



## **VSEBNOST NARAVNIH IN UMETNIH RADIONUKLIDOV V SLOVENSKEM MORJU**

### **Poročilo o izvedbi projekta**



**Ljubljana, november 2007**





Naslov projekta: Vsebnost naravnih in umetnih radionuklidov v Slovenskem morju

Naročnik: Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost  
Železna 16  
1000 Ljubljana

Izvajalec: Institut Jožef Stefan  
Jamova 39  
1000 Ljubljana

Pogodba št.: 2513-07-397006

Nosilca projekta: doc. dr. Borut Smodiš, dr. Matjaž Korun

Avtorja poročila: doc. dr. Borut Smodiš *B. Smodiš*  
Marko Štok, univ. dipl inž. kem. tehnol. *Marko Štok*

Izvajalci meritev: Marko Štok, univ. dipl inž. kem. tehnol., David Kocman, univ. dipl. geol.,  
Janja Smrke, dr. Matjaž Korun, sodelavci Laboratorija za radiološke  
merilne sisteme in meritve radioaktivnosti na Odseku F-2

Številka delovnega poročila: IJS-DP-9737

Revizija: 1

Kopije: Naročnik (5 x)  
IJS knjižnica (1 x)  
QA arhiv odseka (1 x + original)  
Nosilec naloge (1 x)  
Izvajalci (3 x)

Komisija za pregled: Predsednik: prof. dr. Milena Horvat *Milena Horvat*  
Član: dr. Zvonka Jeran *Z. Jeran*

Vodja organizacijske enote: prof. dr. Milena Horvat





Naslov poročila:

## **VSEBNOST NARAVNIH IN UMETNIH RADIONUKLIDOV V SLOVENSKEM MORJU**

Avtorja:

doc. dr. Borut Smodiš, Marko Štrok, univ. dipl. inž. kem. tehnol.

Ključne besede:

Naravni radionuklidi, umetni radionuklidi, Slovensko morje, visokoločljivostna spektrometrija gama, Cs-137, Po-210, ocena ingestijske doze

Povzetek:

Izvedeno je bilo vzorčevanje morske vode, sedimentov, rib in školjk v Slovenskem morju. V omenjenih vzorcih je bila določena vsebnost Cs-137 v morski vodi, visokoločljivostna spektrometrija gama v sedimentih, ribah in školjkah ter meritve Po-210 v ribah in školjkah. Izmerjena aktivnost Cs-137 je znašala od 3,3 do 3,6 Bq/m<sup>3</sup>. Aktivnost Po-210 v ribah je znašala od 3,7 do 28,3 Bq/kg sveže in v školjkah od 53,4 do 124,8 Bq/kg sveže. Meritve z visokoločljivostno spektrometrijo gama so pokazale, da je vsebnost merjenih radionuklidov v vzorcih nizka. Ocenjena letna efektivna ingestijska doza znaša za ribe 114 μSv/leto ter za školjke 72 μSv/leto.

Report title:

## **CONTENT OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE SLOVENIAN SEA**

Authors:

doc. dr. Borut Smodiš, Marko Štrok, univ. dipl. inž. kem. tehnol.

Keywords:

Natural radionuclides, artificial radionuclides, Slovenian sea, high-resolution gamma spectrometry, Cs-137, Po-210, assessment of ingestion dose

Abstract:

Radiological survey of seawater, sediments, fish and mussels in Slovenian sea was performed. In the collected samples, content of Cs-137 in seawater, gamma emitters, using high-resolution gamma spectrometry, in sediments, fishes and mussels, as well as Po-210 in fishes and mussels, were determined. Specific activities of Cs-137 in seawater varied from 3,3 to 3,6 Bq/m<sup>3</sup>. Specific activities of Po-210 in fishes were from 3,7 to 28,3 Bq/kg fresh weight and in mussels from 53,4 to 124,8 Bq/kg fresh weight. High-resolution gamma spectrometry measurements revealed that the content of gamma emitters in samples was low. Assessed yearly effective ingestion dose is 114 μSv/year for fishes and 72 μSv/year for mussels.





## KAZALO

1	Uvod .....	2
2	Metode dela .....	2
2.1	Oprema in materiali .....	2
2.2	Reagenti .....	3
2.3	Vzorčevanje .....	3
2.4	Priprava vzorcev .....	4
2.5	Radiokemična separacija Cs-137 iz vzorcev morske vode .....	4
2.6	Radiokemična separacija Po-210 iz vzorcev rib in školjk .....	5
2.7	Meritve .....	5
3	Rezultati in diskusija .....	6
4	Ocena letne efektivne ingestijske doze za Po-210 v ribah in školjkah .....	12
5	Priporočila za nadaljnje raziskave .....	12
6	Literatura .....	13



