48]Fotogalerija. 2012.
<http://sfs-celje.si/sl/vsebina/36> (Pridobljeno 14.08.2012.)
- [49]Ultrafiltracija. 2012.
<http://www.rvk-jp.si/ultrafiltracija> (Pridobljeno 14.08.2012.)
- [50]Zakon o varstvu okolja (ZVO-1) Ur.l. RS št. 41/2004 in spremembe.
<http://pisrs.si/Predpis.aspx?id=ZAKO1545&pogled=osnovni> (Pridobljeno 17.08.2012.)
- [51]UNSCEAR 1998 Report: Exposures from natural radiation sources. Report to the General Assembly. Restricted 47th session of UNSCEAR.
- [52]Čistilna naprava Celje. 2012.
http://www.vo-ka-celje.si/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=134
(Pridobljeno 20.08.2012.)
- [53]Trenutne vrednosti radioaktivnost okolja po Sloveniji. 2012.
<http://www.radioaktivnost.si/#trenutne> (Pridobljeno 22.08.2012.)
- [54]HDR Engineering Inc. 2001. Handbook of Public Water Systems, 2nd Edition. New York, John Wiley & Sons, Inc.: 1153 str.
- [55]Assessment of Radioactivity in Sewage Sludge: Recommendations on Management of Radioactive Materials in Sewage Sludge and Ash at Publicly Owned Treatment Works. 2005. ISCORs.
<http://www.epa.gov/nscep/index.html> (Pridobljeno 19.08.2012.)
- [56]A Regulator's Guide to the Management of Radioactive Residuals from Drinking Water Treatment Technologies. 2005. EPA.
<http://www.epa.gov/radiation/tenorm/drinking-water.html> (Pridobljeno 25.08.2012.)
- [57]Opis čistilne naprave. 2012.
<http://www.jhl.si/vo-ka/predstavitev/centralna-cistilna-naprava-lj> (Pridobljeno 30.08.2012.)
- [58]Tehnološki podatki. 2012.
<http://www.jh-lj.si/vo-ka/predstavitev/centralna-cistilna-naprava-lj/tehnoloski-podatki>
(Pridobljeno 30.08.2012.)
- [59]Exponential decay. 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Decay_constant (Pridobljeno 07.05.2012.)
- [60]Alpha decay. 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_decay (Pridobljeno 08.05.2012.)
- [61]Beta decay. 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay (Pridobljeno 08.05.2012.)
- [62]Uranium. 2012.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Uranium> (Pridobljeno 08.05.2012.)
- [63]Hydrogen. 2012.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen> (Pridobljeno 08.05.2012.)
- [64]How radiation affects cells. 2012.
http://www.rerf.jp/radefx/basickno_e/radcell.htm (Pridobljeno 12.05.2012.)

