

# Suvremene metode sanacije tla u urbanim sredinama

---

Hrelja, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:452711>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET  
Agroekologija - agroekologija

IVA HRELJA

# **SUVREMENE METODE SANACIJE TLA U URBANIM SREDINAMA**

---

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Ivica Kisić, dipl.ing.agr.

Zagreb, 2016.

Ovaj diplomski rad je ocijenjen i obranjen dana \_\_\_\_\_

s ocjenom \_\_\_\_\_ pred Povjerenstvom u sastavu:

1. prof.dr.sc. Ivica Kisić, dipl.ing.agr. \_\_\_\_\_

2. prof.dr.sc. Marija Bujan \_\_\_\_\_

3. doc.dr.sc. Željka Zgorelec \_\_\_\_\_

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KOGA UKLJUČITI U SANACIJU <i>BROWNFIELD</i> LOKACIJE? .....	3
3. FAZE SANACIJE.....	5
3.1.1. faza – inicijalno istraživanje lokacije .....	5
3.2.2. faza – potpuna procjena stanja lokacije.....	7
3.3.3. faza – identifikacija, evaluacija i odabir metode sanacije .....	7
3.4.4. faza – implementacija odabrane metode .....	8
3.5.5. faza – održavanje i monitoring lokacije .....	8
4. METODE SANACIJE .....	9
4.1. BIOLOŠKE METODE SANACIJE TLA.....	11
Bioprozračivanje .....	11
Bioremedijacija .....	12
Fitoremedijacija.....	13
4.2. FIZIKALNE METODE SANACIJE TLA.....	14
Iskopavanje.....	14
Kapsuliranje .....	15
4.3. KEMIJSKE METODE SANACIJE TLA .....	16
Ispiranje tla.....	16
Solidifikacija .....	17
4.4. TERMALNE METODE SANACIJE TLA.....	18
Spaljivanje.....	18
Toplinska desorpcija .....	19
4.5. METODE SANACIJE VODE .....	20
<i>Pump-and-treat</i> metoda.....	20
Propusna reaktivna barijera .....	21
Prozračivanje ( <i>Air sparging</i> ) .....	22
5. STANJE <i>BROWNFIELDA</i> U HRVATSKOJ.....	23
6. ZAKLJUČAK.....	25
7. POPIS LITERATURE.....	26
8.SAŽETAK.....	28
8.SUMMARY .....	29

---

# 1. UVOD

Većina gradova svijeta suočava se sa znatnim brojem neiskorištenih površina i objekata koje često zauzimaju atraktivne lokacije gradova i narušavaju kvalitetu života a nerijetko i ugrožavaju zdravlje stanovništva zbog različitih stupnjeva kontaminiranosti. Zbog intenzivnog rasta gradova ograničeno je slobodno građevinsko zemljište te se gradovi sve više okreću regeneraciji *brownfield* površina, kreirajući različite programe i strategije za njihovu obnovu. *Brownfield* lokacije kao tema tek su krajem 20. stoljeća zauzele više mjesta u politikama vlada zemalja svijeta, osobito onih koje se suočavaju sa sve većim problemima nedostatka slobodnoga prostora za gradnju (Couch i sur., 2003).

Pojam *brownfield* u širokoj je upotrebi u svijetu, no do danas ne postoji jedinstvena definicija. Međutim, najrasprostranjeniju na području Europe predložila je radna grupa CLARINET (Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies) koja kaže da su *brownfield-i*:

- zapuštena ili u potpunosti neiskorištena zemljišta;
- napušteni, neiskorišteni (u mirovanju) industrijski i trgovački objekti;
- lokacije koje imaju stvarne ili primijećene probleme zagađenja/onečišćenja;
- lokacije koje se nalaze uglavnom u razvijenim urbanim područjima
- lokacije koje zahtijevaju intervenciju da bi ih se ponovo vratilo u upotrebu

Primjeri *brownfielda* su benzinske stanice, tvornice automobila, lijekova, metala, tekstila, kemijska postrojenja, zgrade s azbestnom izolacijom, trafostanice, bivše vojarne itd.

Problem *brownfielda* u zapadnim zemljama rezultat je dvaju istodobnih čimbenika:

- a) brojnih zatvaranja tvornica i smanjenja broja zaposlenih u primarnom sektoru početkom 70-ih godina prošloga stoljeća i
- b) donošenja propisa zaštite okoliša 80-ih koji predviđaju preuzimanje odgovornosti za troškove čišćenja onečišćenih područja (Thorton, 2008).