## 1 Uvod

Naravni in umetni radionuklidi vstopajo v morsko okolje v glavnem z globalnim usedom aerosolov in plinov ter iz kopnega preko rek, ki se stekajo v morje. Vir umetnih radionuklidov so pretekle in sedanje jedrske aktivnosti po svetu, vir naravnih pa kozmično sevanje in radionuklidi, ki so prisotni v zemeljski skorji. Ko radionuklidi vstopijo v morsko okolje so podvrženi mnogim biogeokemijskim reakcijam (raztapljanje, hidroliza, kompleksacija, sorpcija/desorpcija, koprecipitacija, speciacija). Katera od teh reakcij bo prevladujoča je odvisno od vrste radionuklida in od morskega okolja, v katero vstopa radionuklid. (*Stricht in Kirchmann, 2001*)

Za transport radionuklidov je najbolj pomembna porazdelitev posameznega radionuklida med trdno in tekočo fazo. Radionuklide, ki pretežno ostanejo v tekoči fazi imenujemo konzervativni radionuklidi. Razen H-3, ki je popolnoma konzervativen radionuklid, uvrščamo mednje še Sr-90, Tc-99, Sb-125, Cs-134, Cs-137, Ra-226 in U-238. Njihov transport lahko opišemo z advekcijo, kar pomeni transport radionuklidov z vodno maso (npr. valovanje, morski tokovi) in disperzijo, ki se nanaša na mešanje in širjenje radionuklidov znotraj vodnega stolpca. Ker se konzervativni radionuklidi zelo počasi transportirajo v globino, ostanejo v vodnem stolpcu tudi več let. (*Stricht in Kirchmann, 2001*)

V nasprotju s konzervativnimi radionuklidi pa se radionuklidi kot so Pb-210, Po-210, Th-232, Pu-239, Am-241 in Cm-244 v morskem okolju nahajajo v suspendiranih delcih. Za njihov transport je poleg advekcije in disperzije pomembno še usedanje trdnih delcev oziroma sedimentacija. Tako radionuklidi, ki so vezani na večje delce zelo hitro potonejo in preidejo v sediment, medtem ko na transport radionuklidov vezanih na koloide in zelo fine delce vplivajo še advekcija in disperzija in so lahko dlje časa prisotni v vodnem stolpcu. (*Stricht in Kirchmann, 2001*)

Radionuklidi prisotni v morskem okolju lahko prehajajo preko planktona v višje organizme. Pri tem se njihova koncentracija po trofični verigi zvišuje in je najvišja pri predatorskih organizmih in školjkah, ki so filtratorji. (*Stricht in Kirchmann, 2001*)

V okviru projekta sta bili izvedeni dve fazi vzorčevanja v katerih smo odvzeli morsko vodo, sediment, ribe in školjke z namenom določitve vsebnosti naravnih in umetnih radionuklidov. Izvedene so bile meritve Cs-137 v morski vodi, visokoločljivostna spektrometrija gama v sedimentih, ribah in školjkah ter meritve Po-210 v ribah in školjkah.

## 2 Metode dela

Vse metode dela, vključno z vzorčevanjem, pripravo vzorcev in meritvami so skladne z metodologijo projekta IAEA RER/7/003 »Marine Environmental Assessment of the Mediterranean Region«.

### 2.1 Oprema in materiali

- Spektrometra alfa Tennelec TC 256 povezana s programsko opremo Maestro proizvajalca Ortec
- Spektrometer gama z HPGe detektorjem z relativnim izkoristkom 26,5% in ločljivostjo 1,75 keV pri 1332,5 keV, povezan s 16.000 kanalnim analizatorskim sistemom in





- programsko opremo Maestro proizvajalca Ortec
- Sušilnik ST-06 Instrumentaria Zagreb
  - Multipraktik Kenwood CH700
  - Kuhinjska tehtnica Soehnle, merilni obseg od 2 g do 10000 g, najmanjši razdelek  $d=2$  g
  - Analitska tehtnica Mettler – Toledo AE163 DR; merilni obseg od 0,01 g do 162/31 g, najmanjši razdelek  $d = 0,1/0,01$  mg, preskusni razdelek  $e = 1$  mg, točnostni razred I
  - Gelno-mešalne plošče ROTAMIX 550 MMH, Tehtnica
  - Posode za vzorčevanje vode, 30 L
  - Posodi za obdelavo vzorcev vode, 100 L
  - Bakrene ploščice za spontano depozicijo Po-210
  - Mešalo iz nerjavečega jekla
  - Običajen laboratorijski pribor in steklovina

## 2.2 Reagenti

- HCl, 37 %, p.a., Carlo Erba Reagents
- HNO<sub>3</sub>, 65 %, p.a., Carlo Erba Reagents
- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 30 %, p.a., Alkaloid Skopje
- Po-209 standardna referenčna raztopina, National Institute of Standards & Technology
- Cs-137 standardna raztopina
- Cs-134 raztopina
- Cs nosilec, 25 mg/mL CsCl
- AMP, amonijev fosfomolibdat, p.a., Carlo Erba Reagents

## 2.3 Vzorčevanje

Vzorčevanje je potekalo v dveh fazah. Prva faza vzorčevanja je potekala v maju 2007, druga pa v oktobru 2007. Obe fazi vzorčevanja smo opravili v sodelovanju s firmo FONDA.SI, ki ima ustrezne naprave in usposobljeno osebje. Morska Biološka Postaja (MBP) Piran, s katero smo nameravali prvotno sodelovati pri vzorčevanju, je imela namreč že zasedene vse kapacitete in ni mogla ponuditi prilagodljivosti glede kraja in časa odvzema posameznih vzorcev.