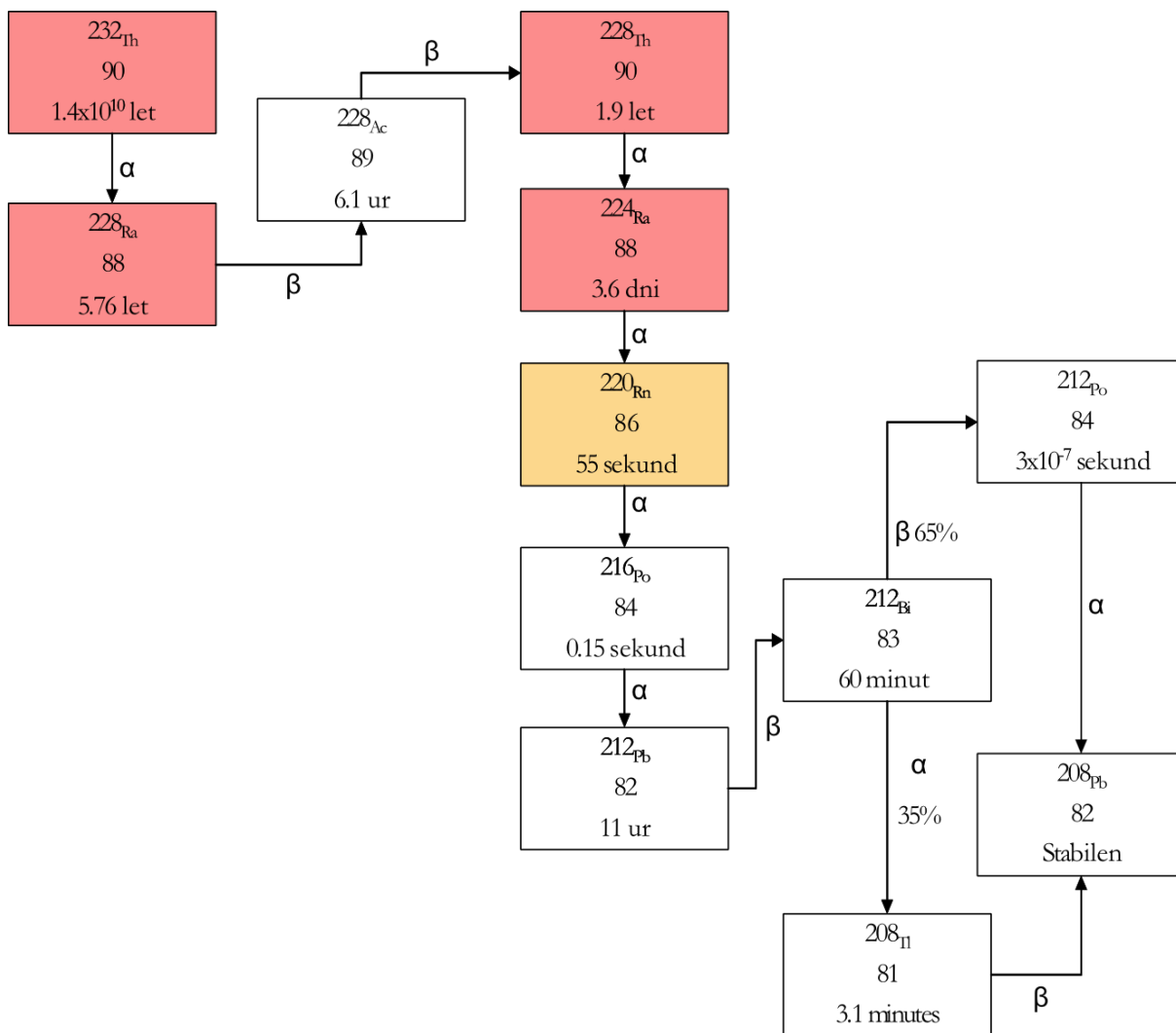
- [65] Radiation Biological Effects. 2012.
http://www.jlab.org/div_dept/train/rad_guide/effects.html (Pridobljeno 12.05.2012.)
- [66] ANNANMÄKI, M., TURTIAINEN, T., SALONEN, L., et al. Treatment Techniques for Removing Natural Radionuclides from Drinking Water. STUK-A169. 2000. Helsinki, 101 str.
<http://www.stuk.fi/julkaisut/stuk-a/stuk-a169.html> (Pridobljeno 16.08.2012.)
- [67] Uredba o uporabi blata iz komunalnih čistilnih naprav v kmetijstvu. Ur.l. RS št. 62/2008.
<http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200862&stevilka=2630> (Pridobljeno 03.08.2012.)
- [68] Rudnik Žirovski vrh. 2010.
<http://www.rudnik-zv.si/> (Pridobljeno 06.07.2012.)
- [69] User's Manual identiFINDER. 2005. Target Systemelectronic GmbH.
- [70] Vodovodno omrežje in objekti. 2012.
http://www.rvk-jp.si/vodozbirno_omrezje_in_objekti (Pridobljeno 06.07.2012.)
- [71] Radioaktivnost v okolju. Podatkovna baza URSJV. 2012.
<http://www.radioaktivnost.si/roko/roko.php> (Pridobljeno 04.05.2012.)

Priloga A1: Razpadna veriga U-238



Opomba: Z rdečo oz. rumeno so označeni pomembni radionuklidi

Priloga A2: Razpadna veriga Th-232



Opomba: Z rdečo oz. rumeno so označeni pomembni radionuklidi



ZVD ZAVOD ZA VARSTVO PRI DELU d.d.
Institute of Occupational Safety

Center za fizikalne meritve

Št. poročila: LMSAR-71/2012-PJ

Laboratorij za merjenje specifičnih aktivnosti radionuklidov

Datum: 6.7.2012

Poročilo o meritvah radioaktivnosti

Naročnik:


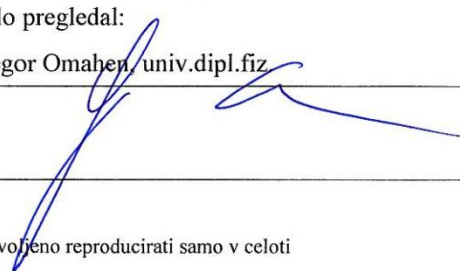
Številka in datum naročila:

/

Poslano:

1 x naročnik

1 x arhiv ZVD

Meritve izvedel: Peter Jovaňovič, inž.fiz.	Poročilo pregledal: dr. Gregor Omahen, univ.dipl.fiz.
	