---

Održivi razvoj *brownfield* lokacija izuzetno je važan te uključuje okolišne, socijalne i ekonomske prednosti. Okolišne prednosti su smanjenje razvoja i pritiska na još neiskorištenim zelenim površinama (poznate i kao *greenfield* lokacije), zaštita javnog zdravlja i sigurnosti, zaštita tla te podzemnih voda. Najčešće socijalne prednosti su za lokalnu zajednicu, kao što su obnova urbanih područja, brisanje stigme i negativne percepcije određenog dijela grada te povećanje sigurnosti. Među ekonomskim prednostima najvažnije su privlačenje domaćih i stranih ulaganja i povećanje vrijednosti i produktivnosti zemljišta (Dixon i sur., 2007).

Sanacija *brownfielda* podrazumijeva upravljanje, rehabilitaciju i povratak na korisnu upotrebu zemljišnih resursa. To bi trebalo biti učinjeno na način da se osigura ostvarivanje i kontinuitet zadovoljavanja ljudskih potreba za sadašnje i buduće generacije na ekološki, ekonomski i društveno prihvatljiv i održiv način (Perović i Kurtović Folić, 2012).

U degradiranim urbanim područjima cilj je razviti ambijent koji će privući nove stanovnike i unaprijediti kvalitetu životne sredine, zbog čega je posebno važno uspostavljanje jasne veze između ekonomskog razvoja i fizičke regeneracije.

U većini slučajeva sanacija *brownfielda* uključuje razne stručnjake, poduzeća i članove zajednice. To je dugotrajan proces koji zahtijeva interdisciplinarnost, dobru organizaciju i razumijevanje svih problema koji proizlaze iz zapuštenih područja u urbanim sredinama.

Ovaj rad bavit će se ključnim čimbenicima koje je potrebno uzeti u obzir kada planiramo sanaciju *brownfielda*. Prikazat će se složenost operacije i metoda te provesti kritička analiza znanstvenih spoznaja iz područja sanacije s osvrtom na stanje *brownfielda* u Hrvatskoj.

---

## 2. KOGA UKLJUČITI U SANACIJU *BROWNFIELD* LOKACIJE?

Prije početka projekta sanacije *brownfield* lokacije, važno je imati jasan plan. Ako postoji jasna slika o svim fazama projekta i smjera u kojem se kreće mogu se izgraditi čvrsti temelji za budućnost. Jednom kada je projekt ušao u fazu planiranja, pojavljuju se brojna pitanja:

- Tko će biti uključen? Koja poduzeća, koje pojedince ili skupine unutar zajednice uključiti te tko će biti članovi projektnog tima?
- Kako će se preliminarni planovi sanacije komunicirati s vlasnicima susjednih nekretnina i lokalnim i državnim dužnosnicima te kako uzeti u obzir ulaganja dionika u promišljanju i redizajniranju strategija za sanaciju i buduću namjenu *brownfielda*?
- Koji su relevantni programi i mogućnosti za podršku za financiranje, osiguranje i troškova sanacije lokacija? (Hollander i sur., 2010).

U uvodu je već spomenuto da je sanacija dugotrajan proces koji zahtijeva interdisciplinarnost, dobru organizaciju i razumijevanje problema. Stoga je logično da je u proces uključen cijeli niz visoko kvalificiranih stručnjaka iz područja ekonomije, prava, građevinarstva, arhitekture, zaštite okoliša i tloznanstva. Jedan hipotetski tim mogao bi se sadržavati od:

- vodeće tvrtke ili organizacije
- voditelja projekta i asistenta voditelja projekta
- lokalnog i/ili državnog poduzeća
- inženjera zaštite okoliša
- pravnika
- konzultanta za zaštitu okoliša
- arhitekta
- krajobraznog arhitekta
- izvođača radova

Također bi bilo korisno uključiti i ostale dionike poput davatelja bespovratnih sredstava, lokalnu zajednicu, neprofitne organizacije te lokalne političare.

---

Prirodni procesi i sustavne promjene koji se događaju na *brownfield* lokacijama dovode do onečišćenja tla. Daljnji razvoj ovih područja može se postići jedino integriranjem okolišnog, ekonomskog i prostornog planiranja kojeg podržavaju svi navedeni akteri. Nekoliko europskih zemalja pružaju određene smjernice za dijelove tog procesa, uglavnom za procjenu onečišćenja (Caracas, 1998). Proces se temelji na integriranom pristupu kako bi se identificirali:

- rizici za ljude i okoliš od strane lokacije u svojem sadašnjem stanju
- ograničenja i mogućnosti buduće namjene zemljišta
- zgrade, objekti i materijali koji bi bile korisne i koje bi se mogle iskoristiti u sanaciji

Analiza prikupljenih podataka omogućuje utvrđivanje mogućih ograničenja i mogućnosti prenamjene. Ona se koristi kako bi se omogućio razvoj, planiranje i priprema generalnog troškovnika te prikupljanje potrebne dokumentacije, radnih i uporabnih dozvola (CLARINET, 2002).