Prva faza vzorčevanja je potekala 31.5.2007. Odvzeli smo dva vzorca po 90 L morske vode iz globine 0,5 do 1 m, enega na lokaciji 000K (sredina Koprškega zaliva), drugega pa na lokaciji 000MA (sredina Piranskega zaliva). Ti lokaciji uporablja Morska Biološka Postaja (MBP) Piran pri monitoringu kakovosti morja in kontroli onesnaženja s kopnega v skladu z Barcelonsko konvencijo. Koordinate omenjenih lokacij so podane v tabeli 1.

Tabela 1 Koordinate lokacij vzorčevanja

Lokacija	Koordinate	
000K	45° 33' 36" N	13° 43' 12" E
000MA	45° 30' 12" N	13° 34' 12" E
000F	45° 32' 18" N	13° 33' 00" E

Odvzeli smo tudi dva vzorca sedimenta. Prvi vzorec je bil odvzet na iztoku Izolske kanalizacije,



na katero je priključena tudi Izolska bolnišnica in se nahaja v bližini tovarne Delamaris in ladjedelnice v Izoli. Drugi vzorec je bil odvzet na odprtem morju v točki 000F, kjer tudi vzorčuje MBP in leži v bližini Piranske punte. Vzorca sedimenta je odvzel potapljač in sicer frakcijo 0-2 cm, površina odvzetja je bila 0,2 m<sup>2</sup>.

Dva vzorca rib so prejšnji dan ulovili Piranski ribiči in smo ju samo prevzeli. Odvzeti so bili ciplji (*Mugil cephalus*), ki sodijo med bentične ribe in sardele (*Sardina pilchardus*), ki sodijo med pelagične ribe. Vsak vzorec je tehtal približno 5 kg.

Potapljač je odvzel tudi dva vzorca školjk iz Piranskega zaliva v bližini Sečoveljskih solin. Odvzeto je bilo 6 kg klapavic (*Mytillus galloprovincialis*) in 3 kg ostrig (*Ostrea edulis*).

Druga faza vzorčevanja je potekala 12.10.2007. Odvzeli smo dva vzorca po 90 L morske vode na enak način in na istih lokacijah kot v prvi fazi vzorčevanja. Zaradi burje smo imeli težave z izlovom rib ter školjk. Tako smo sardele, klapavice in ostrige uspeli odvzeti 16.10.2007, ciplje pa šele 8.11.2007.

## 2.4 Priprava vzorcev

Priprava vzorcev

Vzorci morske vode smo še isti dan prefiltrirali skozi 0,45 µm filtrni papir in nakisali z dodatkom 250 mL koncentrirane HCl. Zaradi dolgotrajnosti postopka filtracije skozi filtrne nuče smo si za filtriranje vzorcev morske vode iz druge faze vzorčevanja priskrbeli sistem za filtriranje skozi filtrne kartuše s črpalko in priključki ter tako avtomatizirali filtriranje. Tako sta bila vzorca morske vode iz druge faze vzorčevanja prefiltrirana skozi zaporedno vezana filtra. Velikost por prvega filtra je bila 1 µm, drugega pa 0,5 µm.

Vzorca sedimenta smo stehali, posušili v sušilniku pri 80 °C, ponovno stehali in presejali skozi sito z velikostjo zanke 2 mm.

Vzorci rib smo stehali in izmerili njihovo dolžino. Zatem smo jih očistili, odstranili luske in drobovino, ponovno stehali ter narezali in posušili v sušilniku pri 80 °C. Po sušenju smo jih stehali in zmleli v multipraktiku. Vzorce smo razdelili na dva dela, od katerih smo enega uporabili za meritev visokoločljivostne spektrometrije gama (VLG), drugega pa za radiokemično določitev vsebnosti Po-210 s spektrometrijo alfa.

Vzorci školjk smo očistili in izmerili ter stehali. Nato smo odstranili meso iz lupin in ga stehali ter nato posušili v sušilniku pri 80 °C in zmleli v multipraktiku. Vzorce smo razdelili na dva dela, od katerih smo enega uporabili za VLG, drugega pa za radiokemično določitev in vsebnosti Po-210 s spektrometrijo alfa.

## 2.5 Radiokemična separacija Cs-137 iz vzorcev morske vode

Odmerili smo 80 L predhodno prefiltrirane in nakisane morske vode. Nato smo dodali 10 mL Cs nosilca s koncentracijo 25 mg/mL CsCl in 0,3 mL Cs-134 sledilca s koncentracijo 16 Bq/mL. Vzorcju smo nato dodali 15 g AMP, ki smo ga predhodno dispergirali v 50 mL s HCl nakisani





vodi. AMP veže nase Cs in ga na ta način skoncentrira in izolira iz vode. Vzorec smo mešali 3 ure z mešalom iz nerjavečega jekla. Po mešanju smo počakali čez noč, da se je AMP vsedel na dno in drugi dan s pomočjo vodne črpalke odčrpali vodo ter prenesli AMP v 2 L čašo. Ko se je AMP ponovno vsedel smo ponovno odčrpali vodo in prenesli AMP v 250 mL čašo ter previdno odparili preostalo vodo pri 80 °C na grelni plošči in pri isti temperaturi posušili AMP v sušilniku. Nato smo AMP prenesli v merilno posodico ter ga pomerili na spektrometru gama.

