

Primjena GIS tehnologije u kartiranju prirodnih radionuklida

Radas, Tonka

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:355645>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-29**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij Geološkog inženjerstva

**PRIMJENA GIS TEHNOLOGIJE U KARTIRANJU PRIRODNIH
RADIONUKLIDA**

Diplomski rad

Tonka Radas

Zagreb, 2024.



KLASA: 602-01/24-01/131
URBROJ: 251-70-14-24-1
U Zagrebu, 20.09.2024.

Tonka Radas, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/131, URBROJ: 251-70-14-24-1 od 01.07.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

PRIMJENA GIS TEHNOLOGIJE U KARTIRANJU PRIRODNIH RADIONUKLIDA

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv.prof.dr.sc. Želimir Veinović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentora Izv.prof.dr.sc. Dario Perković.

Mentor:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Želimir Veinović

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Ana Maričić

(titula, ime i prezime)

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dario Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

Oznaka: OB 8.5.-1 SRF-1-13/0

Stranica: 1/1

Čuvanje (godina) Trajno

PRIMJENA GIS TEHNOLOGIJE U KARTIRANJU PRIRODNIH RADIONUKLIDA

Tonka Radas

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U okviru rada izrađene su interpolacijske karte koncentracija prirodnih radionuklida na području bivše tvornice Jugovinil u Kaštelima. Izvor povišenih koncentracija su šljaka i pepeo dobiveni sagorijevanjem ugljena sa povišenim udjelom radioaktivnih nuklida. Za izradu karata korišteni su računalni softveri *ArcMap 10.8.2* i *ArcGIS Pro 3.2.0*. Interpolacija je provedena korištenjem geostatističke metode *Empirical Bayesian Kriging*. Kartiranje je omogućilo uočavanje žarišnih točaka i potencijalnih izvora zagađenja.

Ključne riječi: Prirodni radionuklidi, koncentracije, *ArcMap*, *ArcGIS Pro*, interpolacija, geostatistika, termoelektrana, pepeo

Završni rad sadrži: 38 stranice, 2 tablice, 26 slika, 0 priloga, i 0 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: izv.prof.dr.sc. Dario Perković
izv. prof. dr. sc. Želimir Veinović

Ocjenjivači: izv.prof.dr.sc. Dario Perković
izv. prof. dr. sc. Želimir Veinović
izv. prof. dr. sc. Uroš Barudžija
doc. dr. sc. Ivan Medved
doc. dr. sc. Helena Vučenović

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGY IN MAPPING NATURAL RADIONUCLIDES

Tonka Radas

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

As part of the thesis, interpolation maps of the concentrations of natural radionuclides in the area of the former Jugovinil factory in Kaštela were created. The sources of elevated concentrations are slag and ash produced by burning coal with a high content of radioactive nuclides. The computer software ArcMap 10.8.2 and ArcGIS Pro 3.2.0 were used to create the maps. The interpolation was performed using the geostatistical method Empirical Bayesian Kriging. Creating the maps enabled the identification of hotspots and potential sources of pollution.

Keywords: Natural radionuclides, concentrations, *ArcMap*, *ArcGIS Pro*, interpolation, geostatistics, thermal power plant, ash

Thesis contains: 38 pages, 2 tables, 26 figures, 0 appendixes, 10 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Associate Professor Dario Perković, PhD
Associate Professor Želimir Veinović, PhD

Reviewers: Associate Professor Dario Perković, PhD
Associate Professor Želimir Veinović, PhD
Associate Professor Uroš Barudžija, PhD
Assistant Professor Ivan Medved, PhD
Assistant Professor Helena Vučenović, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PRIRODNI RADIONUKLIDI.....	2
3. GIS I INTERPOLACIJA PODATAKA	4
4. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA	5
5. OBRADA PODATAKA I PRIMJENA GIS TEHNOLOGIJE	7
5.1 <i>ArcMap</i>	8
5.2 <i>ArcGIS Pro</i>	12
6. REZULTATI I RASPRAVA	17
7. GOSPODARENJE REZIDUIMA.....	32
8. ZAKLJUČAK.....	33
9. LITERATURA	34

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Uranijski, torijski i aktinijski niz nuklearnog raspada (Ojovan i Lee, 2005).....	2
Slika 4-1 Podjela područja istraživanja na istražne zone.....	6
Slika 5-1. Crtanje poligona zona područja istraživanja.....	8
Slika 5-2. Unos tabličnih podataka u ArcMap.....	9
Slika 5-3. Unos tabličnih podataka u ArcMap.....	9
Slika 5-4. Eksportiranje tabličnih podataka u Shapefile.....	10
Slika 5-5. Spremanje novog Shapefile-a.....	10
Slika 5-6. Labeliranje točaka mjerenja.....	11
Slika 5-7. Završna karta u ArcMap-u.....	11
Slika 5-8. Geostatistical wizard - odabir metode i podataka.....	12
Slika 5-9. Postavke kriginga.....	12
Slika 5-10. Eksportiranje interpolirane karte u raster.....	13
Slika 5-11. Postavke oblikovanja pojedinog rastera.....	14
Slika 5-12. Standardizacija rastera Standardize Field alatom.....	15
Slika 5-13. Zbrajanje rastera Raster Calculator alatom.....	16
Slika 5-14. Karta zbroja koncentracija svih elemenata.....	16
Slika 6-1. Interpolacijska karta koncentracije radija-226.....	18
Slika 6-2. Interpolacijska karta koncentracije olova-214.....	19
Slika 6-3. Interpolacijska karta koncentracije bizmuta-214.....	20
Slika 6-4. Interpolacijska karta koncentracije aktinija-228.....	22
Slika 6-5. Interpolacijska karta koncentracije bizmuta-212.....	23
Slika 6-6. Interpolacijska karta koncentracije talija-208.....	24
Slika 6-7. Interpolacijska karta koncentracije cezija-137.....	26
Slika 6-8. Interpolacijska karta koncentracije joda-131.....	27
Slika 6-9. Interpolacijska karta koncentracije berilija-7.....	29
Slika 6-10. Interpolacijska karta koncentracije kalija-40.....	30

POPIS TABLICA

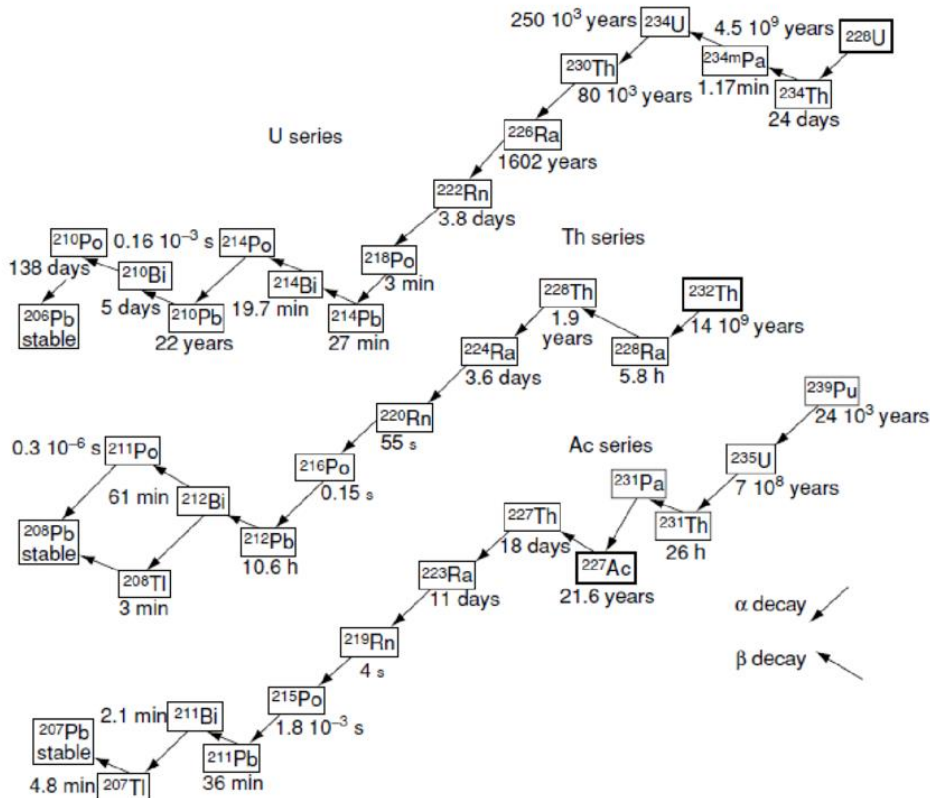
Tablica 5-1. Formatirani tablični podaci.....	7
Tablica 6-1. Pearson koeficijenti korelacije elemenata.	31

1. UVOD

Prirodni radionuklidi prisutni su na Zemlji u značajnim količinama. Oni uključuju primordijalne radionuklide, poput $^{40}\text{Kalija}$, $^{235}\text{Uranija}$, $^{238}\text{Uranija}$ i $^{232}\text{Torija}$, te izotope nastale njihovim poluraspadom (IAEA, 2022). Kada se sirovine s niskim koncentracijama radionuklida koriste u industrijskim procesima, kao što je sagorijevanje prirodnog ugljena u termoelektrani, koncentracija radionuklida se u nastalim nusproizvodima, poput pepela i šljake, može višestruko povećati. U radu se kartiraju povišene koncentracije prirodnih radionuklida na području bivše tvornice Jugovinil u Kaštelanskom zaljevu. U sklopu tvornice je u pogonu bila termoelektrana na ugljen. Njenim dugogodišnjim radom proizvedena je velika količina otpada (pepela i šljake) koji su sadržavali povišene količine radionuklida. Otpad je odlagan u blizini tvornice te se područje nije u potpunosti saniralo. Upotreba GIS softvera učinkovita je pri analizi raspodjela koncentracija onečišćivala jer je podatke moguće geostatistički obraditi i jasno predočiti. Za interpolaciju koncentracija radionuklida preko cijelog područja istraživanja korištena je metoda *Empirical Bayesian Kriging*.

2. PRIRODNI RADIONUKLIDI

Prirodni radionuklidi definirani su prema IAEA (*International Atomic Energy Agency*) kao radionuklidi koji se prirodno nalaze na Zemlji u značajnim količinama. Pojam se obično koristi za primordijalne radionuklide (^{40}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th) i radionuklide koji su proizvodi njihovog raspada. U okolišu je prisutno više od 60 prirodnih radionuklida. Prema podrijetlu oni se dijele u dvije skupine: primordijalne i kozmogene. Primordijalni radionuklidi prisutni su u zemljinoj kori od njenog nastanka i nalaze se u stijenkama i mineralima. Ova skupina uključuje tri dugovječna aktinidna nuklida (^{232}Th , ^{235}U i ^{238}U). Raspad navedenih radionuklida ponovno stvara radionuklide kćeri, stvarajući nizove koji konačno završavaju u stabilnim izotopima olova (slika 2-1). Unutar ovih nizova radionuklida može se uočiti α -, β - i γ -zračenje. Za razliku od takvih nizova, niz kalija-40 se raspada tvoreći stabilne izotope ^{40}Ca i ^{40}Ar . Kozmogeni radionuklidi kontinuirano se proizvode u atmosferi bombardiranjem kozmičkim zrakama elemenata poput dušika, kisika i argona. Ovi radionuklidi dopijevaju na Zemljinu površinu putem oborina, suhih padalina ili kroz plinovite geokemijske procese. Tipični predstavnici su radiokarbon (^{14}C), tricij (^3H), te izotopi natrija (^{22}Na) i berilija (^7Be).



Slika 2-1. Uranijski, torijski i aktinijski niz nuklearnog raspada (Ojovan i Lee, 2005).

Prirodni radionuklidi prisutni su u Zemljinoj kori, ali njihova distribucija nije ravnomjerna. Kada se sirovine koje sadrže relativno niske koncentracije prirodnih radionuklida uvedu u industrijski proces, tada se radionuklidi mogu koncentrirati u dobivenim nusproizvodima. (Kovacs et al., 2017). Takve aktivnosti uključuju rudarenje i preradu ruda, proizvodnju prirodnog plina i nafte, izgaranje fosilnih goriva i proizvodnju ugljenog pepela izgaranjem ugljena u elektranama (Francis i Nancharaiah, 2015). Materijal koji ostaje nakon industrijskog procesa, u čijem su sastavu ili koji je onečišćen prirodnim radionuklidima, je u Pravilniku o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu definiran kao rezidui.

3. GIS I INTERPOLACIJA PODATAKA

GIS (Geografski informacijski sustav) softver se često koristi u upravljanju i monitoringu onečišćenja jer je korištenjem softvera moguće analizirati i kartirati različite vrste prikupljenih podataka. U softveru je moguće kombiniranje različitih izvora podataka poput mjerenja kvalitete zraka, vode ili tla, satelitskih snimaka, georeferenciranih topografskih karata i sl. Karte izrađene u GIS-u korisne su pri identificiranju žarišta onečišćenja, praćenju promjena izmjerenih koncentracija u vremenu i modeliranju širenja utjecaja zagađivača. To omogućuje bolju procjenu rizika, ciljane intervencije i informirano donošenje odluka. Osim toga, GIS olakšava učinkovitu komunikaciju s javnošću kroz jasne vizualizacije temeljene na podacima.