Napokon, i angažiranje te informiranje zajednice od početka projekta od velike je važnosti. Ljudi žele znati što se događa u njihovom susjedstvu. Ovisno o mjestu, zajednica može ili ne mora biti uključena. Međutim, oni bi trebali biti dobili priliku da doznaju što se događa i iznijeti svoja pitanja ili nedoumice (Hollander i sur., 2010).



---

## 3. FAZE SANACIJE

Informacije o lokaciji s obzirom na mjesto, koncentraciju i stupanj onečišćenja pripremaju i analiziraju stručnjaci za zaštitu okoliša. Njihov rad uključuje prikupljanje informacija o potencijalnim onečišćujućim tvarima putem uzorkovanja i analiza, praćenja bunara, *screening* metoda, geofizičkih tehnika, tehnika daljinskih istraživanja i laboratorijskih analiza te poznavanja povijesti lokacije. Procjena onečišćenja na lokaciji i rješenja za njeno smanjenje ili uklanjanje obično se provodi u sljedećih pet faza:

- 1. faza – inicijalno istraživanje lokacije
- 2. faza – potpuna procjena stanja lokacije
- 3. faza – identifikacija, evaluacija i odabir metode sanacije
- 4. faza – implementacija odabrane metode
- 5. faza – održavanje i monitoring lokacije

### ***3.1.1. faza – inicijalno istraživanje lokacije***

Svrha inicijalnog istraživanja je odrediti prisutnost opasnih tvari na lokaciji prije svega kako bi se izbjegla odgovornost za nastajanje onečišćenja i dodatni troškovi vezani za čišćenje na lokaciji za koju se kasnije utvrdi da je kontaminirana opasnim materijalima (Pitchel, 2007).

Ovisno o sastavu tima, krajobrazni arhitekti ili inženjeri zaštite okoliša istražuju povijest lokacije. To uključuje temeljit izvještaj o postojećoj lokaciji kojem se nalazi topografska karta, zračne fotografije, planovi izgradnje, inženjerski crteži, povijesna istraživanja, dokumenti o osiguranju od požara i poplava, dokumenati o najmu kao i povijesne fotografije lokacije. Ako je moguće, poželjno je intervjuirati sadašnje ili bivše zaposlenike koji su radili na lokaciji kako bi se utvrdile ne samo pojedinosti i aktivnosti proizvodnih procesa, nego i dobile korisne informacije o mjestima nekadašnjih industrijskih procesa (Hollander i sur., 2010).

---

Ključni podaci koji se na ovaj način prikupe su:

- adresa i veličina lokacije
- topografska karta
- broj radnika na gradilištu
- stambene zgrade u fiksnom radijusu
- način korištenja okolnog zemljišta
- ustanove u blizini lokacije
- prirodni resursi u blizini lokacije
- povijest lokacije (poslovanje, način zbrinjavanja otpada)
- uporaba nafte, naftnih derivata i opasnih materijala na lokaciji
- upravljanje otpadom
- okolišne dozvole
- hidrogeološke značajke lokacije, uključujući vrstu tla (poroznost i propusnost)
- uvjeti protoka podzemnih voda
- okoliš i opseg kontaminacije
- putevi migracije i potencijalna izloženost
- procjena za potrebu hitne intervencije za rješavanje onečišćenja koje predstavljaju neposredni zdravstveni problem

---

### **3.2.2. faza – potpuna procjena stanja lokacije**

Pod uvjetom da lokacija udovoljava svim zakonskim uvjetima i ne postoje problemi u prvoj fazi sanacije, slijedi detaljnija, tj. potpuna procjena stanja. U daljnjim *screening* metodama važno je razumjeti vrstu i kvalitetu podataka koji su potrebni kako bi se odabrala najprihvatljivija metoda sanacije. Također, sve podatke dobivene istraživanjima treba pažljivo ocijeniti prije nego što se izvuku zaključci (Hollander i sur., 2010).