## 2.6 Radiokemična separacija Po-210 iz vzorcev rib in školjk

Zatehtali smo znano maso predhodno posušenih in zmletih rib ter školjk v čašo. Zatehtana masa je bila odvisna od vsebnosti Po-210 v posamezni vrsti in je znašala od 1 g za školjke pa do 10 g za sardele. Vsakemu vzorcu smo dodali 0,5 mL Po-209 sledilca s koncentracijo 0,26 Bq/mL. Vzorec smo razkrojili v 50-100 mL 8 M HNO<sub>3</sub> ter ga pokrili z urnim steklom. Po enem dnevu razkroja smo vzorec postavili na grelno ploščo ter ga segreli na 80 °C in na vsaki dve uri dodajali H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Ko se je vzorec razkrojil, smo odstranili urno steklo ter uparili vzorec do suhega. Nato smo ga prefiltrirali ter ponovno raztopili v 10 mL 2 M HCl in razredčili do 100 mL. Nato smo opravili spontano depozicijo Po na bakreno ploščico. Po štirih urah smo odstranili ploščico, jo sprali z destilirano vodo ter posušili na zraku in pomerili v spektrometru alfa.

## 2.7 Meritve

Meritve Cs-137 v morski vodi so bile izvedene s spektrometrom gama z HPGe detektorjem z relativnim izkoristkom 26,5%. Posamezen vzorec smo merili 150000 s. Specifična aktivnost v vzorcu je bila preračunana relativno. Tako smo izkoristek detekcije določili s pomočjo standarda Cs-137, kemijski izkoristek pa s pomočjo Cs-134. Izračuni specifične aktivnosti Cs-137 v vzorcih morske vode so podani z enačbami 1 do 4.

$$a_{\text{Cs-137}} = \frac{N_{\text{Cs-137}}}{\varepsilon_{\text{Cs-137}} V_{\text{vz}} \eta t_{\text{m,Cs-137}}} \quad (1)$$

$$N_{\text{Cs-137}} = N_{\text{tot,Cs-137}} - N_{\text{oz}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{Cs-137}} = \frac{N_{\text{std,Cs-137}}}{A_{\text{std,Cs-137}} t_{\text{m,std}}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{N_{\text{Cs-134}} t_{\text{m,std}}}{N_{\text{Cs-134,std}} t_{\text{m,Cs-137}}} \quad (4)$$

Kjer je  $a_{\text{Cs-137}}$  specifična aktivnost Cs-137 v Bq/m<sup>3</sup>,  $N_{\text{Cs-137}}$  je število sunkov Cs-137,  $\varepsilon_{\text{Cs-137}}$  je izkoristek detekcije za Cs-137,  $V_{\text{vz}}$  je volumen vzorca v m<sup>3</sup>,  $\eta$  je kemijski izkoristek separacije,  $t_{\text{m,Cs-137}}$  je čas meritve vzorca v s,  $N_{\text{tot,Cs-137}}$  je celotno število sunkov v območju vrha Cs-137,  $N_{\text{oz}}$  je število sunkov ozadja v območju vrha Cs-137,  $N_{\text{std,Cs-137}}$  je število sunkov standarda Cs-137,  $A_{\text{std,Cs-137}}$  je aktivnost standarda Cs-137 v Bq,  $t_{\text{m,std}}$  je čas meritve standarda v s,  $N_{\text{Cs-134}}$  je število sunkov Cs-134 sledilca,  $N_{\text{Cs-134,std}}$  je število sunkov standarda Cs-134.

Meritve Po-210 v ribah in školjkah so bile izvedene s spektrometrom alfa. Vzorce smo merili na prvi poziciji, ki je najbližje detektorju, da bi dosegli čim višji izkoristek detekcije. Čas trajanja meritve je bil 150000 s. Specifično aktivnost Po-210 v vzorcu smo določili relativno s pomočjo



sledilca Po-209 in jo podajata enačbi 5 in 6.

$$a_{\text{Po-210}} = \frac{N_{\text{Po-210}} a_{\text{Po-209}} m_{\text{Po-209}}}{N_{\text{Po-209}} m_{\text{vz}} f} \quad (5)$$

$$f = \frac{m_{\text{FW}}}{m_{\text{DW}}} \quad (6)$$

Kjer je  $a_{\text{Po-210}}$  specifična aktivnost Po-210 v Bq/kg sveže mase,  $N_{\text{Po-210}}$  je število sunkov Po-210,  $a_{\text{Po-209}}$  je specifična aktivnost Po-209 sledilca v Bq/g,  $m_{\text{Po-209}}$  je masa dodanega Po-209 sledilca v g,  $N_{\text{Po-209}}$  je število sunkov Po-209 sledilca,  $m_{\text{vz}}$  je masa suhega vzorca, ki je bil analiziran v kg in  $f$  je faktor, ki podaja razmerje med svežo maso vzorca ( $m_{\text{FW}}$ ) in posušeno maso vzorca ( $m_{\text{DW}}$ ).