Empirical Bayesian Kriging (EBK) je geostatistička metoda interpolacije koja se koristi u GIS softveru za procjenu vrijednosti na lokacijama gdje podaci nisu prikupljeni, na temelju poznatih podatkovnih točaka. Za razliku od običnog kriginga, uključuje dodatne informacije o prostornoj varijabilnosti iz cijelog skupa podataka, a ne samo iz susjednih točaka. Skup podataka dijeli se u podskupove kako bi se bolje razumjela prostorna varijabilnost unutar svakog podskupa što je posebno važno u složenim skupovima podataka gdje prostorni uzorci nisu ujednačeni. Zatim se procjenjuju parametri variograma. Variogram opisuje koliko su podaci povezani na različitim udaljenostima, zasebno za svaki podskup. Zasebnom obradom svakog podskupa točnije se obuhvaćaju specifične karakteristike svakog od njih. Takvom metodom moguće je fleksibilnije i prilagodljivije modelirati prostorne varijabilnosti u usporedbi s jednostavnim krigingom, koji može pretpostaviti samo jedan variogram za cijeli skup podataka (ESRI, 2024). EBK je posebno koristan u studijama o okolišu, kao što je kartiranje razina onečišćenja ili predviđanje kontaminacije tla, gdje je za analizu i mogućnosti sanacije, ključna preciznost.

4. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Područje istraživanja nalazi se u sklopu bivše tvornice Jugovinil u Kaštelanskom zaljevu, između Kaštel Gomilice i Kaštel Sućurca. Područje pripada srednjem Jadranu i radi se o poluzatvorenom, niskoenergetskom okolišu ukupne površine 60 km², prosječne dubine 23 metra. Do ranih 1990-ih okolno područje bilo je gusto naseljeno i odlikovalo se najvećom razinom industrijalizacije duž istočne obale Jadrana. Kao posljedica intenzivne industrije pojavili su se mnogi izvori onečišćenja kao što su bivša kemijska tvornica Jugovinil, tvornica cementa, tvornica željeza, brodogradilište i postrojenje za galvanizaciju. Povrh toga, onečišćenju zaljeva pridonio je gust promet na glavnoj cesti u blizini obale (Lovrencić et al., 2005).

U sklopu tvornice, od 1941. godine, u pogonu je bila termoelektrana za čiji se rad koristio ugljen. Postojalo je više izvorišta sagorijevanog ugljena neka od kojih su Raša u Istri (antracit), Drinovci i Širitovci kod Šibenika (mrki ugljen i lignit) te šire područje Livanjskog polja u Bosni i Hercegovini (mrki ugljen i lignit). Sav ugljen bio je izvor povišenih koncentracija uranija i drugih prirodnih radionuklida nastalih njegovim poluraspadom. Šljaka i pepeo, nastali radom termoelektrane, sadržavali povišene koncentracije prirodnih radionuklida, koja se procesom izgaranja višestruko povećala. Šljaka i pepeo odlagani su u blizini tvornice do 1973. godine, a zatim su premješteni na prikladniju lokaciju nekoliko stotina metara dalje, na rubu mjesta Kaštel Gomilica, gdje su prekriveni zaštitnom plastičnom folijom i slojem gline i humusa. Prostor je potom ograđen i prekriven travom. S vremenom je prostor između tvornice i starog skladišta postupno bio prekriven novim otpadnim materijalima koji su sadržavali trosku i pepeo (Oreščanin et al., 2005).

Za potrebe rada područje je podijeljeno na 7 zona, ovisno o svojedobnoj uporabi prostora (slika 4-1). Zona A – lokacija stare deponije rudne jalovine s povećanom prirodnom radioaktivnošću, sanirano 1973. uključujući materijal iskopan iz zone C, zona B – područje zatrpano pepelom kao i građevinskim otpadom i otpadom od rušenja tijekom 1970-ih i 1980-ih, zona Bn – servisno područje mola zatrpano 1990-ih, zona Bmt – područje očišćeno tijekom sanacije 1973. godine, zona Cug – odlagalište ugljena u funkciji od 1949. godine i zona D – područja s vjerojatnom akumulacijom pepela, bivša taložnica od posebnog interesa za istraživanje jer se na toj lokaciji skladištio pepeo i šljaka dobiveni iz ugljena korištenog u termoelektrani (Prlić et al., 2011; IMI i FZOEU, 2011).



Slika 4-1 Podjela područja istraživanja na istražne zone

5. OBRADA PODATAKA I PRIMJENA GIS TEHNOLOGIJE

Za grafički prikaz mjerenih koncentracija prirodnih radionuklida korišteni su računalni softveri *ArcMap 10.8.2* i *ArcGIS Pro 3.2.0.*, ovaj potonji je moderniji GIS softver koji je ESRI razvio kao zamjenu za *ArcMap (ArcGIS Desktop)* generaciju softvera.

Ulazni podaci za rad u softveru su koncentracije radionuklida mjerene i zabilježene u obliku *Microsoft Excel* tablice. Mjerenja su izvođena na području odlagališta pepela i šljake termoelektrane Jugovinil u Kaštelima, na stalnim i obilježenim lokacijama (Tablica 5-1). Točkama mjerenja su u *Excel* tablici pridružene koordinate, opis lokacije i naziv točke. Od podataka dobivenih u tablici korišteni su oni koji se odnose na prirodne radionuklide, budući da ista sadržava mjerenja i za mnoge druge elemente.

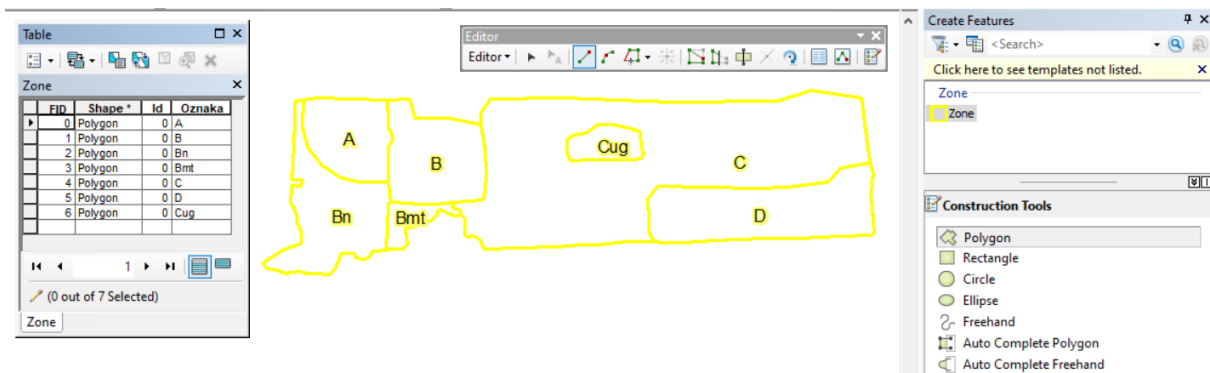
Kako bi se podaci mogli obrađivati u GIS-u, potrebno ih je pretvoriti u odgovarajući format. Dobivena tablica svedena je na novu, koja sadrži samo podatke koji su relevantni za rad i u obliku koji odgovara GIS obradi. Nova tablica prikazana je u tablici 5.1.

Tablica 5-1. Formatirani tablični podaci.

Mjesto	Oznaka	Sirina	Duzina	NmV	Datum	is lokac	Istazne zone	Ra226	Pb214	Bi214	Ac228	Bi212	Tl208	K40	Cs137	I131	Be7
rina kast	IG1	5613981.35	4823167.077	1.90	.3.2010.	marina rt	Bnm	19.58	33.58	31.42	22.81	10.25	27.22	96.89	100.48	88.93	153.16
rina kast	IG2	5614025.517	4823184.49	2.06	.3.2010.	marina rt	Bnm	19.17	29.34	43.19	17.93	-6.60	18.77	26.20	96.68	78.30	133.66
rina kast	IG3	5614079.61	4823174.30	1.95	.3.2010.	marina rt	Bnm	20.44	19.90	36.19	28.77	11.36	48.19	133.97	116.02	74.94	115.34
Jugovinil	IG4	5614181.62	4823198.25	3.39	.3.2010.	dogradili	Bmt	19.35	23.45	27.17	15.29	6.60	23.15	93.92	8.80	64.68	103.00
Jugovinil	IG5	5614184.75	4823327.99	4.27	.3.2010.	to kod ku	B	285.46	587.74	860.88	29.66	32.40	38.80	74.64	378.51	261.79	391.02
Jugovinil	IG6	5614172.07	4823361.11	3.63	.3.2010.	to kod ku	B	295.14	632.48	895.81	59.08	29.69	40.05	87.00	237.67	280.08	423.88
Jugovinil	IG7	5614225.19	4823326.79	3.53	.3.2010.	to kod ku	B	95.15	183.45	331.03	25.94	27.11	16.90	49.93	434.25	225.32	323.37
Jugovinil	IG8	5614236.90	4823275.09	3.56	.3.2010.	to kod ku	B	81.89	172.20	111.09	9.68	21.47	48.81	61.79	340.36	174.11	245.05
Jugovinil	IG9	5614222.34	4823256.40	5.58	.3.2010.	sla talozn	Bmt	229.25	544.22	782.70	69.65	12.83	102.63	134.46	123.23	257.60	392.96
Jugovinil	IG10	5614194.33	4823239.81	3.68	.3.2010.	sla talozn	Bmt	87.79	240.31	389.35	31.99	12.83	73.22	81.57	173.11	209.65	297.33
Jugovinil	IG11	5614210.02	4823249.18	4.12	.3.2010.	sla talozn	Bmt	146.73	434.40	612.17	33.39	31.40	108.89	68.22	-240.60	236.25	336.14
Jugovinil	IG12	5614179.19	4823231.88	4.15	.3.2010.	sla talozn	Bmt	120.63	301.49	460.33	45.51	2.57	42.55	115.18	132.04	217.82	280.73
Jugovinil	IG13	5614154.73	4823277.70	3.87	.3.2010.	dogradili	Bmt	98.10	223.61	338.80	11.39	5.13	26.28	70.69	171.32	178.49	192.14
Jugovinil	IG14	5614166.23	4823390.58	3.75	.3.2010.	is - sjever	B	276.62	623.05	922.43	27.97	35.87	45.68	81.57	129.10	284.35	206.06
Jugovinil	IG15	5614225.37	4823397.13	3.53	.3.2010.	isne cest	B	25.68	78.14	119.62	48.37	16.99	20.65	104.80	296.35	124.85	66.83
Jugovinil	IG16	5614495.30	4823366.60	1.47	.3.2010.	dište uglj	Cug	225.88	377.55	530.64	42.63	24.03	23.87	69.21	268.98	198.84	260.50
Jugovinil	IG17	5614935.32	4823240.74	3.50	.3.2010.	taloznica	D	86.94	162.34	229.75	29.82	15.37	14.87	68.22	174.03	133.50	116.96
Jugovinil	IG18	5614931.20	4823325.79	3.48	.3.2010.	taloznica	D	28.07	36.17	59.57	23.95	10.63	17.98	107.77	133.27	96.05	178.22
Jugovinil	IG19	5614856.77	4823263.41	3.54	.3.2010.	taloznica	D	846.28	575.20	812.28	49.69	36.07	69.46	110.24	29.34	283.54	411.99
Jugovinil	IG20	5614793.33	4823271.66	4.01	.3.2010.	taloznica	D	254.09	591.64	909.45	90.73	36.95	46.31	139.40	302.67	285.05	353.65
Jugovinil	IG21	5614645.56	4823248.70	4.33	.3.2010.	taloznica	D	269.25	590.17	842.03	59.96	35.13	48.19	89.48	268.29	258.04	379.22
Jugovinil	IG22	5614645.34	4823261.69	4.48	.3.2010.	taloznica	D	257.46	771.97	1089.00	40.98	39.58	46.93	102.33	260.87	301.18	373.14
Jugovinil	IG23	5614596.01	4823229.40	3.93	.3.2010.	taloznica	D	206.10	510.47	740.18	61.94	22.36	26.28	111.23	325.58	253.67	368.86
Jugovinil	IG24	5614619.07	4823218.68	3.95	.3.2010.	taloznica	D	168.83	454.22	588.95	35.81	26.13	18.77	60.80	161.20	188.94	280.42
Jugovinil	IG25	5614707.90	4823223.86	4.25	.3.2010.	taloznica	D	167.78	373.74	513.16	49.58	23.79	28.79	139.90	184.46	194.91	268.77
Jugovinil	IG26	5614807.59	4823227.45	4.17	.3.2010.	taloznica	D	226.73	539.20	617.02	64.51	23.48	20.65	76.62	210.94	190.90	245.05
Jugovinil	IG29	5614310.51	4823224.55	3.51	.3.2010.	brtona -	C	43.16	114.83	144.60	13.84	12.08	15.15	76.62	243.53	114.80	153.16
Jugovinil	IG30	5614285.04	4823296.35	3.68	.3.2010.	to kod ku	B	2.74	45.08	94.86	36.20	16.20	22.02	172.03	158.44	116.78	239.48
Jugovinil	IG31	5614301.83	4823335.53	3.69	.3.2010.	to kod ku	B	55.58	120.37	175.07	22.31	18.16	15.43	107.27	246.47	129.13	105.82
Jugovinil	IG32	5614416.90	4823209.20	3.60	.3.2010.	dogradili	C	27.71	66.72	93.77	13.97	13.12	10.64	74.15	140.84	97.24	144.80
Jugovinil	IG33	5614578.37	4823217.72	3.65	.3.2010.	adno od	C	50.52	176.27	253.62	27.98	14.66	18.77	86.51	149.64	151.21	221.74
Jugovinil	IG34	5614541.83	4823273.49	3.62	.3.2010.	adno od	C	103.15	217.46	294.22	33.70	20.52	18.15	109.74	58.68	157.52	213.62
Jugovinil	IG35	5614526.35	4823285.56	3.75	.3.2010.	adno od	C	10.53	47.42	88.46	17.92	10.94	9.39	84.53	70.42	97.24	149.65

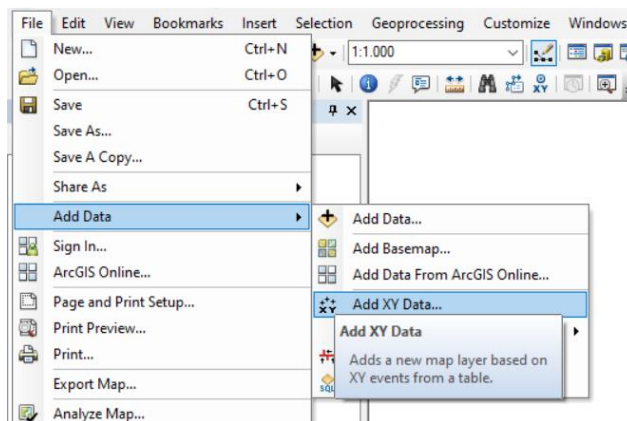
5.1 ArcMap

Prvi dio GIS obrade odrađen je u softveru *ArcMap 10.8.2*. Prvi korak bio je georeferenciranje satelitskog snimka područja istraživanja. Dobivena tif datoteka dodaje se u softver te se pomoću *Georeferencing* alata smješta na odgovarajuću lokaciju u odabranom koordinatnom sustavu - HTRS96/TM. U softver se kao dodatna podloga, a i svojevrsna provjera provedenog georeferenciranja, dodaje i podloga Geoportala Digitalni ortofoto 2020 – WMS. Pomoću georeferencirane karte i podloge, područje istraživanja podijeljeno je na sedam zona, ovisno o svojedobnoj upotrebi područja. Za prikaz podjele poligoni su iscrtani korištenjem alatne trake *Editor* i *Create features* prozora (Slika 5-1).