Ključni koraci koje u ovoj fazi treba slijediti su:

- detaljnije analizirati sve podatke 1.faze
- donijeti odluku o sudbini i transportu (ako je potrebno) nafte, naftnih derivata i/ ili opasnih materijala
- odrediti prirodu i opseg kontaminacije
- ažuriranje povijesti odlaganja industrijskih otpadnih materijala na lokaciji
- ažuriranje hidrogeoloških karakteristika
- procijeniti razinu izloženosti
- karakterizirati rizik

### **3.3.3. faza – identifikacija, evaluacija i odabir metode sanacije**

Cijeli tim sudjeluje u nastavku aktivnosti koje koordinira voditelj projekta. Ključni koraci u ovoj fazi su sljedeći:

- početni odabir metoda sanacije gdje se odabiru različiti pristupi sanaciji te se za svaki analiziraju troškovi i duljina vremena potrebna za obavljanje svake korektivne aktivnosti
- detaljna analiza metoda koja obuhvaća iscrpnije proračunske tablice i izvješća te ocrtava prednosti i mane svake tehnologije za smanjenje ili uklanjanje onečišćenja, uključujući i uvjete na terenu, učinkovitost tehnologije te pitanja količine buke, prašine i duljine radnog vremena
- izbor optimalne metode sanacije
- priprema akcijskog plana koji ocrtava protokole i operacije na lokaciji za odabranu metodu, njene tehnološke specifikacije i rezultate, te sigurnosne procedure za osoblje na lokaciji (Hollander i sur., 2010).

---

Kod odabira metode možda i najbitniji faktor su troškovi sanacije koji dosežu milijunske iznose, ovisno o stupnju onečišćenja, a ključni čimbenik u tim troškovima je pogrešno odabrana tehnologija s obzirom na specifične uvjete na lokaciji (Pitchel, 2007). Stoga je bitno naglasiti važnost pravilnog odabira metode sanacije kako bi se osigurao njen uspjeh.

#### ***3.4.4. faza – implementacija odabrane metode***

U ovoj fazi uglavnom su uključeni izvođači radova, no ostali članovi tima sudjeluju u koordinaciji i provedbi sanacije kao i ostalim građevinskim radovima.

Ključni koraci u ovoj fazi su:

- priprema dokumentacije izgradnje, uključujući planove, crteže i raspored objekata na lokaciji kako bi se mogla obaviti priprema i odabrati izvođač radova za provedbu sanacije
- izvođač radova provodi akcijski plan u skladu sa detaljima građevinske dokumentacije
- završna kontrola (Hollander i sur., 2010).

#### ***3.5.5. faza – održavanje i monitoring lokacije***

Konzultanti za zaštitu okoliša i izvođači radova uključeni su u održavanje sanirane lokacije, a o svom radu izvještavaju državne i lokalne regulatorne vlasti.

Ova faza uključuje podešavanje dugoročnih metoda sanacije (npr. *pump-and-treat* metode o kojoj će biti riječi u sljedećem poglavlju) te održavanje i praćenja rada (Hollander i sur., 2010).

---

## 4. METODE SANACIJE

Cilj sanacije je osigurati mjesto koje je prikladno za korištenje i smanjiti ili potpuno eliminirati onečišćenje. Putevi ljudskog izlaganja onečišćenju su direktan kontakt sa onečišćenim tлом, potrošnja onečišćene hrane i vode, udisanje prašine i para, ispiranje onečišćenja u podzemne vode te direktni kontakt sa kontaminiranim materijalima (Hollander i sur., 2010).

Koja će se metoda sanacije izabrati ovisi o stupnju, vrsti i opsegu onečišćenosti. Pojam stupanj onečišćenosti podrazumijeva koncentraciju onečišćivača u tlu, vodi i/ili zraku izraženu u ppm-ovima (eng.: *parts per million*) ili ppb-ovima (eng.: *parts per billion*) (Kuo, 2014). Nadalje, odabir ovisi i o tipu tla, vremenskom razdoblju izlaganja potencijalnom onečišćenju, budućem načinu korištenja te definiranom zakonskom okviru pojedine države o stupnju sanacije (Kisić, 2012).

Vrste onečišćenja mogu biti hlapljiva i poluhlapljiva organska onečišćenja, anorganska onečišćenja (uključujući radioaktivne elemente), goriva te eksplozivi. (Kisić, 2012). Onečišćenje može biti ograničeno samo na tlo ali može uključivati tlo i površinske vode a može biti toliko opsežno da uključuje i kontaminaciju svih okolišnih sfera uključujući tlo, površinske i podzemne vode te okolni i unutarnji zrak (Hollander i sur., 2010).

Imajući u vidu ove čimbenike, ali i buduću namjenu lokacije te ekonomsku isplativost, odabiru se metode koje će postići zadani cilj.