Meritve sedimentov, rib in školjk z VLG so bile izvedene v sodelovanju z Odsekom za fiziko nizkih in srednjih energij F-2. Njihov Laboratorij za radiološke merilne sisteme in meritve radioaktivnosti je od marca 2003 akreditiran pri Slovenski akreditaciji pod zaporedno številko LP-022 za laboratorijske meritve aktivnosti sevalcev gama in rentgenskih žarkov z visokoločljivostno spektrometrijo gama v energijskem območju od 5 do 3000 keV v cilindričnih vzorcih z največjim premerom 12 cm in največjo debelino 6 cm. Aktivnosti sevalcev žarkov gama in rentgenskih žarkov so bile izmerjene s spektrometrijo gama. Vsi spektrometri gama, ki so bili uporabljeni za meritve in pogoji okolja, v katerem delujejo, ustrezajo kriterijem, ki so navedeni v *Pravilniku o metroloških pogojih za polprevodniške števecce*. Meritve so bile opravljene po postopku *LMR-DN-10*. Rezultati meritev so sledljivi k aktivnostim primarnih standardov v francoskem laboratoriju LPRI. Sistematski vplivi geometrije vzorca, matrice vzorca, gostote vzorca, koincidenčnih korekcij in hitrosti štetja na rezultate, so upoštevani pri računu vseh aktivnosti. Negotovosti rezultatov so ocenjene v skladu z vodilom *GUM (1995)* in postopkom *LMR-RP-05*. Poleg statistične negotovosti prispevajo k negotovosti rezultatov še negotovosti predpostavk pri računu ploščin vrhov, kalibracije detektorjev, lastnosti vzorca, razpadnih konstant, merjenja količine vzorca in trajanja meritve. Najmanjša negotovost aktivnosti, ki je dosegljiva pri rutinskih meritvah in v ugodnih merskih pogojih je 5 %.

### 3 Rezultati in diskusija

Rezultati meritev specifične aktivnosti Cs-137 so podani v tabeli 2. Opazno je, da je specifična aktivnost Cs-137 spomladi v vzorcu iz lokacije 000K skoraj tri krat višja kot pri vzorcu iz lokacije 00MA ter pri vzorcih iz jesenskega vzorčevanja. Vzrok odstopanja je, glede na relativno nizke merjene aktivnosti, najverjetneje neznatna kontaminacija vzorca med radiokemijsko separacijo v laboratoriju ali kontaminacija zaščitne folije na detektorju. Zato smo pri nadaljnjih meritvah posvetili še večjo pozornost preprečitvi možne naknadne kontaminacije vzorca oziroma detektorja s Cs-137. Ostali rezultati se dobro ujemajo z rezultati, ki jih poroča *ANPA (1999)*, kjer so v Benetkah med leti 1994 in 1997 zabeležili vrednosti specifične aktivnosti Cs-137 v morski vodi med 3 in 4,3 Bq/m<sup>3</sup>.





Tabela 2 Rezultati meritev specifične aktivnosti Cs-137 v morski vodi; merilna negotovost je podana v obliki razširjene merilne negotovosti ( $k=2$ )

Lokacija	a (Bq/m <sup>3</sup> )	
	31.5.2007	12.10.2007
000K	9,9 ± 1,0	3,6 ± 0,8
00MA	3,4 ± 0,4	3,3 ± 0,7

Tabela 3 podaja razpone dolžin posameznih primerkov rib in školjk v vzorcu iz katerih je razvidno, da so bili ciplji jeseni za 20 – 30 % daljši kot spomladi, velikost sardel je bila nespremenjena, velikost školjk, ki so bile odvzete pa je manjša jeseni za 30 – 40 %. Omenjena tabela podaja tudi vrednosti faktorja sveža / suha masa vzorca, ki je tako pri ribah kot pri školjkah jeseni nekoliko nižji.

Tabela 3 Razponi dolžin posameznih primerkov rib in školjk v vzorcu ter faktor sveža /suha masa vzorca

Vzorec	Razpon dolžine (cm)		Sveža /suha masa	
	31.5.2007	16.10.2007	31.5.2007	16.10.2007
Ciplji	22-30	28-36*	3,8	3,4*
Sardele	15-18	14-17	3,5	3,1
Klapavice	6-10	4-6	6,5	6,3
Ostrige	6-10	5-7	5,9	5,8