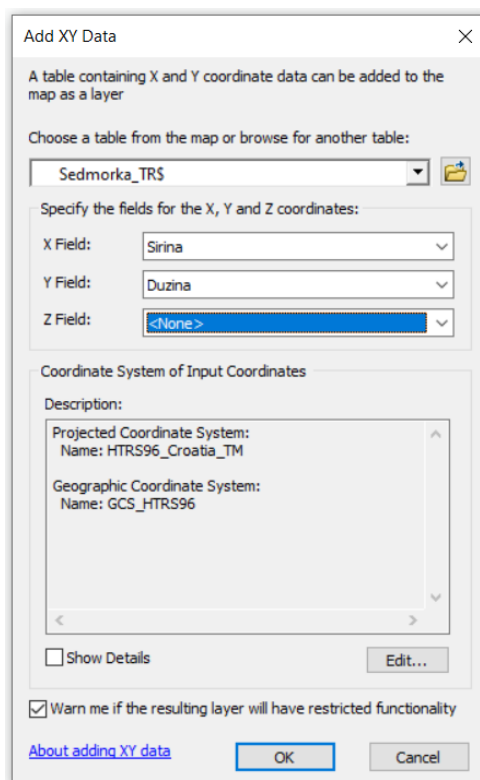


Slika 5-1. Crtanje poligona zona područja istraživanja.

Idući korak je unos *Excel* podataka u softver, podaci se dodaju klikom na *File > Add XY Data* naredbe (Slika 5-2). Klikom se otvara izbornik u kojemu se odabire list iz obrađene *Excel* tablice te se odabiru stupci tablice koji predstavljaju X i Y polja, gdje se za X polje odabire stupac *Sirina*, a za Y polje stupac pod nazivom *Duzina*. *Sirina* i *Duzina* odnose na koordinate točaka mjerenja, te će točno smjestiti točke na georeferenciranu kartu (slika 5-3).

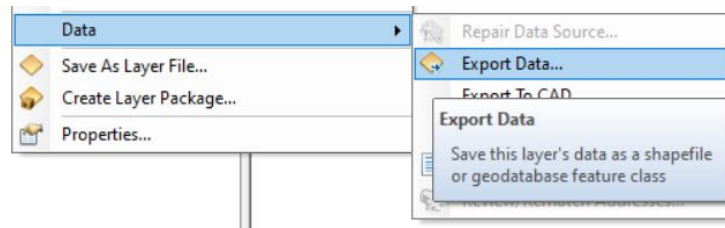


Slika 5-2. Unos tabličnih podataka u ArcMap.



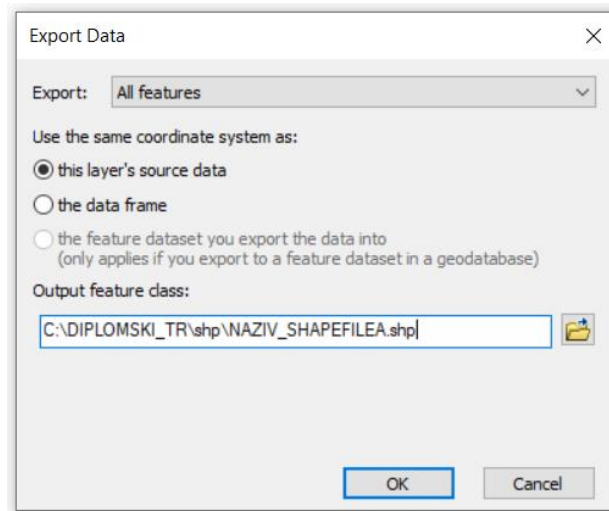
Slika 5-3. Unos tabličnih podataka u ArcMap

Za daljnju obradu potrebno je podatke unesene u softver izvesti u *Shapefile* datoteku na način da se u tablici sadržaja, gdje su isti podaci sada dodani, tablica odabere desnim klikom te se odabere opcija *Data > Export data* (slika 5-4).



Slika 5-4. Eksportiranje tabličnih podataka u Shapefile.

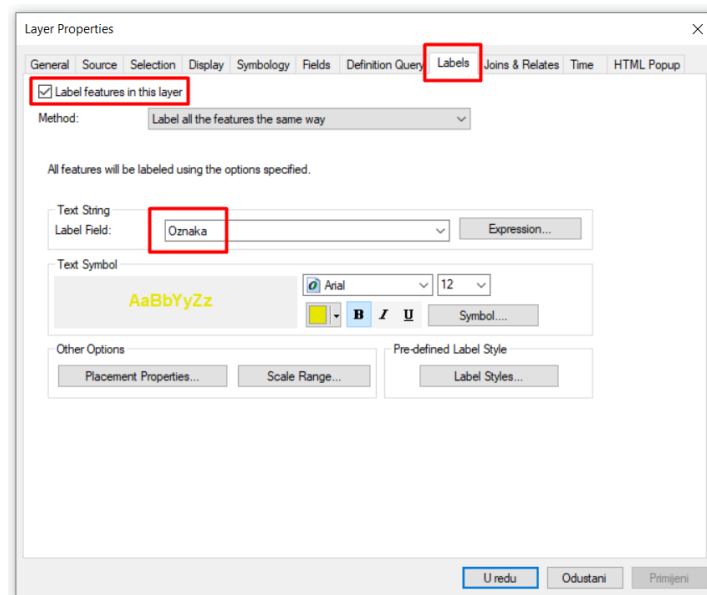
Tada se u izborniku odabire koordinatni sustav novonastalog *Shapefile* -a, naziv te mapa u koju će se isti spremiti. Za koordinatni sustav bira se onaj u kojemu je i sam projekt (slika 5-5).



Slika 5-5. Spremanje novog Shapefile-a.

Nakon što su spremljeni, *Shapefile*-ovi se dodaju u tablicu sadržaja. Kada im se uključi vidljivost, na karti se pojavljuju točke mjerenja koncentracija, koje su označene žutim kružićem. U svrhu preglednosti podataka točke mjerenja su labelirane. Desnim klikom na

Shapefile odabire se *Properties* > *Labels*. U *Label Field* rubrici odabire se stupac tablice *Oznaka*, kako bi labele točaka odražavale njihove oznake u *Excel* tablici (slika 5-6).



Slika 5-6. Labeliranje točaka mjerenja.

Krajnji rezultat rada u softveru *ArcMap* prikazan je na slici 5-7. Završena karta spremna je za daljnju obradu u softveru *ArcGis Pro*, u kojemu će biti izvršena interpolacija mjerenih vrijednosti koncentracija prirodnih radionuklida.

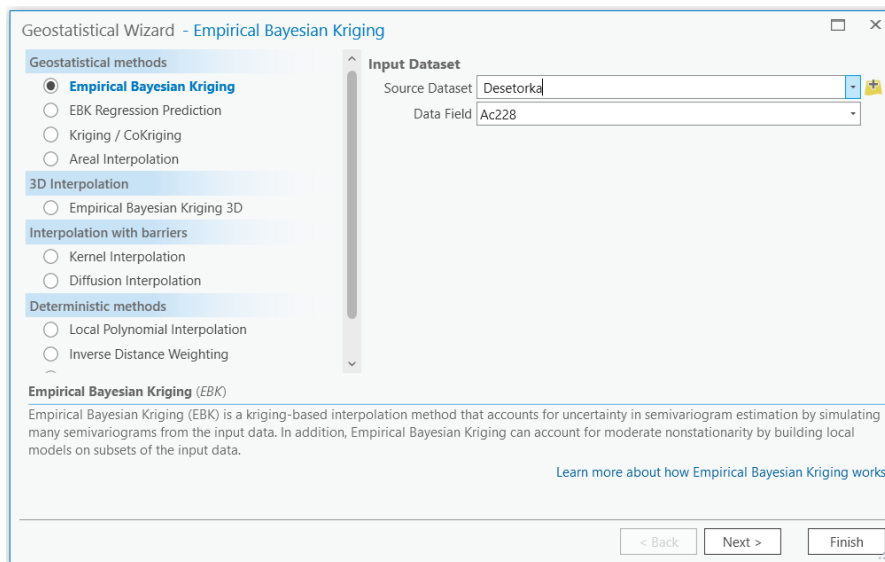


Slika 5-7. Završna karta u *ArcMap*-u.

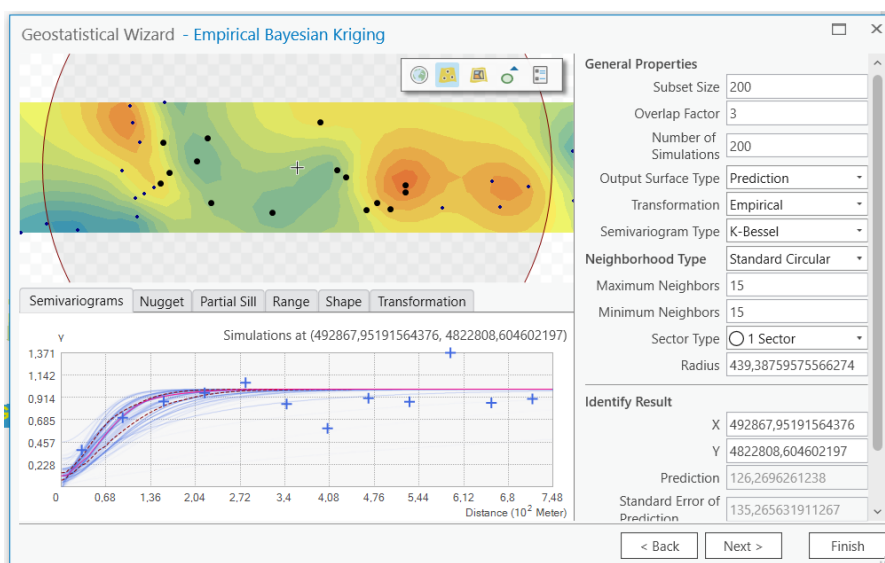
5.2 ArcGIS Pro

Nastavak obrade podataka tj. izrada karte interpolacije, odvija se u softveru *ArcGIS Pro 3.2.0*. Karte su izrađene na baznoj karti prikazanom na slici 7., koju se importiralo u softver klikom na *Insert > Import map*, te odabirom odgovarajuće .mxd datoteke.

Postupak interpolacije provodi se klikom na *Analysis > Geostatistical Wizard*. Otvara se prozor sa slike 5-8. u kojemu se odabire metoda interpolacije (*Empirical Bayesian Kriging*) i podaci koji se obrađuju (*Desetorka*). Na slici 5-9. prikazane su postavke interpolacije koje su iste za svaki od deset elemenata.

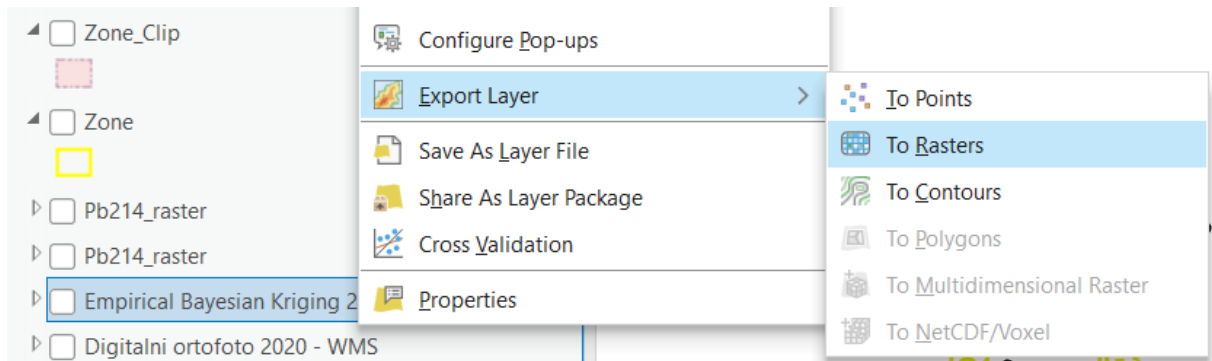


Slika 5-8. Geostatistical wizard - odabir metode i podataka.