---

Širok je raspon dostupnih metoda koje možemo kategorizirati na sljedeći način:

- uobičajene metode sanacije kojima je poznata učinkovitost i cijena te se uobičajeno koriste
- inovativne metode čije je rutinsko korištenje uvjetovano nedostatkom podataka o učinkovitosti i cijeni te se ograničeno koriste
- nove metode koje su još u fazi testiranja u kontroliranim uvjetima (laboratoriji i poljski pokusi) (Hollander i sur., 2010).

Radi lakšeg snalaženja, u daljnim poglavljima ove metode dalje su podjeljene u pet kategorija.

To su:

- biološke metode sanacije tla
- fizikalne metode sanacije tla
- kemijske metode sanacije tla
- termalne metode sanacije tla
- metode sanacije vode

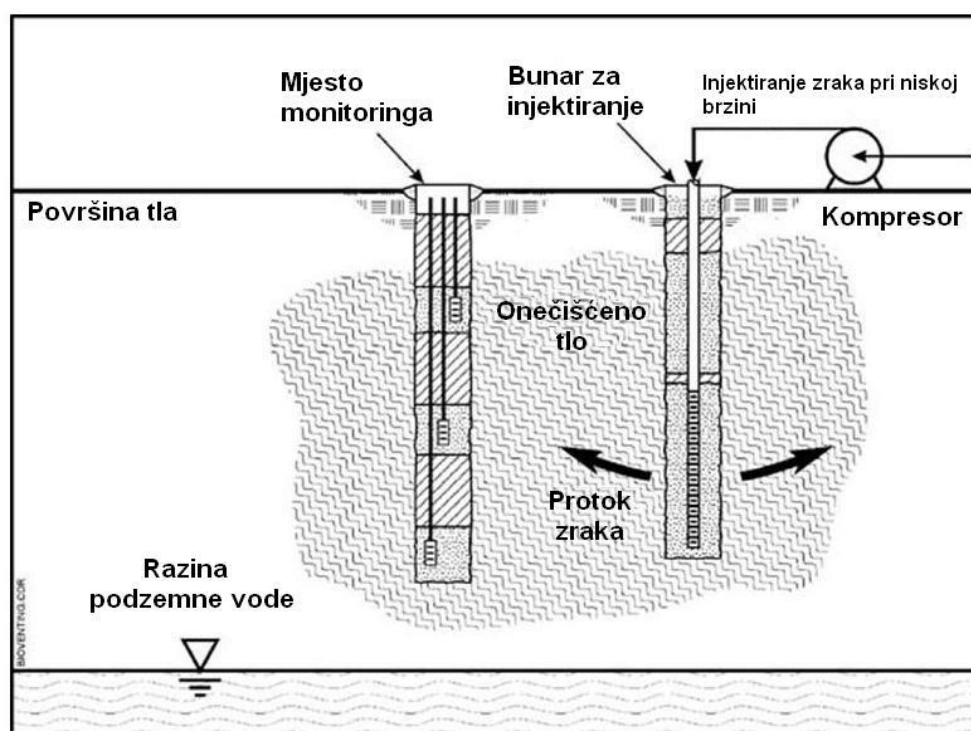
## 4.1. BIOLOŠKE METODE SANACIJE TLA

### Bioprozračivanje

Bioprozračivanje je uobičajena metoda sanacije onečišćenog tla. Ona koristi autohtone mikroorganizme u tlu koji razgrađuju problematične organske spojeve. U bioprozračivanju, svježiji zrak ili kisik dovodi se do onečišćenog dijela i potiče mikroorganizme na ubrzanu aerobnu biološku razgradnju (Slika 1). Bioprozračivanje se najčešće koristi na mjestima onečišćenih naftnim proizvodima težima od benzina (npr. dizel i mlazno gorivo) dok je benzin sklon isparavanju pa ga je bolje sanirati metodom ekstrakcije prozračivanjem (Kuo, 2014) o kojoj će biti govora u sljedećim poglavljima.

Prednost ove metode je njena brzina pa je tako u optimalnim uvjetima pjeskovitog, homogenog tla potrebno oko 6 mjeseci do 2 godine da se lokacija očisti (EPA, 1994). Heterogena tla sa smanjenom propusnosti stvarat će komplikacije u korištenju ove metode (Meuser, 2013). U načelu, teško je procijeniti troškove različitih metoda jer slučajevi uglavnom nisu usporedivi. Definirati se mogu tek okvirni troškovi. Oni se računaju na temelju mase koja se tretira, kapacitetu transporta, standardima i dostupnosti visoke tehnologije te ekonomskim značajkama poput kontrole valute.

Za metodu bioprozračivanja okvirni troškovi iznose od 20 do 60 \$/m<sup>3</sup>, a godišnja ulaganja i troškovi rada iznose dodatnih 24 000 do 177 000 \$ (Meuser, 2013).