\* vzorčevanje cipljev je potekalo 8.11.2007

V tabeli 4 so podani rezultati meritev specifične aktivnosti Po-210 v vzorcih rib in školjk. Opazne so občutne razlike med obema vrstama rib, kar je bilo pričakovati glede na njune različne prehranjevalne navade. Tudi pri IAEA (2004) ugotavljajo, da so vrednosti Po-210 v pelagičnih vrstah, med katere spada sardela višje, kot pri bentičnih vrstah med katere spada cipelj. Razlike med obema vrstama školjk, ki so bile analizirane pa so veliko manjše. So pa vrednosti za školjke več kot za dvakrat višje kot za ribe kar je posledica tega, da so školjke filtratorji. *Guogang et al.* (2003) poročajo o povprečni vrednosti Po-210 v klapavicah v Beneški laguni  $23,2 \pm 9,7$  Bq/kg sveže. IAEA (2004) poroča o vrednostih za klapavice med 8,4 in 60 Bq/kg sveže. *Ugur et al.* (2002) pa navajajo vrednosti za klapavice med 12 in 175 Bq/kg sveže, kar se dobro ujema tudi z rezultati za klapavice iz tabele 4. Razvidno je tudi, da je rezultat za ciplje jeseni za približno 60 % nižji, kot spomladi, ter da so vrednosti za školjke jeseni za približno 100 % višje kot spomladi. Te razlike lahko deloma pripišemo sezonskim nihanjem, v pretežni meri pa sami velikosti analiziranih primerkov. Namreč večji kot so primerki, nižja je specifična vrednost Po-210, kar je povezano s počasnejšim metabolizmom večjih in s tem starejših primerkov kot tudi z večjo maso večjih primerkov (*IAEA, 2004; Stricht in Kirchmann, 2001*).



Tabela 4 Rezultati meritev specifične aktivnosti Po-210 v vzorcih rib in školjk; merilna negotovost je podana v obliki razširjene merilne negotovosti ( $k=2$ )

Vzorec	a (Bq/kg sveže)	
	31.5.2007	16.10.2007
Ciplji	$8,4 \pm 0,9$	$3,7 \pm 0,7^*$
Sardele	$23,9 \pm 1,8$	$28,3 \pm 2,4$
Klapavice	$53,4 \pm 3,6$	$106,6 \pm 7,1$
Ostrige	$57,7 \pm 3,6$	$124,8 \pm 9,5$

\*vzorčevanje cipljev je potekalo 8.11.2007

Tabela 5 prikazuje rezultate meritev VLG v vzorcih sedimentov. Opazne so višje vrednosti za U-238, Be-7 in Cs-137 v sedimentu, ki je bil odvzet pri iztoku iz Izolske kanalizacije. *Guogang et al.* (2003) poročajo o vrednostih za Pb-210 v zgornji plasti sedimenta med 28,4 in 92,7 Bq/kg v Beneški laguni kar je v skladu z vrednostmi, ki so bile izmerjene v Slovenskem morju. *ANPA* (1999) podaja povprečne vrednosti Cs-137 v sedimentih v Benetkah za leta 1994-1997 med 2 in 11,5 Bq/kg, kar se prav tako sklada z vrednostmi za Cs-137 prikazanimi v tabeli 5.





Tabela 5 Rezultati meritev VLG v vzorcih sedimentov; merilna negotovost je podana v obliki združene standardne negotovosti specifične aktivnosti in se nanaša na interval zaupanja z 68 % zanesljivostjo

Vzorč. mesto	Piran - odprto morje	Izola - iztok kanalizacije
<b>Datum vzor.</b>	31/ 5/ 2007	31/ 5/ 2007
<b>Kol. vzorca (kg)</b>	<b>0.73</b>	<b>0.38</b>
<b>Koda vzorca</b>	RP07SD63351	RP07SD63151
<b>IZOTOP</b>	<b>SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)</b>	
U-238	1,8E+01 ± 2E+00	1,2E+02 ± 5E+00
Ra-226	2,3E+01 ± 2E+00	1,9E+01 ± 2E+00
Pb-210	7,1E+01 ± 5E+00	8,6E+01 ± 5E+00
Ra-228	1,5E+01 ± 5E-01	1,2E+01 ± 5E-01
Th-228	1,6E+01 ± 4E-01	1,4E+01 ± 6E-01
K-40	2,6E+02 ± 3E+01	2,7E+02 ± 3E+01
Be-7	2,1E+00 ± 7E-01	1,0E+01 ± 1E+00
I-131		
Cs-134		
Cs-137	3,0E+00 ± 1E-01	7,3E+00 ± 5E-01
Co-58		
Co-60		
Cr-51		
Mn-54		
Zn-65		
Nb-95		
Ru-106		
Sb-125		
Sr-89/Sr-90	#	#

Rezultati meritev VLG v vzorcih rib so podani v tabeli 6. Razvidno je, da ribe ne vsebujejo višjih aktivnosti z VLG določenih radionuklidov. Najvišje izmerjene vrednosti so za K-40 kar je pričakovano, saj je omenjeni naravni radionuklid široko prisoten v morskem okolju. Podatki ANPA (1997) za vsebnost Cs-137 v letih 1994-1997 za sardele znašajo med 0,1 in 0,2 Bq/kg sveže, za ciplje pa med 0,1 in 0,3 Bq/kg sveže, kar je primerljivo z vrednostmi iz tabele 6.