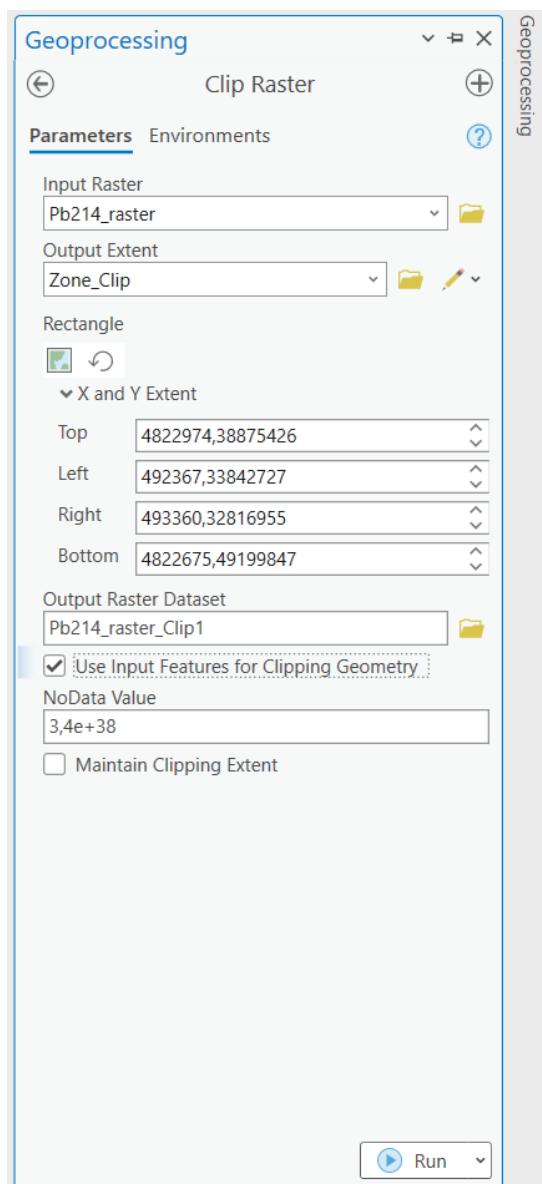
Slika 5-9. Postavke kriginga.

Dobivena karta je po vrsti *shapefile*-a točka, te se za daljnju obradu mora eksportirati u raster. Na slici 5-10. prikazan je postupak.



Slika 5-10. Eksportiranje interpolirane karte u raster.

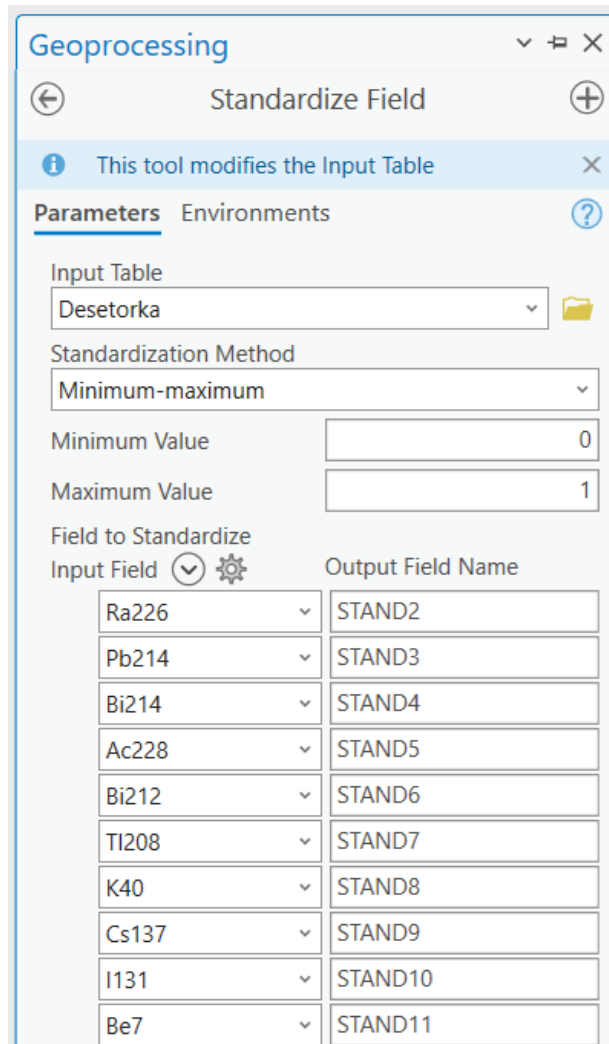
U *Geoprocessing* prozoru koji se otvori potrebno je odrediti mapu u koju će se novonastali raster pohraniti i njegov naziv. Nakon eksportiranja raster je automatski dodan u prozor sadržaja. Zadnji korak u uređivanju karte pojedinog elementa je rezanje rastera prema obliku poligona područja istraživanja, napravljenog u *ArcMap*-u. Klikom na *Analysis > Tools* otvara se *Geoprocessing* prozor u kojemu se pomoću trake pretraživanja odabire alat *Clip Raster*. Klikom na alat otvara se prozor u kojemu se odabiru postavke oblikovanja rastera (slika 5-11). Odabire se raster i poligon prema kojemu se raster oblikuje – *Output Extent*. Potrebno je označiti rubriku *Use Input Features for Clipping Geometry*.



Slika 5-11. Postavke oblikovanja pojedinog rastera.

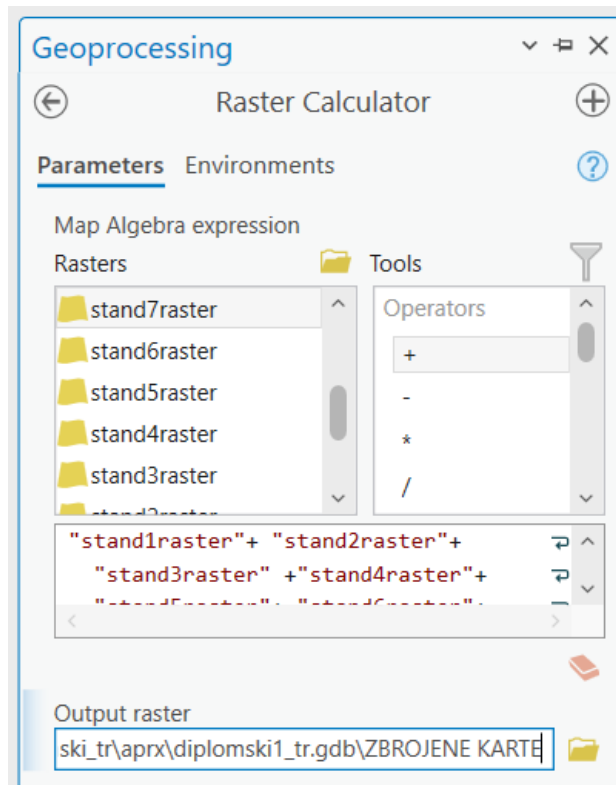
Deset karata, dobivenih za pojedine elemente, potrebno je normalizirati u svrhu boljeg uspoređivanja i konačno njihovog zbrajanja. Klikom na *Analysis > Tools > Standardize Field* otvara se alat za standardizaciju, pri čemu je odabrana metoda *Minimum-maximum*. U rubrici *Input Table* odabire se sloj *Desetorka*, maksimalna vrijednost je 1, a minimalna 0 (slika 5-12).

U atributnoj tablici *Desetorka* tada će se dodati stupci *STAND 1-10*, čije su vrijednosti standardizirane vrijednosti pripadajućeg stupca koncentracije pojedinog elementa.



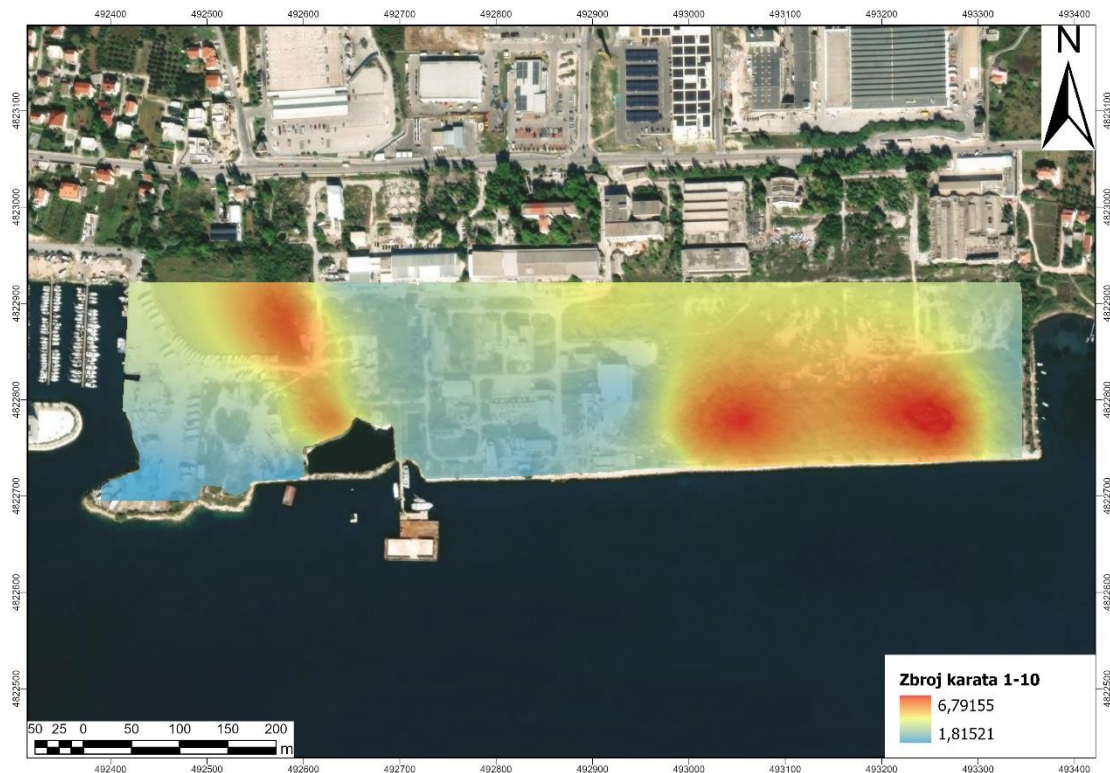
Slika 5-12. Standardizacija rastera Standardize Field alatom.

Novonastale standardizirane vrijednosti koriste se za izradu novih interpoliranih karata, istim postupkom kao i za izvorne vrijednosti (slike 5-8. – 5-11). Zadnji korak u obradi podataka predstavlja zbrajanje svih 10 interpolacijskih karata normaliziranih vrijednosti. Zbrajanje se radi klikom na *Analysis > Tools > Raster Calculator*. Odabiru se željeni rasteri i odgovarajući operator (+), te se odabire mapa za pohranjivanje i naziv izlaznog, zbrojenog rastera (Slika 5-13).



Slika 5-13. Zbrajanje rastera Raster Calculator alatom.

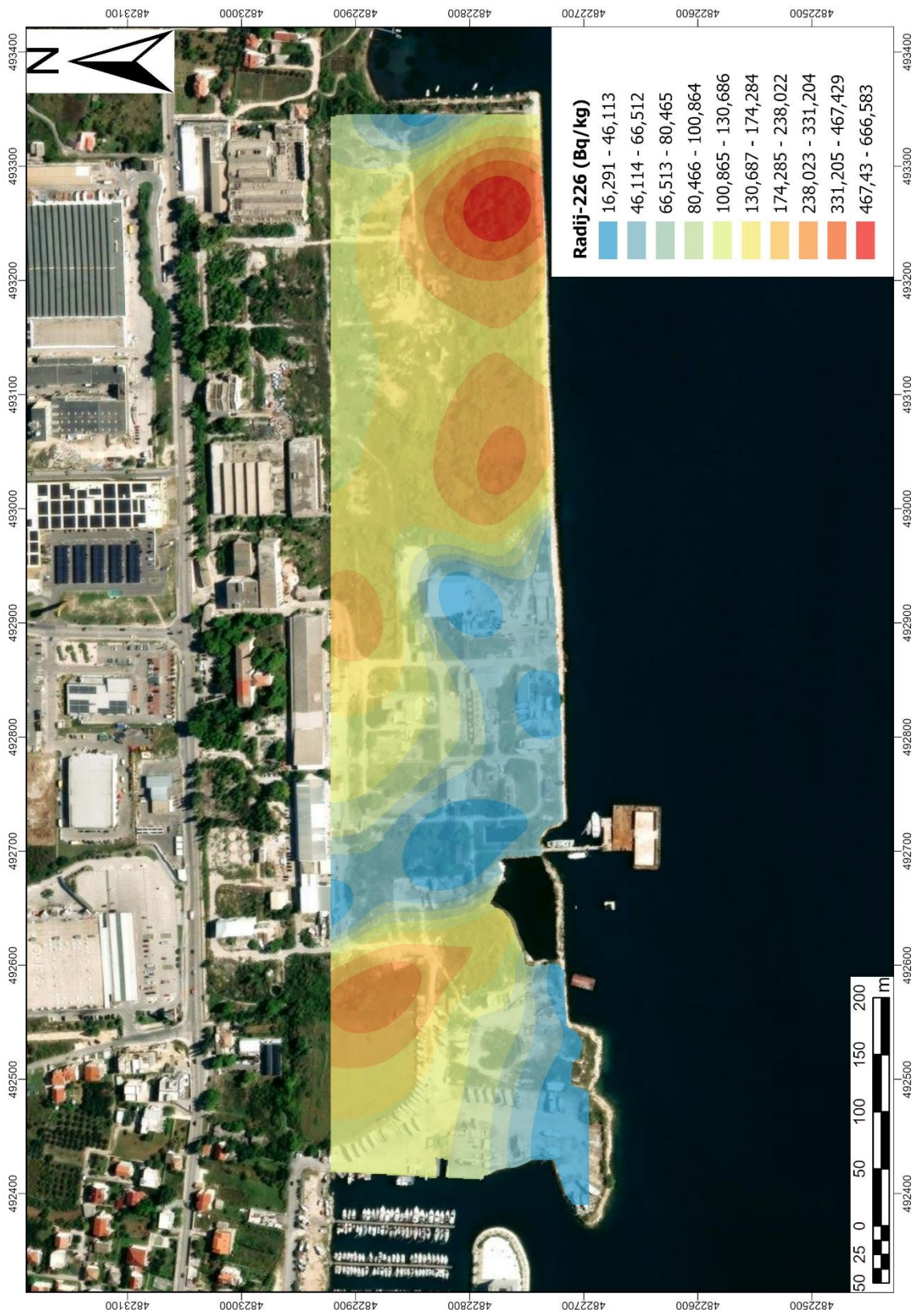
Završna karta dobivena svim dosad opisanim postupcima prikazana je na slici 5-14.