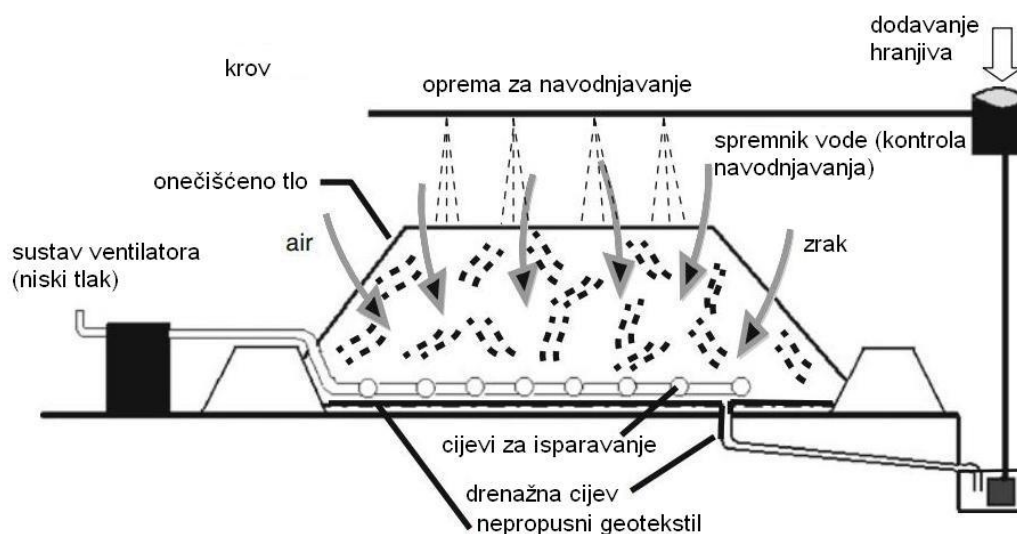
Slika 1. Bioprazračivanje (izvor: [www.teamanalysis.com](http://www.teamanalysis.com))

---

## Bioremedijacija

Bioremedijacija je inovativna metoda za sanaciju onečišćenih tala, podzemnih i površinskih voda ili otpadnih hrpa koja na kontaminiranom mjestu uključuje uporabu aktivne mikrobne biomase za uništenje, detoksikaciju i/ili unos onečišćujućih tvari. Bioremedijacija obično podrazumijeva sanaciju organskih onečišćenja, gdje mikrobne stanice koriste molekule ugljikovodika kao izvor ugljika kako bi dobile energiju za disanje i stanični rast (Pitchel, 2007).

Postupak bioremedijacije može se izvesti na više načina, jer proces može biti aeroban ili anaeroban te se tlo može i ne mora iskapati. Najčešće postupak izgleda ovako: nakon iskapanja tla u hrpe se ugrađuju perforirane cijevi za dovod zraka. Kako bi se smanjile emisije i potencijalna sekundarna kontaminacija tla, hrpe su obično izolirane na dnu i pokrivene odozgo (slika 2). Ova metoda zahtijeva kontrolu vlage, hranjivih tvari, temperature i pH hrpe kako bi mikroorganizmi mogli preživjeti i obaviti proces čišćenja (Kuo, 2014).



Slika 2. Bioremedijacija (izvor: Meuseur, 2013).