Dokument 2 strani in ga je dovoljeno reproducirati samo v celoti

Rezultati meritev

V analizo na radioaktivnost smo prejeli posušeni vzorec odpadnega materiala iz čistilne naprave VOKA Zalog. Vzorec smo pripravili v skladu z odobrenimi delovnimi postopki za vzorčenje, pripravo vzorcev in izvajanje meritev specifičnih aktivnosti gama sevalcev v vzorcih iz življenjskega okolja, DP-LMSAR-01, DP-LMSAR-02, DP-LMSAR-03 in DP-LMSAR-07. Za določanje specifičnih aktivnosti radionuklidov v vzorcu smo uporabili metodo visokoločljive spektrometrije gama, DP-LMSAR-09. V tabeli 1 so predstavljeni rezultati meritev specifičnih aktivnosti radionuklidov v merjenem vzorcu.

Tabela 1. Specifične aktivnosti naravnih radionuklidov v vzorcu

Datum vzorčenja:	4.7.2012
Datum meritve:	5.7.2012
Oznaka vzorca:	RV2090712
Radionuklid	Bq/kg
${}^7\text{Be}$	423.7 ± 15.7
${}^{40}\text{K}$	106.2 ± 11.4
${}^{210}\text{Pb}$	226.4 ± 20.3
${}^{232}\text{Th}$ (${}^{228}\text{Ra}$)	8.9 ± 1.4
${}^{232}\text{Th}$ (${}^{228}\text{Th}$)	6.8 ± 1.4
${}^{238}\text{U}$	45.5 ± 11.3
${}^{226}\text{Ra}$	8.1 ± 0.8
${}^{131}\text{I}$	506.3 ± 13.6
${}^{137}\text{Cs}$	9.4 ± 0.7

- specifične aktivnosti so preračunane na datum vzorčenja
- število podano z znakom \pm je skupna standardna negotovost in se nanaša na interval zaupanja z 68 % zanesljivostjo
- število podano z znakom $<$ je spodnja meja aktivnosti, ki jo lahko določimo za dani izotop in se nanaša na interval zaupanja z 68 % zanesljivostjo
- aktivnosti navedene v poročilu se nanašajo le na izmerjeni vzorec in ne na celotni vzorčevani material

Priloga C1: Dopis, ki smo ga poslali pristojnim komunalnim podjetjem po Sloveniji

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



KOSTAK – komunalno stavbno podjetje d.d.
Vodja vodarne
Vodja čistilne naprave
Leskovška cesta 2 a
8270 Krško

Spoštovani!

Na vas se obračamo s prošnjo za pomoč pri izdelavi diplomske naloge s področja Vodarstva in komunalnega inženirstva na FGG Univerze v Ljubljani. Naloga obravnava nizko intenzivna ionizirna sevanja odpadkov, ki nastajajo v določenih proizvodnih in storitvenih dejavnostih, povzročajo pa jo ev. Prisotnost naravnih radionuklidov. Kompleksno izmero teh sevanj v proizvodnih dejavnostih je pred leti izdelal Institut Jožef Stefan, komunalni sektor pa ni bil vključen zaradi predpostavke, da tam teh sevanj ni prisotnih. To hipotezo bi radi sedaj v okviru predlagane diplomske naloge preverili na nekaterih izbranih vodarnah in čistilnih napravah, kjer zaradi specifične naravne mineralne sestave podlage lahko prihaja do večjega sevanja od povprečnega slovenskega ozadja.

Vljudno vas zaprošamo za dovoljenje, da opravimo izmero intenzivnosti naravnega ionizirnega sevanja odpadkov, ki nastajajo pri vašem procesu priprave pitnih vod oz. čiščenju odpadnih vod. Meritve bi izvedli na mestu nastanka odpadka, t. j. v vodarni oz. čistilni napravi, s prenosnim detektorjem. Meritve so praktično trenutne in ne bodo motile vašega delovnega procesa. Želeli bi jih opraviti še pred poletjem, predvidoma v začetku junija. Rezultate bomo primerjali z dostopnimi podatki iz tuje literature in vas o njih obvestili še pred izdelavo diplomske naloge. Povišanih vrednosti ne pričakujemo, želimo to le dokazati z meritvami.

Prosimo, če nam v odgovoru navedete kontaktno osebo in št. telefona, da se bomo lahko dogovorili za obisk.

Za vaše sodelovanje, ki bo obogatilo izobraževalni program naše fakultete in njegovo povezavo s prakso, se vam vnaprej iskreno zahvaljujemo in lepo pozdravljamo.