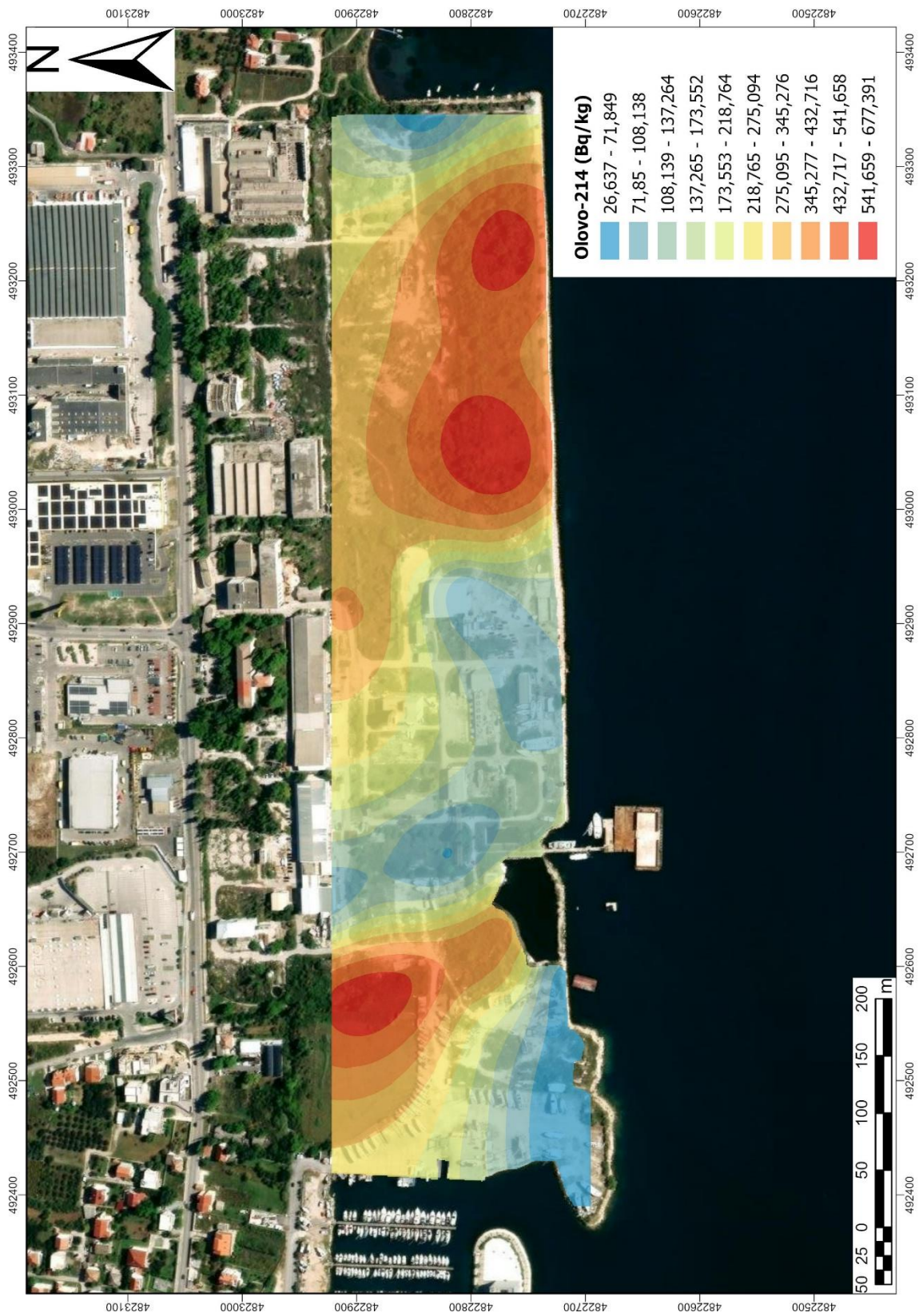
Slika 5-14. Karta zbroja koncentracija svih elemenata.

6. REZULTATI I RASPRAVA

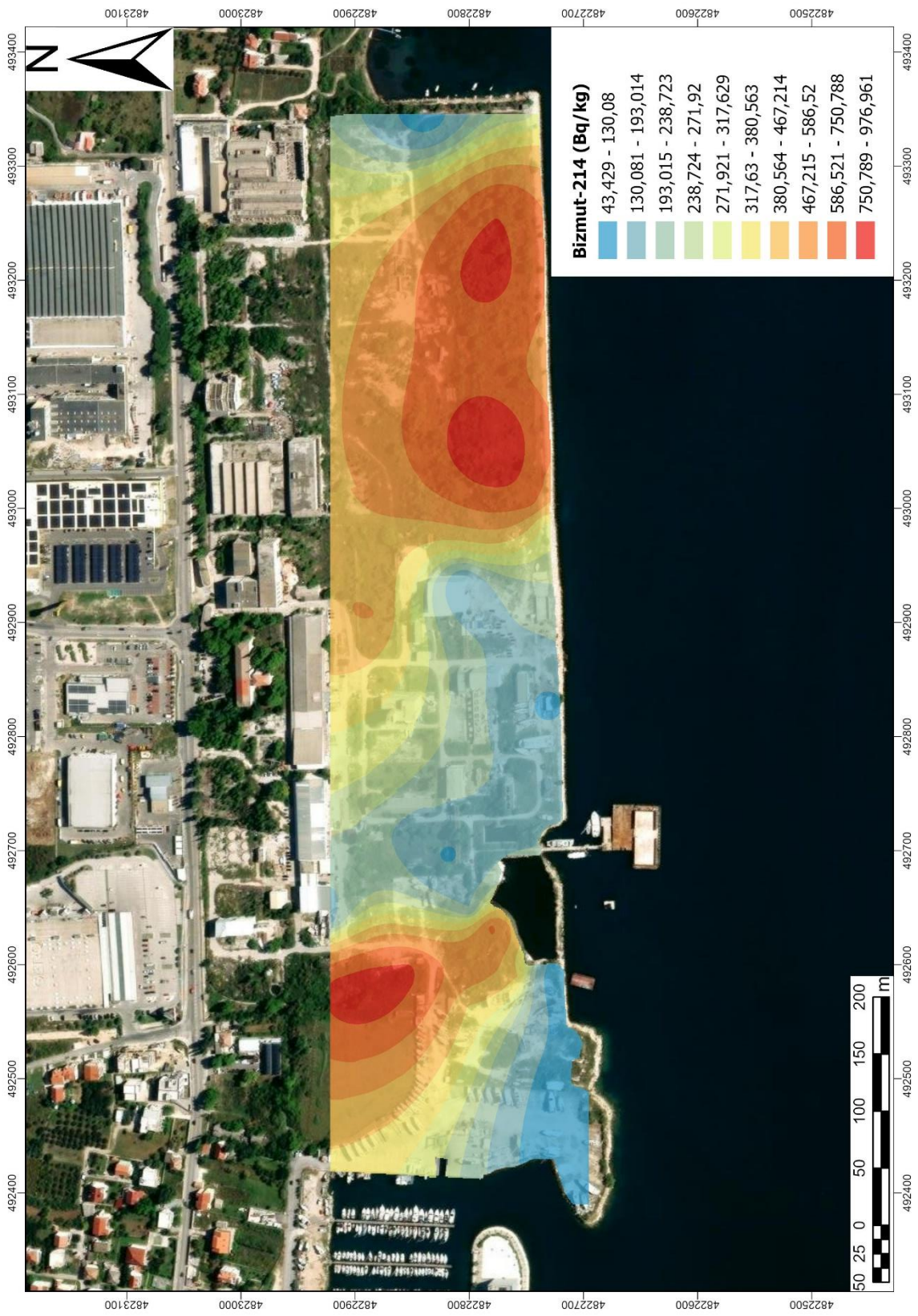
Na idućim slikama prikazane su interpolacijske karte koncentracije deset elemenata uzorkovanih na području istraživanja. Na slikama se uočava raspodjela koncentracija u okviru promjene boje na karti, gdje crvene do žute boje označavaju višu koncentraciju, a plava boja označava nižu koncentraciju danog elementa. Vrijednosti su na svakoj karti i brojčano prikazane na priloženoj legendi.



Slika 6-1. Interpolacijska karta koncentracije radija-226.



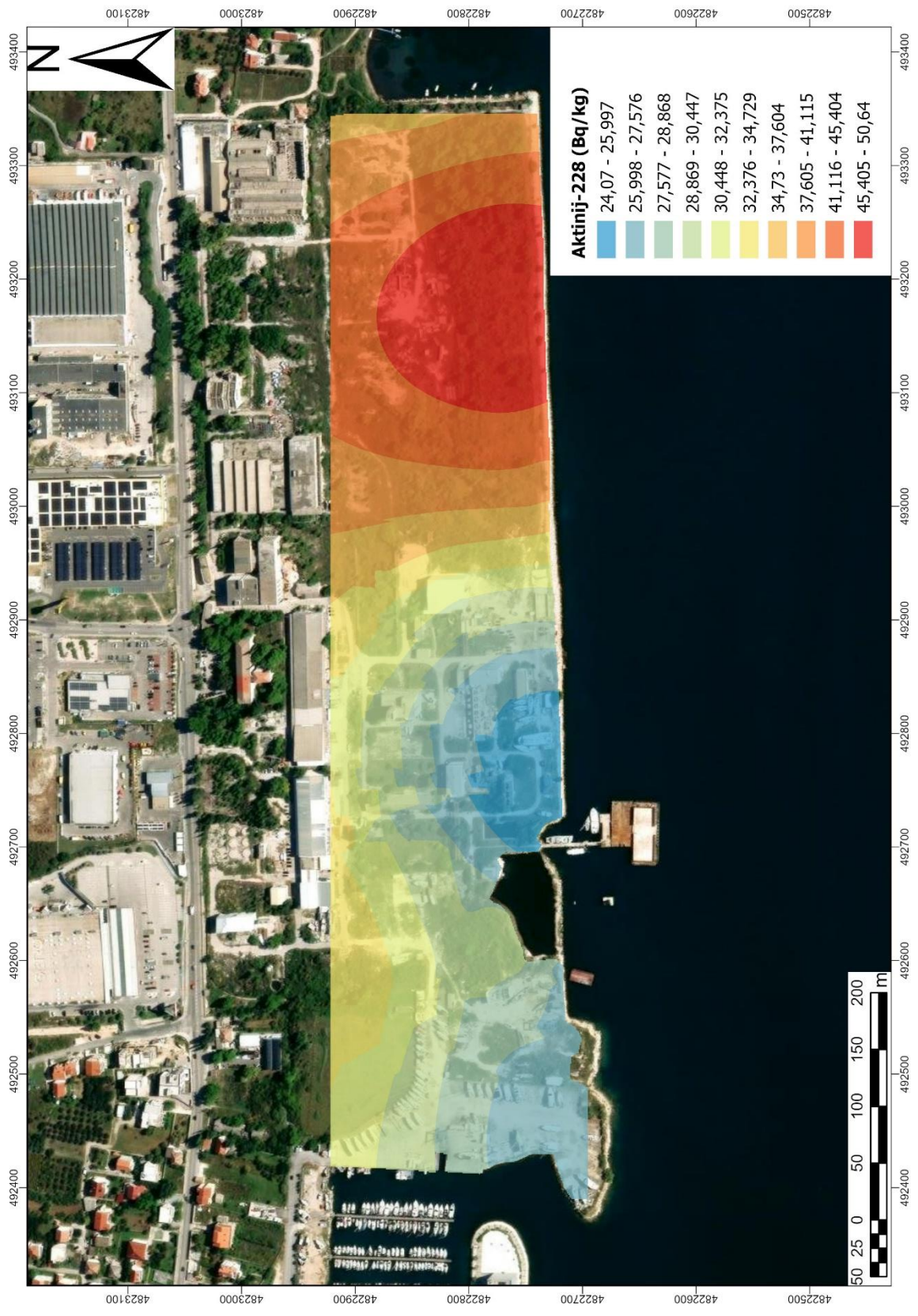
Slika 6-2. Interpolacijska karta koncentracije olova-214.