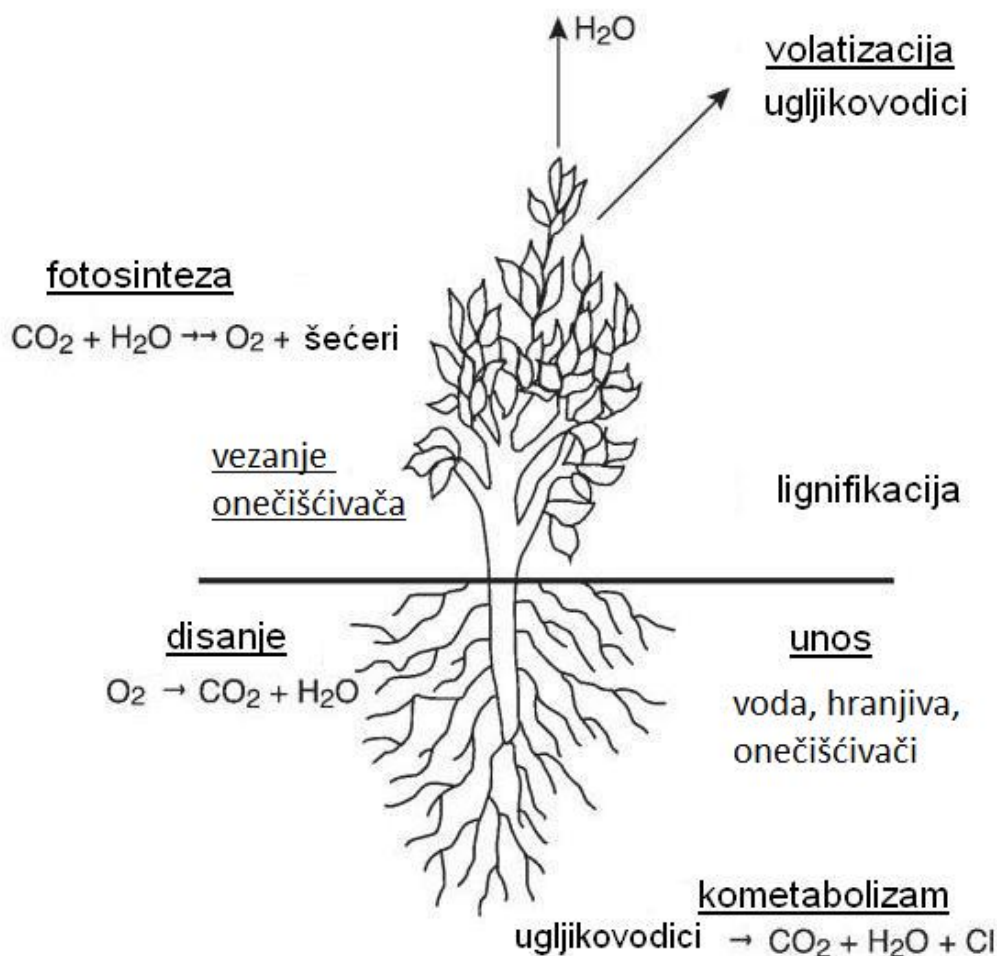


## Fitoremedijacija

Fitoremedijaciju ubrajamo u nove metode sanacije a podrazumijeva korištenje različitog bilja; stabala, povrća, trava, pa čak i biljaka koje inače smatramo korovom. Biljke usvajaju onečišćivače u korijenov sustav i/ili nadzemne organe te ih akumuliraju, imobiliziraju i razgrađuju (Slika 3) (Pitchel, 2007).

Fitoremedijacija je vrlo jeftina i jednostavna metoda koja uspjeva na lokacijama gdje uobičajene metode imaju malo ili nimalo uspjeha (npr. u tlima sa malom propusnosti i određenim količinama različitih vrsta onečišćenja). Troškovi koji uključuju remedijaciju na dubini od 50 cm, obradu tla, sadnju, gnojidbu i održavanje tijekom 10 godina iznose od 15 do 24 \$/m<sup>2</sup> u Sjedinjenim Američkim Državama (Meuser, 2013). Ova metoda može se koristiti kada vrijeme nije faktor za sanaciju (jer je dugotrajna) i ako postoje prikladni uvjeti u pogledu plodnosti tla, pH, temperature i dostupnosti vode za rast i razvoj bilja (Pitchel, 2007).

Nedostatak je što je dugotrajna (i do 15 godina), ima ograničenu primjenu samo na dubinu korijena te je ovisna o vremenskim prilikama i razvojnom stadiju biljke (Kisić, 2012).



Slika 3. Fitoremedijacija (izvor: Pitchel, 2007).