Rezultate meritev VLG v vzorcih školjk podaja tabela 7. Opazno je, da so vrednosti višje kot pri ribah kar lahko pripišemo načinu prehranjevanja, saj so školjke filtratorji in prefiltrirajo veliko vode. S tem se tudi poveča vnos radionuklidov v njih.



Tabela 6 Rezultati meritev VLG v vzorcih rib; merilna negotovost je podana v obliki združene standardne negotovosti specifične aktivnosti in se nanaša na interval zaupanja z 68 % zanesljivostjo

Vzorč. mesto	Piranski zaliv - cipiji		Piranski zaliv - sardele	
	Datum vzor.	Datum vzor.	Datum vzor.	Datum vzor.
Kol. vzorca (kg)	30/ 5/ 2007	8/ 11/ 2007	30/ 5/ 2007	16/ 10/ 2007
Koda vzorca	0,39	0,47	0,58	0,49
IZOTOP	RP07BRM63351	RP07HM633B1	RP07BRM63352	RP07HM633A3
	<b>SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)</b>			
U-238	<	5,0E-01 ± 4E-01	<	<
Ra-226		8,4E-01 ± 6E-01	<	5,2E-01 ± 3E-01
Pb-210		3,2E-01 ± 1E-01	<	2,6E+00 ± 8E-01
Ra-228	4,7E-01 ± 6E-02	1,5E-01 ± 6E-02	4,1E-02 ± 3E-02	2,3E-01 ± 9E-02
Th-228	2,2E-01 ± 3E-02	1,1E+02 ± 1E+01	1,1E+02 ± 1E+01	7,4E-02 ± 4E-02
K-40	1,1E+02 ± 1E+01			1,1E+02 ± 1E+01
Be-7				3,2E-01 ± 2E-01
I-131				
Cs-134				
Cs-137				
Co-58				
Co-60				
Cr-51				
Mn-54				
Zn-65				
Nb-95				
Ru-106				
Sb-125				
Sr-89/Sr-90	4,2E-02 ± 2E-02	5,3E-02 ± 3E-02	1,3E-01 ± 2E-02	1,1E-01 ± 3E-02
	#	#	#	#





Tabela 7 Rezultati meritev VLG v vzorcih školjk; merilna negotovost je podana v obliki združene standardne negotovosti specifične aktivnosti in se nanaša na interval zaupanja z 68 % zanesljivostjo

Vzorč. mesto	Piranski zaliv - klapavice		Piranski zaliv - ostrige		
	Datum vzor.	31/ 5/ 2007 0,08 RP07HM63351	16/ 10/ 2007 0,10 RP07HM633A1	31/ 5/ 2007 0,04 RP07HM63352	16/ 10/ 2007 0,04 RP07HM633A3
Kol. vzorca (kg)					
Koda vzorca					
IZOTOP	SPECIFIČNA AKTIVNOST (Bq/kg)				#
U-238	1,2E+01 ± 8E-01	4,4E+00 ± 4E-01	6,4E+00 ± 1E+00	1,6E+00 ± 7E-01	#
Ra-226	6,5E-01 ± 4E-01	4,6E-01 ± 3E-01	<	1,4E+00 ± 9E-01	#
Pb-210	3,4E+00 ± 1E+00	2,6E+00 ± 3E-01	1,6E+00 ± 4E-01	4,0E+00 ± 1E+00	#
Ra-228	2,1E-01 ± 9E-02	1,4E-01 ± 5E-02	<	3,6E-01 ± 2E-01	#
Th-228	1,9E-01 ± 6E-02	1,1E-01 ± 2E-02	1,2E-01 ± 5E-02	1,6E-01 ± 1E-01	#
K-40	2,9E+01 ± 3E+00	3,6E+01 ± 4E+00	5,1E+01 ± 5E+00	5,5E+01 ± 6E+00	#
Be-7	2,8E+00 ± 5E-01	4,2E+00 ± 4E-01	1,8E+00 ± 4E-01	1,2E+00 ± 7E-01	#
I-131					
Cs-134					
Cs-137					
Co-58					
Co-60					
Cr-51					
Mn-54					
Zn-65					
Nb-95					
Ru-106					
Sb-125					
Sr-89/Str-90	<	4,6E-02 ± 2E-02			



## 4 Ocena letne efektivne ingestijske doze za Po-210 v ribah in školjkah

Glede na to, da je dozni koeficient na enoto vnosa zaradi zauživanja Po-210 približno tisoč krat višji kot za ostale radionuklide, ki so bili izmerjeni v ribah in školjkah, je prispevek ostalih radionuklidov k efektivni dozi zanemarljiv. Za izračun letne efektivne ingestijske doze za Po-210 pri zaužitju rib in školjk je bila uporabljena sledeča enačba:

$$E_{\text{Po-210,ing}} = h(g)_{\text{Po-210,ing}} a_{\text{Po-210}} m \quad (7)$$

Kjer je  $E_{\text{Po-210,ing}}$  letna efektivna ingestijska doza za Po-210 v Sv/leto,  $h(g)_{\text{Po-210,ing}}$  je predvidena efektivna doza na enoto vnosa Po-210 zaradi zauživanja za odrasle v Sv/Bq,  $a_{\text{Po-210}}$  je specifična aktivnost Po-210 v vzorcu v Bq/kg sveže mase in  $m$  je letna zaužita sveža masa rib oziroma školjk v kg/leto. Za izračun so bili uporabljeni podatki podani v tabeli 8.