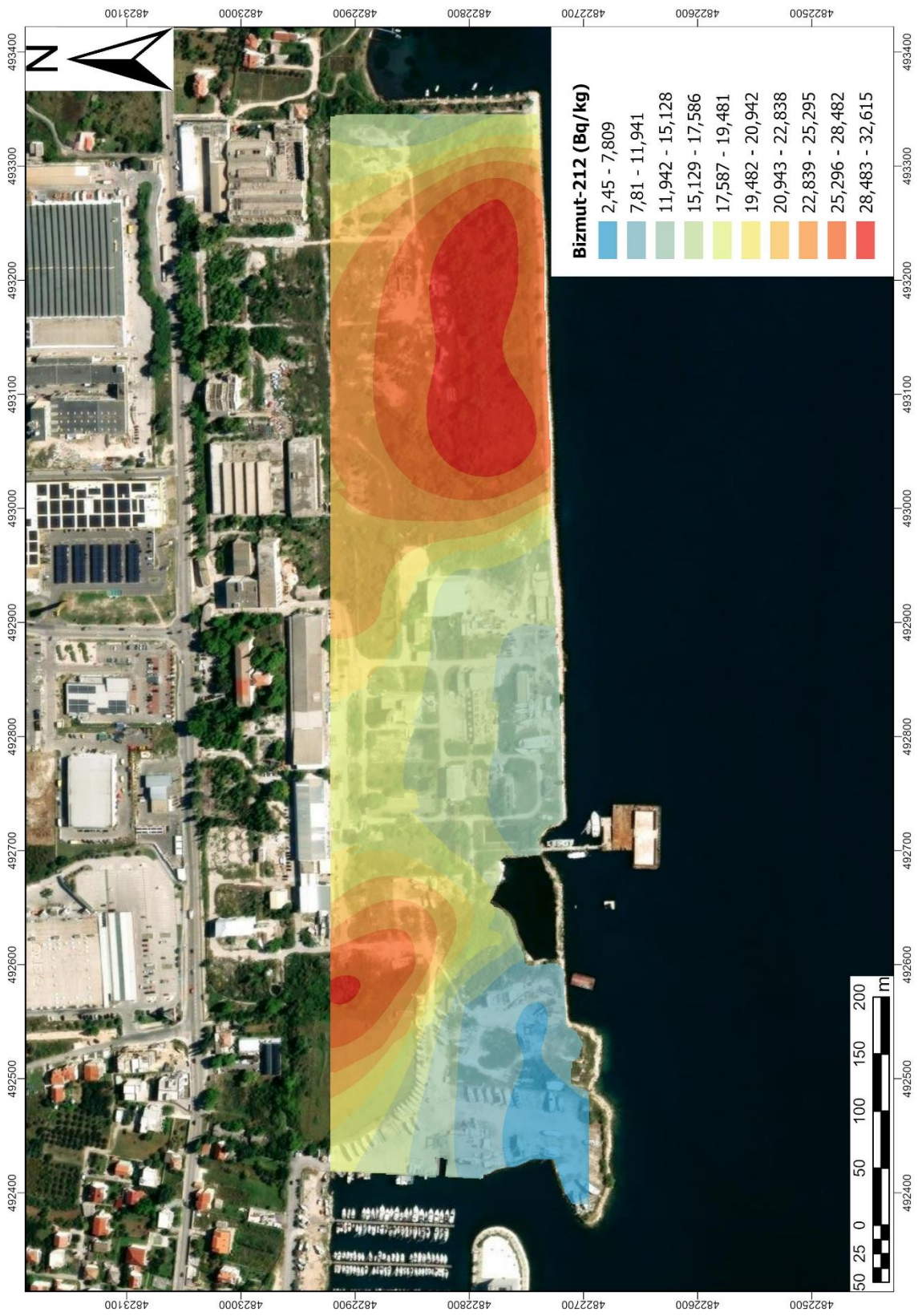
Slika 6-3. Interpolacijska karta koncentracije bizmuta-214.

²²⁶Radij je član uranijskog radioaktivnog niza (slika 2-1). Peti po redu radionuklid u nizu, nastaje raspadom ²³⁰Torija i s vlastitim vremenom poluraspada od 1600 godina prelazi u ²²²Radon, prilikom čega emitira alfa zračenje. ²²⁶Radij je prirodno prisutan u svim stijinama i tlima u različitim količinama (Paschoa i Steinhäusler, 2010).

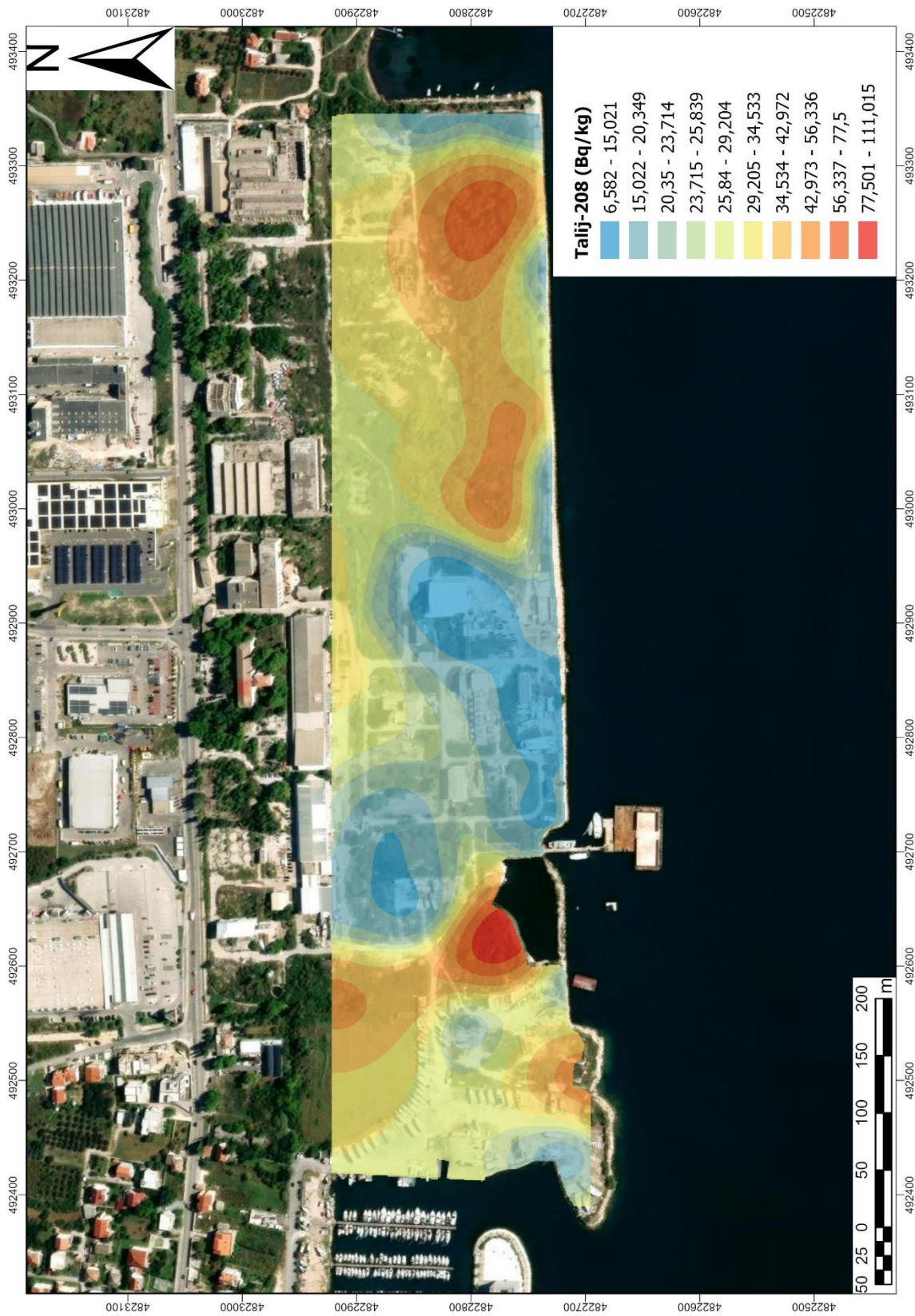
²¹⁴Olovo je osmi član uranijskog niza, nastaje raspadom ²¹⁸Polonija te s relativno kratkim vremenom poluraspada od 27 minuta, prelazi u ²¹⁴Bizmut koji nakon 19.7 minuta prelazi u ²¹⁴Polonij. Svojim poluraspadom ²¹⁴Olovo i ²¹⁴Bizmut oslobađaju beta zračenje (slika 2-1). Za sve susjedne radionuklide koji su članovi istog radioaktivnog niza, kao što su u ovom slučaju ²¹⁴Olovo i ²¹⁴Bizmut, može se očekivati negativna korelacija (tablica 6-2). Zbog prirode radioaktivnog raspada, količina ²¹⁴Bizmuta, prisutna u danom trenutku, točno je određena postojećom količinom ²¹⁴Olova koje se može u njega raspasti. To stvara inverzni odnos količine susjednih izotopa u radioaktivnom nizu. Kako se količina ²¹⁴Olova smanjuje njegovim poluraspadom, povećava se količina ²¹⁴Bizmuta jer je proizvod tog raspada. Unatoč opisanom odnosu, na interpolacijskim kartama moguće je opaziti da su povišene koncentracije oba izotopa rasprostranjene su na isti način (slike 6-2. i 6-3). Sličnu raspodjelu koncentracije može se zapaziti i na karti koncentracije ²²⁶Radija, s devijacijom u zapadnom kraju područja zone D (slika 6-1). Uzrok iste raspodjele je to što sva tri izotopa dijele isti izvor: pepeo ugljena povišene koncentracije uranija, čijim su poluraspadom nastali.



Slika 6-4. Interpolacijska karta koncentracije aktinija-228.



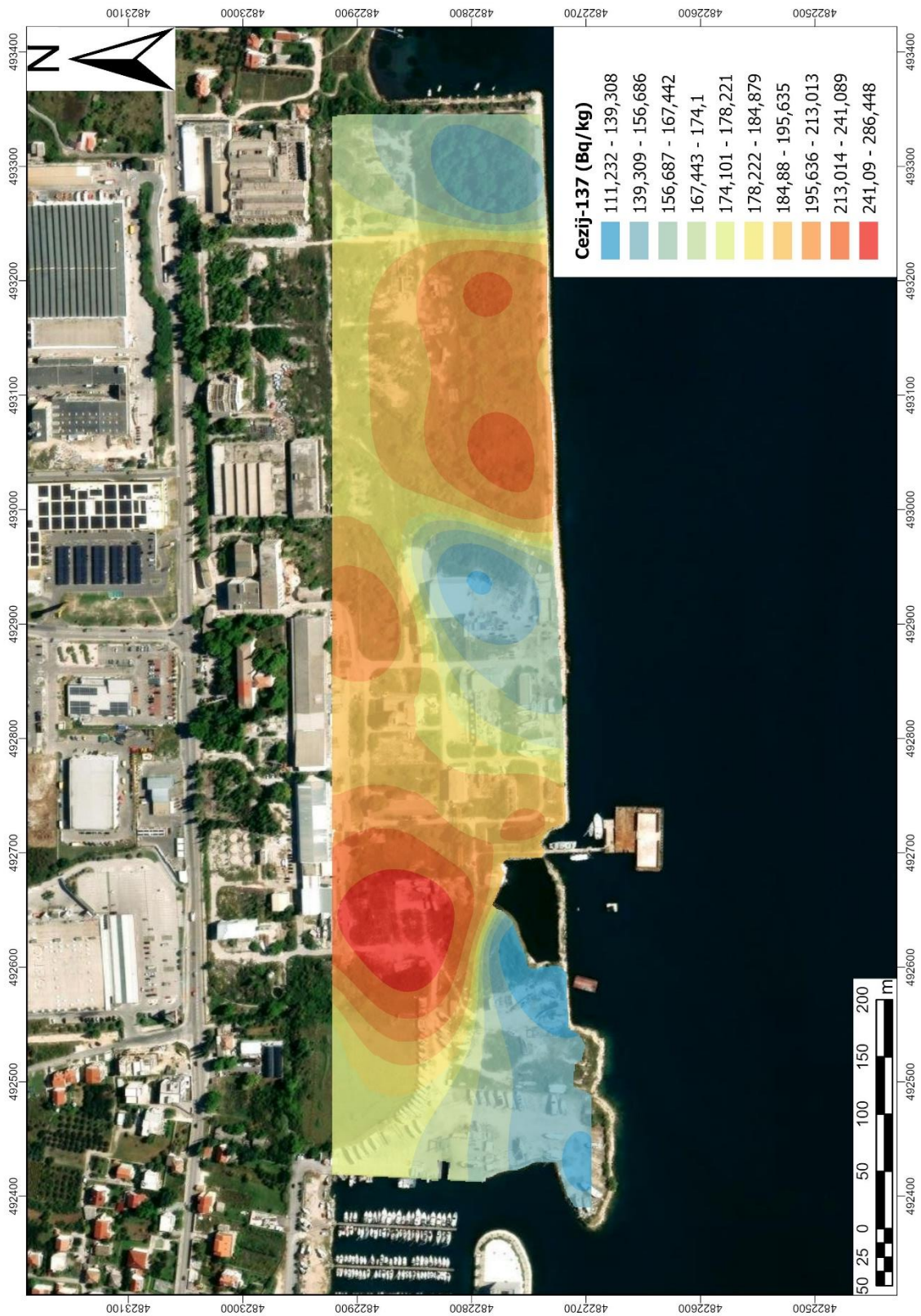
Slika 6-5. Interpolacijska karta koncentracije bizmuta-212.



