

Integriran pristop k remediaciji kompleksno onesnaženih tal vojaških območij: Razvoj inovativne tehnologije za odstranjevanje eksplozivov, težkih kovin in kovinskih fragmentov

Šifra projekta:	V1-2537
Tip projekta:	ARIS
Vrsta projekta in tematski sklop:	Ciljni raziskovalni program »CRP«, Varna in globalno odgovorna Slovenija
Trajanje:	1.9.2025 – 31.8.2027
Financer:	ARIS MO (Ministrstvo za obrambo)
Vrednost (so)financiranja:	50 % ARIS 50 % MORS
Skupna vrednost projekta:	200.000 EUR
Nosilec projekta:	Anela Kaurin

Sestava projektne skupine

[Dr. Anela Kaurin](#) – vodja projekta

[Dr. Grega E. Voglar](#) – raziskovalec

[Dr. Simon Gluhar](#) – raziskovalec



Vsebinski opis projekta

Onesnaženje tal s težkimi kovinami in organskimi onesnažili predstavlja enega najtežjih okoljskih izzivov na vojaških poligonih. Vojaške dejavnosti, kot so izvajanje vaj in uničevanje neeksplodiranih ubojnih sredstev, povzročajo kopičenje toksičnih snovi v tleh. Ker se vojaški poligoni običajno uporabljajo več desetletij, vsaka nova aktivnost prispeva k skupnemu povečanju onesnaženosti. Metoda odprte detonacije je običajna praksa za uničevanje nestabilnega streliva, min, eksplozivov in neeksplodiranih ubojnih sredstev. Za uničevanje nestabilnega streliva in min se najpogosteje uporablja 2,4,6-trinitrotoluen (TNT), heksahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (RDX) in oktahidro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocin (HMX). Ti eksplozivi onesnažujejo talne in vodne ekosisteme ter ogrožajo zdravje ljudi.

Onesnaženje tal zaradi vojaških aktivnosti je globalni problem. Kljub neizogibnosti uporabe eksplozivov in orožja v človeški civilizaciji, so trajnostne prakse sanacije ključne za zaščito ekosistemov pred širjenjem onesnaženja. Klasične metode remediacije, kot so izkop, odvoz in nadomestitev onesnaženih tal, stabilizacija onesnažil ter separacija in deponiranje bolj onesnažene frakcije tal, so iz vidika stroškov in trajnosti nesprejemljive.

Dosedanje raziskave so se osredotočale le na sanacijo posamezne vrste onesnažil. Z namenom iskanja okolju prijaznejših remediacijskih metod je bilo narejenih ogromno raziskav. Bioremediacija z naravno prisotnimi mikroorganizmi predstavlja pomembno pot razgradnje eksplozivov, vendar so ti procesi počasni. Stimulacija naravno prisotne mikrobne populacij z dodatkom hranil je lahko učinkovita rešitev za povečanje mikrobne aktivnosti in s tem biorazgradnje eksplozivov. Kemijske metode, z dodajanjem nič valentnega železa, surfaktantov ali oksidacijskih sredstev, so se prav tako izkazale kot učinkovite za razgradnjo eksplozivov. Naštete tehnologije so narejene pretežno v laboratorijskem merilu ali pa zahtevajo ogromno časa in denarja, predvsem pa niso bile razvite v funkcionalne tehnologije. Poleg tega ne omogočajo odstranjevanja težkih kovin in kovinskih fragmentov.

Največ raziskav o remediaciji tal onesnaženih s težkimi kovinami se osredotoča predvsem na strelišča. Najpogosteje uporabljene metode vključujejo zamenjavo tal, mehansko separacijo (sejanje), solidifikacijo/stabilizacijo in pranje tal s kislinami, ki pa niso trajnostne. Razvoj novih, stroškovno učinkovitih in okolju in tloraj prijaznih tehnologij za odstranjevanje onesnažil je kritičnega pomena, tako za Slovensko vojsko kot širše. Z izzivi onesnaženosti tal se namreč soočajo po vsem svetu, ne le na vojaških poligonih ampak tudi na konfliktnih območjih.

Cilji tega projekta so: C1) karakterizacija onesnaženosti tal na območju uničevanja ubojnih sredstev; C2) preučevanje možnosti za odstranjevanje eksplozivov, težkih kovin in kovinskih fragmentov iz tal v laboratorijskem merilu; C3) odstranjevanje eksplozivov, težkih kovin in kovinskih fragmentov v pilotnem merilu – demonstracija funkcionalnosti tehnologije; ter C4) ocena izvedljivosti integrirane tehnologije remediacije za odstranjevanje eksplozivov, težkih kovin in kovinskih fragmentov, revitalizacija očiščenih tal, ter priprava predloga za sanacijo onesnaženega območja.

Cilji projekta je integracija naše patentirane tehnologije ReSoil® za trajnostno odstranjevanje težkih kovin (polkovin) ter kovinskih fragmentov z biološko/kemijskimi tehnologijami odstranjevanja eksplozivov iz onesnaženih tal. Raziskan bo inovativen način integracije različnih kemijskih in bioloških metod v tehnologijo ReSoil®, ki bodo omogočile odstranjevanje eksplozivov. Glavni namen projekta je razviti in



prikazati izvedljivost inovativnega in trajnostnega postopka remediacije, ki bo poleg odstranjevanja težkih kovin in organskih onesnažil s preprostimi ukrepi omogočil tudi revitalizacijo degradiranega območja, kot ključni del novega procesa.

Faze projekta in njihova realizacija

Projekt je sestavljen iz petih delovnih sklopov (DS), ki se dodatno delijo na posamezne naloge (N).

DS1. Ocena stanja onesnaženosti tal na območju uničenja streliva z detonacijo

N1.1 Pregled in pridobivanje podatkov o onesnaženosti (M1-M3)

N1.2 Karakterizacija onesnaženosti tal (M1-M24)

DS2. Odstranjevanje težkih kovin in eksplozivov v laboratorijskem merilu – integracija tehnologij za čiščenje kompleksno onesnaženih tal

N2.1 Odstranjevanje kovin in eksplozivov z bioremediacijo (M1-M12)

N2.2 Odstranjevanje kovin in eksplozivov s kemijskimi metodami (M4-M12)

N2.3 Integracija izbranih tehnologij, optimizacija procesov (M7-M12)

DS3. Prenos tehnologije v pilotno merilo in demonstracija funkcionalnosti

N3.1 Prenos nove integrirane tehnologije v večje merilo (M10-M15)

N3.2 Optimizacija procesov ter demonstracija učinkovitosti (M10-M18)

N3.3 »On-site« demonstracija remediacije, varnost remediranih tal (M10-M21)

N3.4 Post-remediacijski ukrepi revitalizacije ter izboljšave tal (M13-M24)

DS4. Predlog aktivnosti za sanacijo onesnaženega območja

N4.1 Določitev učinkovitosti, časovno in stroškovno vrednotenje (M19-M24)

N4.2 Podroben predlog izvedbe sanacije onesnaženosti (M19-M24)

DS5. Vodenje projekta in diseminacija

N5.1 Vodenje projekta (M1-M24)

N5.2 Poročanje o napredku projekta (M6-M24)

N5.3 Obvladovanje tveganj in zmanjševanje težav (M1-M24)

N5.4 Diseminacija (M13-M24)