Prof.dr.Viktor Grilc

Rok Ogrizek Woermann, diplomant

Naslov: prof.dr.Viktor Grilc, FGG-VKI, Jamova 2, 1000 Ljubljana oz. viktor.grilc@guest.arnes.si

Priloga D1: Certifikat o kalibraciji za uporabljen merilni instrument FieldSPEC identiFINDER

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

1001 Ljubljana, Jamova cesta 39 / p.p.3000 / Tel.:01 4773 900 / Telefax: 01 477 3151, 251 93 85
Laboratorij za dozimetrične standarde



CERTIFIKAT O KALIBRACIJI

CALIBRATION CERTIFICATE



**SLOVENSKA
AKREDITACIJA**
SIST EN ISO/IEC 17025
LK-017

Rezultati označeni z # se nanašajo
na neakreditirano delavnost

Številka <i>Number</i>	CK 21-3/12	Stran <i>Page</i>	1	od <i>of</i>	2
Naročnik <i>Applicant</i>	Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za jedrsko varnost, Železna 16, SI-1000 Ljubljana, Slovenija				
Lastnik <i>Owner</i>	Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za jedrsko varnost, Železna 16, SI-1000 Ljubljana, Slovenija				

Merilo <i>Instrument</i>	Ime <i>Name</i>	Merilnik hitrosti doze
	Proizvajalec <i>Manufacturer</i>	Target
	Tip <i>Type</i>	fieldSPEC-N
	Oznaka <i>Code</i>	1088

Datum prejema
Date of receipt 5. 3. 2012

Stanje merila
Instrument condition Brez posebnosti

Datum kalibracije
Date of calibration 26. 3. 2012

Pogoji okolja
Environmental conditions T = (22 ± 2) °C, rel. vl. = (34 ± 5) %

Kalibracijski postopek
Calibration procedure Kalibracija je izvedena s primerjanjem kazanja merila s privzeto pravo vrednostjo hitrosti okoljske ekvivalentne doze $\dot{H}^*(10)$ po postopku DS-DN-05. Podrobnosti postopka so dostopne na zahtevo.
Poročilo navaja tudi rezultate meritev, ki so izven obsega akreditacije pod št. LK-017. Ti rezultati so označeni z #.

Odobril / Authorized by

M. Mihelič

mag. M. Mihelič,
vodja laboratorija / head of laboratory

Datum / Date

26. 3. 2012

Rezultati
Results

vir	$\dot{H}^*(10)$ [$\mu\text{Sv/h}$]	M [$\mu\text{Sv/h}$]	M / $\dot{H}^*(10)$	U [%]
^{137}Cs @	0,18 #	0,19	1,05 #	14
	0,68	0,73	1,08	6,8
	1,82	1,96	1,08	5,1
	8,92	9,66	1,08	4,5
	51,6	54,9	1,06	4,3
	323	304	0,94	4,4

Razlaga simbolov
Explanation of symbols

$\dot{H}^*(10)$ privzeta prava vrednost hitrosti okoljske ekvivalentne doze $\dot{H}^*(10)$
M kazanje merila z odštetim ozadjem
U razširjena merilna negotovost razmerja M / $\dot{H}^*(10)$
@ navedene $\dot{H}^*(10)$ so realizirane z virom ^{137}Cs atenuiranim s svinčenimi zaslonkami.
merski rezultati, označeni z # so izven obsega akreditacije

Referenčna točka merila
Reference point of instrument

Referenčna točka merila je središče krožne površine detektorja na sprednji strani merila.
Pri kalibraciji je bila referenčna točka merila postavljena v centralni žarek sevanja, ki je pravokotno vstopalo v sprednjo stran merila.

Kalibrirana veličina
Calibration quantity

Hitrost okoljske ekvivalentne doze $\dot{H}^*(10)$.

Merilna negotovost
Measurement uncertainty

Razširjena merilna negotovost, ki je podana pri merilnih rezultatih, je podana kot standardna negotovost rezultata meritve, pomnožena s faktorjem pokritja $k = 2$, ki v primeru normalne porazdelitve ustreza ravni zaupanja približno 95 %. Standardna merilna negotovost je bila določena skladno s publikacijo EA-4/02.

Sledljivost
Traceability

Referenčni etalon je realiziran s kolimiranim virom ^{137}Cs in setom svinčenih zaslonk ter sekundarno etalonsko ionizacijsko celico LS-01 št.124. Pri meritvah so bili uporabljeni referenčni etaloni, ki so sledljivi do ustreznih mednarodnih in nacionalnih etalonov, s katerimi je realizirana enota fizikalne veličine v skladu z merskim sistemom SI.

Opombe
Remarks

Merilni rezultati in pripadajoča merilna negotovost izkazujejo stanje merila v času kalibracije pod navedenimi pogoji in ne vsebujejo napovedi o njegovi časovni stabilnosti.
Če želite dodatna pojasnila, nas prosimo pokličite.