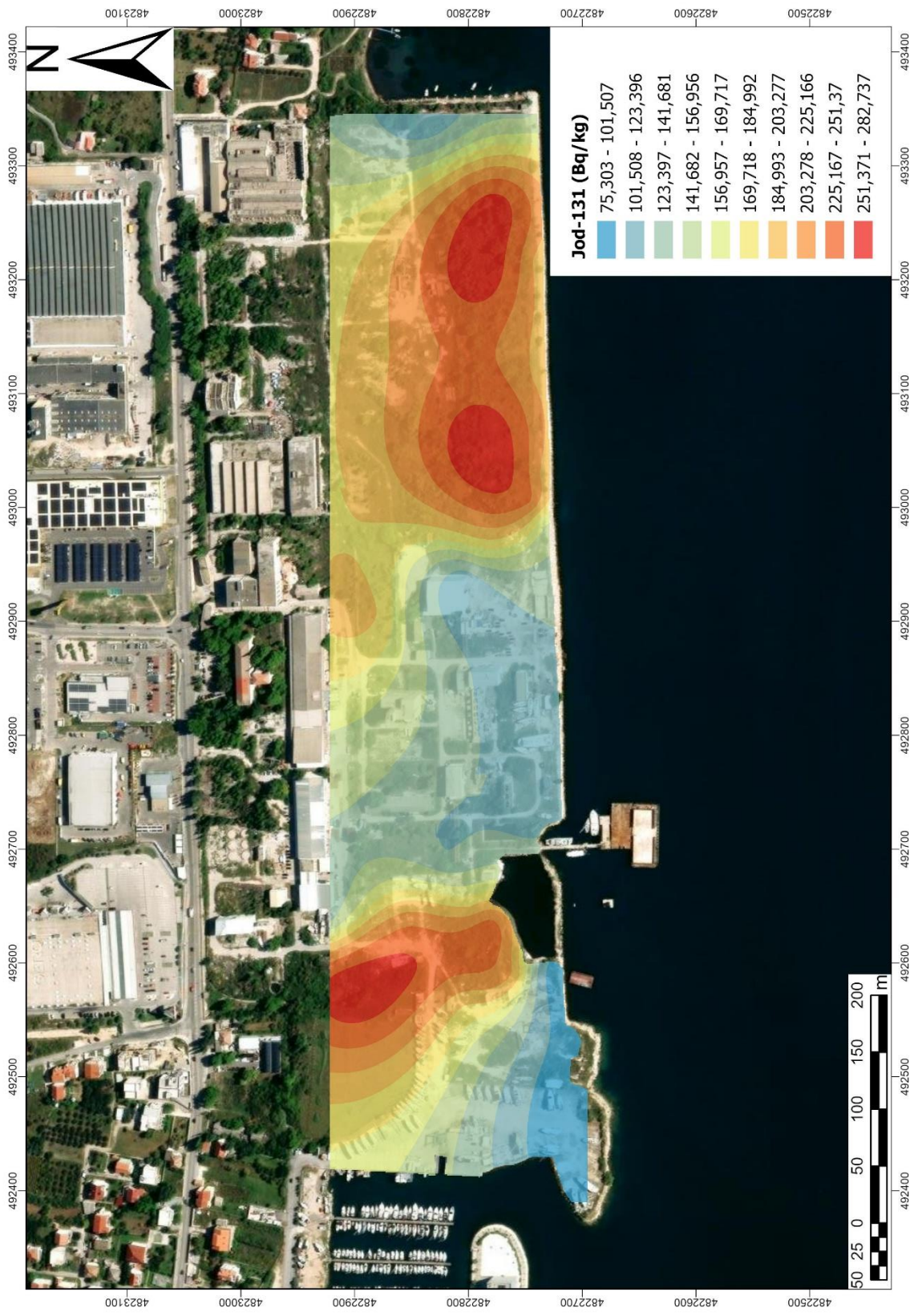
Slika 6-6. Interpolacijska karta koncentracije talija-208.

$^{228}\text{Aktinij}$ je član torijskog niza. Kao treći član nastaje raspadom $^{228}\text{Radija}$, te ima vrijeme poluraspada od 6 sati, nakon čega se raspada u $^{228}\text{Torij}$ prilikom čega se emitira beta zračenje (slika 2-1). Aktinij se u prirodi nalazi kao element u tragovima u rudama uranija i torija – u rudi koja sadrži uranij biti će prisutan izotop $^{227}\text{Aktinija}$, dok se $^{228}\text{Aktinij}$ pronalazi u rudama torija, koje po jednoj toni torija sadrže oko pet nanograma $^{228}\text{Aktinija}$.

$^{212}\text{Bizmut}$ je deveti član torijskog niza, nastaje beta raspadom $^{212}\text{Olova}$. $^{212}\text{Bizmut}$ ima vrijeme poluraspada od 60 minuta, nakon kojih prelazi u $^{208}\text{Talij}$ i oslobađa alfa zračenje (slika 2-1). Povišene koncentracije navedenih izotopa opažaju se u zonama A, Bmt i D. Zona A – lokacija stare deponije rudne jalovine, Bmt – područje očišćeno tijekom sanacije 1973. godine i D – područja s vjerojatnom akumulacijom pepela, bivša taložnica od posebnog interesa za istraživanje jer se na toj lokaciji skladištio pepeo i šljaka dobiveni iz ugljena korištenog u termoelektrani (slike 6-4., 6-5. i 6-6).



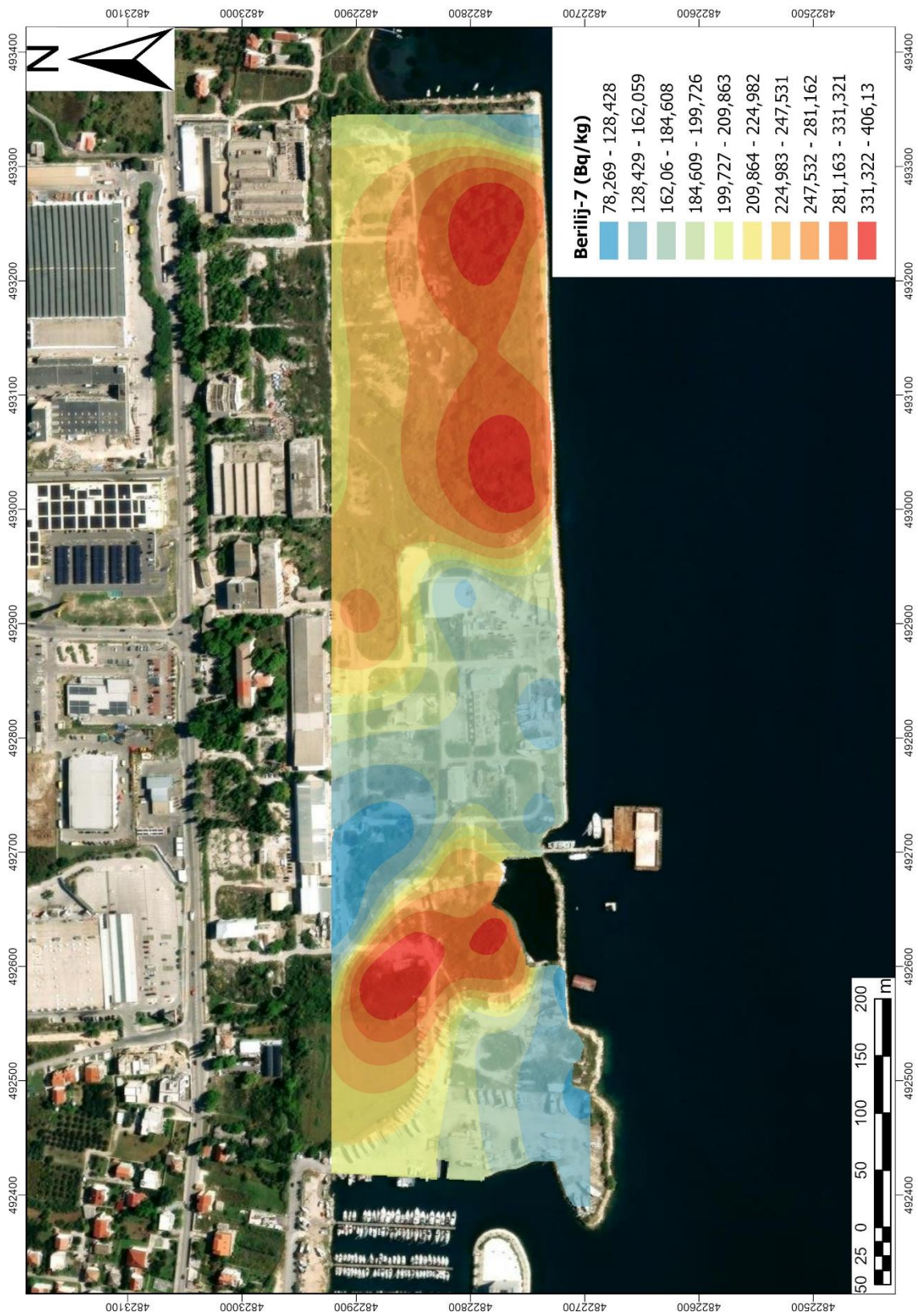
Slika 6-7. Interpolacijska karta koncentracije cezija-137.



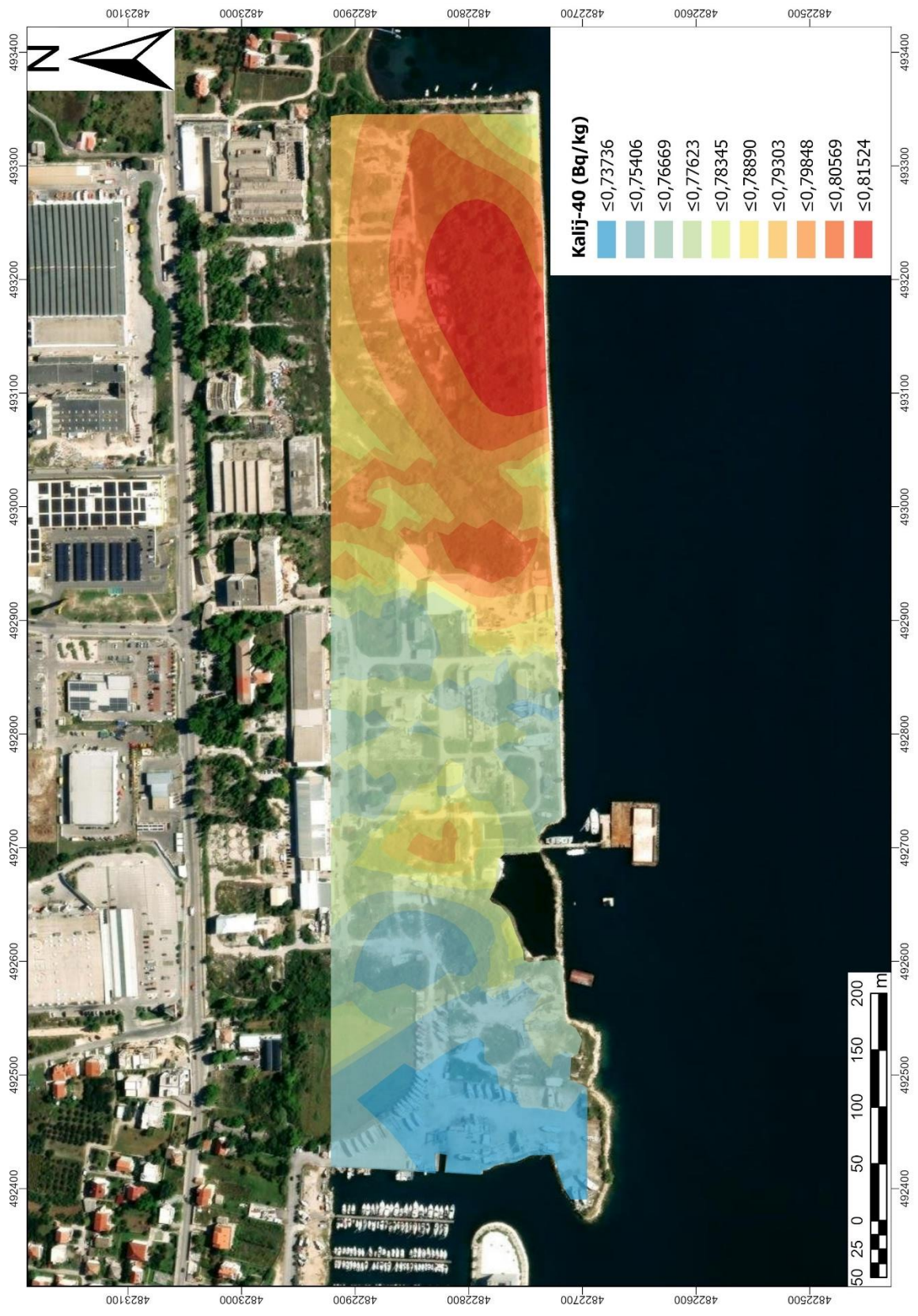
Slika 6-8. Interpolacijska karta koncentracije joda-131.