Tabela 8 Podatki za izračun letne efektivne ingestijske doze za Po-210 za odrasle

	$h(g)_{\text{Po-210,ing}}$ (Sv/Bq)	$a_{\text{Po-210}}$ (Bq/kg sveže)	$m$ (kg/leto)
Ribe	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$16,1 \pm 1,9$	5,9
Školjke	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$85,6 \pm 5,8$	0,7

Podatek o predvideni efektivni dozi na enoto vnosa Po-210 zaradi zauživanja za odrasle je vzet iz tabele 1 v *Uredbi o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih* (Ur.l. RS, št. 49/2004). Specifična aktivnost Po-210 je izračunana kot srednja vrednost rezultatov za ciplje in sardele, ki so bile vzorčene poleti in jeseni. Specifična aktivnost za školjke je izračunana kot srednja vrednost od rezultatov za klapavice in ostrige vzorčene poleti in jeseni. Ker Statistični urad Republike Slovenije ne razpolaga s podatkom koliko morskih rib zaužije povprečen Slovenec, smo uporabili podatek o dobavi vseh ribiških proizvodov na prebivalca Slovenije iz *Eurostat* (2006) za leto 2000, ki smo ga zmanjšali za desetino, kar je bila naša ocena o zaužitih školjkah.

Z izračunom ugotovimo, da je letna efektivna ingestijska doza za Po-210 za odrasle pri zaužitju rib ( $114 \pm 28$ )  $\mu\text{Sv/leto}$  in pri zaužitju školjk ( $72 \pm 11$ )  $\mu\text{Sv/leto}$ . Pri tem je merilna negotovost podana kot razširjena merilna negotovost ( $k=2$ ). Za relativni merilni negotovosti za  $h(g)_{\text{Po-210,ing}}$  in  $m$  sta bili predpostavljene vrednosti 2 %. Skupna letna efektivna ingestijska doza za ribe in školjke za Po-210 za odrasle tako za 2,5 krat presega vrednost ingestijske doze preračunane iz vrednosti letnih usedov na pridelke (preračunano iz podatkov za vazelinske plošče) za odrasle v letu 2006 v okolici NEK (*Smodiš in Štrok*, 2007).

## 5 Priporočila za nadaljnje raziskave

Glede na nezanesljive podatke o zaužitju rib in školjk za obmorsko populacijo, visoke predvidene efektivne doze na enoto vnosa Po-210 zaradi zauživanja za odrasle in posledično nezanesljivih ocen doz, bi bilo potrebno v prihodnje opraviti dodatne raziskave vsebnosti Po-210 v morski bioti ob hkratni pridobitvi zanesljivejših prehranskih podatkov za obmorsko referenčno populacijo.





## 6 Literatura

ANPA, *Environmental Radioactivity Networks in Italy 1994 – 1997*, Rim, 1999

Eurostat, *Fishery statistics*, Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006

GUM (Guide on Expression of Uncertainty in Measurement), ISO 1995, Geneva

Guogang, J., Belli, M., Sansone, U., Rosamilia, S., Blasi, M.  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  concentrations in the Venice lagoon ecosystem (Italy) and the potential radiological impact to the local public and environment, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2003, 256/3, str. 513-528

IAEA, *Marine Environmental Assessment of the Black Sea, Project Report*, Regional Technical Co-operation Project RER/2/003, 2004

LMR-DN-10, Visokoločljivostna spektrometrija gama v laboratoriju, Institut Jožef Stefan, Ljubljana

LMR-RP-05, Ocena merilne negotovosti, Institut Jožef Stefan, Ljubljana

Pravilnik o metroloških pogojih za polprevodniške števec – spektrometre za gama sevanje, Uradni list SFRJ 22 (1991) 418

Smodiš, B., Štok, M., Padavine in suhi usedi. V: Glavič-Cindro, D. (ur.), Zorko, B. (ur.). *Meritve radioaktivnosti v okolici Nuklearne elektrarne Krško : poročilo za leto 2006*. Ljubljana: Institut "Jožef Stefan", 2007, str. 44/132-59/132

Stricht, E. V. D., Kirchmann, R. *Radioecology, Radioactivity & Ecosystems*, Liege: Fortemps, 2001.

Ugur, A., Güngör, Y., Bassar, A., Trace metals and  $^{210}\text{Po}$  ( $^{210}\text{Pb}$ ) concentrations in mussels (*Mytilus galloprovincialis*) consumed at western Anatolia, *Applied Radiation and Isotopes*, 2002, 57, str. 565-571

Uradni list Republike Slovenije, *Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih*, 49/2004