Prirodna proizvodnja ^{137}Cs spontanom fisijom ne uzrokuje značajna prirodne koncentracije u okolišu zbog svojeg relativno kratkog vremena poluraspada. Međutim, antropogeni ^{137}Cs ispušten nakon nesreće u Černobilu bio je raširen po cijeloj Europi i mogao se detektirati na cijeloj sjevernoj hemisferi. Zbog troposferskog transporta i snažnog utjecaja vremenskih uvjeta utjecaj nesreće bio je nehomogen nad Europom (UNSCEAR, 2000).

Usljed složene meteorološke situacije koja se zadržala nakon nesreće i relativno duge izloženosti reaktora atmosferi, radioaktivni materijali taloženi su na velikom području. U blizini elektrane taloženi su grafit i čestice iz uništenog reaktora, dok su sitnije čestice pronađene na znatnoj udaljenosti od izvorišta. Ovisno o prevladavajućem smjeru vjetra i padalinama u tjednima neposredno nakon nesreće, hlapljivi proizvodi kao što su ^{131}Jod (vremenom poluraspada od osam dana) i dugoživi $^{137}\text{Cezij}$ (oko 30 godina) bili su rašireni tisućama kilometara (Izrael et al., 1996). ^{131}Jod je umjetno proizveden fisijom $^{235}\text{Uranija}$ tijekom detoniranja nuklearnog oružja, nadzemnih nuklearnih testiranja i radom nuklearnog reaktora. ^{131}Jod nalazi se u tokovima plinovitog i tekućeg otpada nuklearnih elektrana, ali se ne ispušta u okoliš tijekom normalnog rada reaktora. Izgledno je da su koncentracije navedenih izotopa kartirane na slikama 6-7. i 6-8. porijeklom antropogeni.



Slika 6-9. Interpolacijska karta koncentracije berilija-7.



Slika 6-10. Interpolacijska karta koncentracije kalija-40.

⁷Berilij nastaje u atmosferi reakcijom između kozmičkih zraka (eng. high energy protons) i atoma prisutnih u atmosferi u plinovitom stanju, kao što su kisik i dušik. Nakon relativno kratkog vremena poluraspada od oko 53 dana, ⁷Be se raspada u ⁷Litij (Bolle et al., 1982). Nakon formiranja, ⁷Be se povezuje s prisutnim aerosolima te se putem kondenzacije i oborina taloži na površinu Zemlje, nakon čega se brzo apsorbira u čestice tla (Taylor et al., 2019). Raspodjela koncentracija ⁷Be prikazana je na slici 6-9.

⁴⁰Kalij je primordijalni radionuklid s vrlo dugim vremenom poluraspada od 1.25 milijardi godina, zbog čega je prisutan u Zemljinoj kori od nastanka planeta. Kao član skupine alkalijskih metala, ⁴⁰Kalij je široko rasprostranjenu okolišu, osobito u hidrosferi gdje čini preko 90% ukupne radioaktivnosti u morskoj vodi. U oko 89,28% slučajeva, ⁴⁰Kalij se raspada na ⁴⁰Kalcij uz emisiju beta zračenja. U oko 10,72% slučajeva raspada se na ⁴⁰Argon, čineći osnovu jedne od najčešće korištenih metoda za datiranje stijena, minerala, meteorita i drugih geoloških materijala (Bolle et al., 1982).

Tablica 6-1. Pearson koeficijenti korelacije elemenata.

Variable	Correlations (Kopija datoteke Samo_bitni_sheetovi_Tonka_Radas1) Marked correlations are significant at p < ,05000 N=33 (Casewise deletion of missing data)									
	Ra226	Pb214	Bi214	Ac228	Bi212	Tl208	K40	Cs137	I131	Be7
Ra226	1,000000	0,748665	0,742149	0,501543	0,656537	0,435646	0,086614	0,014928	0,735781	0,692324
Pb214	0,748665	1,000000	0,991151	0,672385	0,786061	0,481732	0,063128	0,182149	0,936287	0,827448
Bi214	0,742149	0,991151	1,000000	0,680181	0,780945	0,490674	0,094833	0,186051	0,952218	0,837759
Ac228	0,501543	0,672385	0,680181	1,000000	0,488775	0,356165	0,470296	0,193790	0,629776	0,615691
Bi212	0,656537	0,786061	0,780945	0,488775	1,000000	0,317118	0,099729	0,245135	0,773563	0,653662
Tl208	0,435646	0,481732	0,490674	0,356165	0,317118	1,000000	0,171037	-0,359835	0,552962	0,573700
K40	0,086614	0,063128	0,094833	0,470296	0,099729	0,171037	1,000000	-0,053390	0,066803	0,122764
Cs137	0,014928	0,182149	0,186051	0,193790	0,245135	-0,359835	-0,053390	1,000000	0,251654	0,187706
I131	0,735781	0,936287	0,952218	0,629776	0,773563	0,552962	0,066803	0,251654	1,000000	0,884029
Be7	0,692324	0,827448	0,837759	0,615691	0,653662	0,573700	0,122764	0,187706	0,884029	1,000000

7. GOSPODARENJE REZIDUIMA

Prema Strategiji zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (NN 125/14) određene su smjernice za sanaciju lokacija na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali u RH. U dijelu Strategije koji se odnosi na sanaciju lokacija na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali (kao što je bivša tvornica Jugovinil) navodi se da je za takve slučajeve potrebno izraditi cjelovit program sanacije koji uključuje tehnološki sigurna rješenja koja su prihvatljiva za okoliš. Za izradu programa i osiguranje financijskih sredstava potrebnih za sanaciju odgovoran je vlasnik postrojenja.

Prema točki 6.8. Strategije, područje bivše tvornice Jugovinil mora biti pod regulatornim nadzorom. Za sanaciju područja ne treba planirati nikakva dodatna ili nova skladišta ili odlagališta na drugim lokacijama, ali ju je obavezno provoditi u skladu sa sigurnosnim standardima za zaštitu od zračenja i zaštitu okoliša prema zahtjevima Zakona i Direktive 2013/59. Namjena lokacija na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali i programi sanacije moraju biti usklađeni s rezultatima odgovarajućih analiza rizika za zdravlje ljudi i okoliš (NN 125/14). U 2020. godini Ravnateljstvo civilne zaštite, Ministarstva unutarnjih poslova Republike Hrvatske odobrilo je Plan sanacije prema kojemu će se ista provesti u okviru izgradnje luke nautičkog turizma, a za kojeg će se provesti postupak Procjene utjecaja na okoliš (Eko Invest, 2020).

Također, prilikom izrade programa sanacije potrebno je razmotriti mogućnost ponovne upotrebe onih prirodnih radioaktivnih materijala koji se mogu osloboditi regulatornog nadzora. Dobar primjer ponovne upotrebe materijala je korištenje nastalog pepela i šljake za proizvodnju građevinskog materijala. Tako se optimizira zbrinjavanje nusproizvoda njihovom ponovnom upotrebom. Radioaktivnost navedenih prirodnih radioaktivnih materijala koji se mogu koristiti kao sirovina u građevinskoj industriji treba pratiti u skladu s Pravilnikom o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu (NN 121/13) (Veinović et al., 2019).

8. ZAKLJUČAK

Istraživanje područja bivše tvornice Jugovinil u Kaštelanskom zaljevu pokazalo je da su industrijske aktivnosti, osobito rad termoelektrane na ugljen, rezultirale povišenim koncentracijama prirodnih radionuklida. Ugljen korišten za rad termoelektrane bio je bogat prirodnim radionuklidima poput uranija i torija, čijim raspadom mogu nastati svi prirodni radionuklidi njihovih nizova raspada. Otpadni materijali kao što su šljaka i pepeo, akumulirali su se u blizini tvornice, a sadržana koncentracija radionuklida dodatno je porasla kroz proces sagorijevanja. Tijekom sanacije 1973. ti materijali su premješteni na drugu lokaciju, no povišena radioaktivnost ostavila je tragove u određenim zonama istraživanja. Osim prirodnih izvora, istraživanje je također otkrilo prisutnost antropogenih izotopa, poput $^{137}\text{Cezija}$ i $^{131}\text{Joda}$, koji su povezani sa događajima poput nesreće u Černobilu i nuklearnog testiranja. Ovi izotopi proširili su se atmosferskim putem te su detektirani u manjim koncentracijama na analiziranom području. Kartiranje raspodjele koncentracija radionuklida omogućilo je bolje razumijevanje mogućih izvorišta zagađenja. Primjenom geostatističke metode *Empirical Bayesian Kriging* (EBK), dobivene su interpolacijske karte deset elemenata koji dijele zajedničke žarišne točke u zonama A, Bmt i D. Zona A bila je lokacija stare deponije rudne jalovine, na koju se 70-ih godina deponirao i otpad iz zone C. Zona Bmt označava područje koje je očišćeno od deponiranog otpada tijekom sanacije 1973. godine, dok je zona D lokacija bivše taložnice u kojoj se akumulirali pepeo i šljaka iz termoelektrane. Nad lokacijama sa zabilježenim povišenim koncentracijama prirodnih radionuklida potrebno je provoditi regulatorni nadzor i cjelovit program sanacije prilikom čega su dobivene karte dobar pokazatelj na područja od posebnog interesa.

9. LITERATURA

Web izvor 1: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA (2022): Nuclear Safety and Security Glossary, Non-serial Publications , IAEA, Vienna
URL: <https://doi.org/10.61092/iaea.rrxi-t56z>

Web izvor 2: ESRI , URL: [Empirical Bayesian Kriging \(Geostatistical Analyst\)—ArcGIS Pro | Documentation](#)

Web izvor 3: URL: [Zbog radioaktivne šljake bivšeg Jugovinila, Kaštel Sućurac je jedna od 9 crnih ekoloških točaka | Dalmatinski portal](#)

FRANCIS A.J., NANCHARIAH Y.V. 2015. In situ and ex situ bioremediation of radionuclide-contaminated soils at nuclear and norm sites, In Woodhead Publishing Series in Energy, Environmental Remediation and Restoration of Contaminated Nuclear and Norm Sites, str. 185-236.

PASCHOA A.S., STEINHAUSLER F. 2010. Radioactivity in the Environment, Chapter 3: Terrestrial, Atmospheric, and Aquatic Natural Radioactivity, Vol. 17, Elsevier, str 29-85.

BOLLE H. J., FUKAI R., de LEEUV J.W., van der PLOEG S.W.F., ROSSWALL T., SCHENCK P.A. i YOKOYAMA Y. 1982. Natural radionuclides in the environment. The Natural Environment and the Biogeochemical Cycles, Vol. 1, Springer, str 47-60.

EKO INVEST d.o.o. društvo s ograničenom odgovornošću za inženjering, organizacijske i tehološke usluge 2020. Plan sanacije pri privođenju namjeni prema prostornom planu lokacije uređene deponije pepela i šljake na prostoru bivše tvornice “Jugovinil“.

IMI i FZOEU 2011. Provedba radioloških istraživanja u Gradu Kaštela na lokaciji bivše tvornice Jugovinil i okolini - završno izvješće projekta - svezak I. Elaborat.

IZRAEL, Y. A., De CORT, M., JONES, A. R., NAZAROV, I. M., FRIDMAN, S. D., KVASNIKOVA, E. V. i TSATUROV, Y. 1996. The atlas of cesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident.

KOVLER, K., FRIEDMANN, H., MICHALIK, B., SCHROEYERS, W., TSAPALOV, A., ANTROPOV, S., BITUH T., NICOLAIDES D. 2017. Basic aspects of natural radioactivity, Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction, Woodhead publishing, str. 13-36.

LOVRENČIĆ, I., OREŠČANIN, V., BARISIĆ, D., MIKELIĆ, L., ROŽMARIĆ-MAČEFAT, M., LULIĆ, S., PAVLOVIĆ, G. 2005. Characterization of tenorm and sediments of Kastela

bay and the influence of tenorm on the quality of sediments. In Proceedings of the International Conference on Environmental Science and Technology, str. 891-896.

M.I. OJOVAN i W.E. LEE 2005. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation, Chapter 2 - Nuclear Decay, str 9.-21.

OREŠČANIN V., BARIŠIĆ D., LOVRENČIĆ I., MIKELIĆ L., ROŽMARIĆ-MAČEFAT M., PAVLOVIĆ G., LULIĆ S. 2005. The influence of fly and bottom ash deposition on the quality of Kastela Bay sediments. Zagreb: Institut Ruđer Bošković, Laboratorij za radioekologiju, Environmental Geology, 49, 53-64

KOVACS, T., BATOR, G., SCHROEYERS, W., LABRINCHA, J., PUERTAS, F., HEGEDUS, M. i DOHERTY, R. 2017. From raw materials to NORM by-products. In Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction, Woodhead Publishing, str. 135-182.

A. TAYLOR, W.H. BLAKE, A.R. IURIAN, G.E. MILLWARD, L. MABIT 2019. The Use of Be-7 as a Soil and Sediment Tracer. In: Mabit, L., Blake, W. (eds) Assessing Recent Soil Erosion Rates through the Use of Beryllium-7 (Be-7), Springer, str 1.-13.

VEINOVIĆ Ž., PRLIĆ I., KUJUNDŽIĆ T., SURIĆ MIHIĆ M., PERKOVIĆ D., DOMITROVIĆ D., KORMAN T., MOSTEČAK A., UROIĆ G. 2020. Gospodarenje reziduima u okviru Nacionalnog programa provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva Republike Hrvatske, Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske 69.3-4, str. 163-174.

Narodne novine, Pravilnik o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu, NN 121/13, 2013. Zagreb: Narodne novine d.d.

Narodne novine, Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, NN 125/14, 2014. Zagreb: Narodne novine d.d.