---

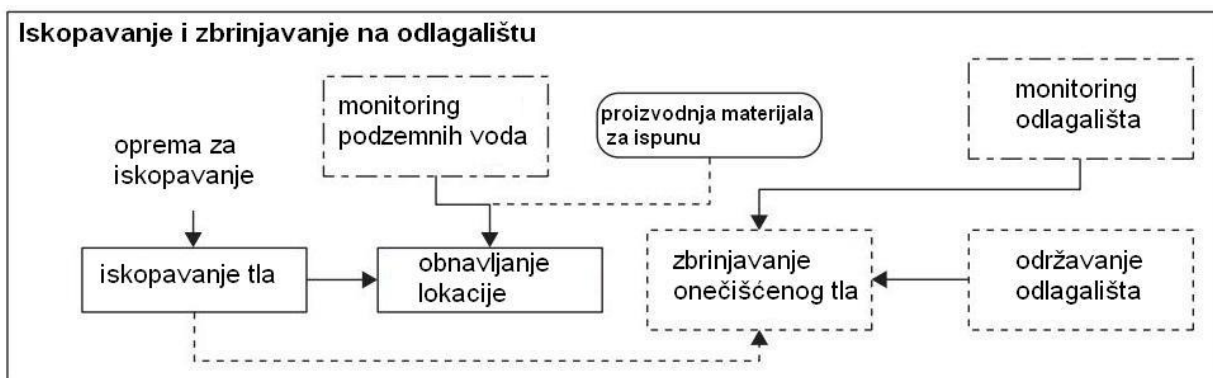
## 4.2. FIZIKALNE METODE SANACIJE TLA

### Iskopavanje

Ova uobičajena metoda sanacije uključuje izolaciju, kopanje i uklanjanje onečišćenog tla na lokaciji. Tlo se obično vadi građevinskom opremom kao što su rovokopač ili buldožer. Tada bi ga trebalo očistiti ili ukloniti sa lokacije i zbrinuti na odobrenom odlagalištu. Prostor koji ostane nakon iskopavanja najčešće se napuni čistom zemljom ili se uklopi u postojeće građevinske planove (Slika 4). Do danas se ova metoda smatra standardnom i najčešćom metodom sanacije jer je vrlo brza, gotovo svi procesi zahtijevaju neki njen oblik, a često je tek uvod u druge zahvate na lokaciji (Hollander i sur., 2010).

Mane ove metode su što iskop uzrokuje smanjenje kvalitete tla u smislu smanjene količine organske tvari, kapaciteta zamjene kationa te sposobosti filtriranja i biorazgradnje, energetski je zahtjevna i zbog razine buke nepopularna u zajednici (Reddy i Cameselle, 2009).

U Sjedinjenim Američkim Državama troškovi iskopavanja 50 m<sup>3</sup> onečišćenog tla i njegovo zbrinjavanje variraju prosječno između 976 000 i 4 148 000 \$/ha (Meuser, 2013).



Slika 4. Dijagram iskopavanja (izvor: Dixon, 2007).

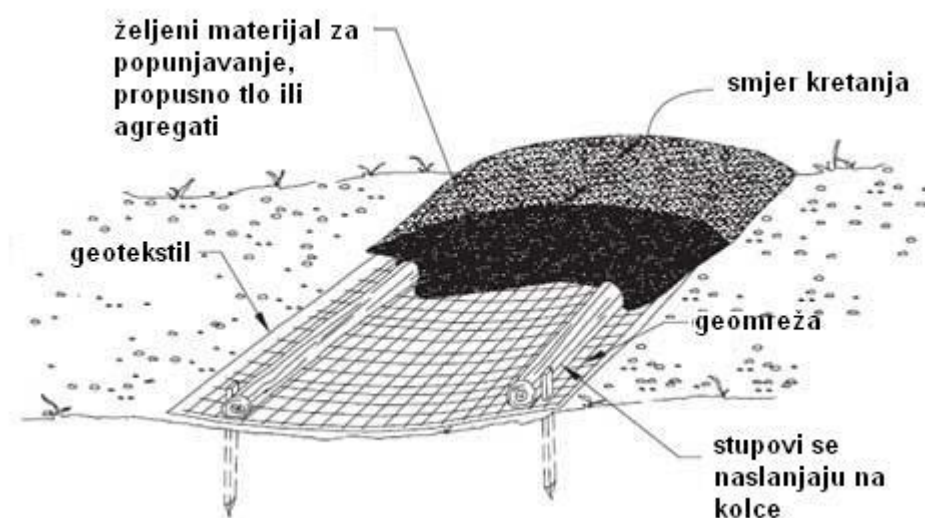
---

## Kapsuliranje

Kapsuliranje je uobičajena metoda sanacije koja uključuje prekrivanje onečišćenog tla sa svih strana nepropusnim materijalom i sukladno time njegova interakcija sa okolnim biljnim i životinjskim svijetom nije izvediva (Meuser, 2013).

Pokrivanje zemljišta može se sastojati od sustava jednog sloja plodnog tla i kompleksnog višeslojnog niskopropusnog i visokopropusnog sustava tala i niskopropusne geosintetike (slika 5). Niskopropusni materijali sprečavaju vodu da prođe do onečišćenog tla, a visokopropusni suše i skupljaju vodu koja se procjeđuje u kapsulu (Kisić, 2012).

Ova metoda je najosnovniji i najjeftiniji oblik sanacije u smislu inicijalnih troškova. Međutim, troškovi monitoringa, održavanja i zamjene pojedinih slojeva pri kraju vijeka trajanja mogu u nekim slučajevima prevagnuti uštede troškova gradnje. Iako je kapsuliranje dovoljno za neke manje toksične onečišćivače, ova metoda ne preporučuje se za onečišćivače koji bi mogli prodrijeti (perkolorirati) do podzemne vode ili ispariti u atmosferu (GGHC, 2007).



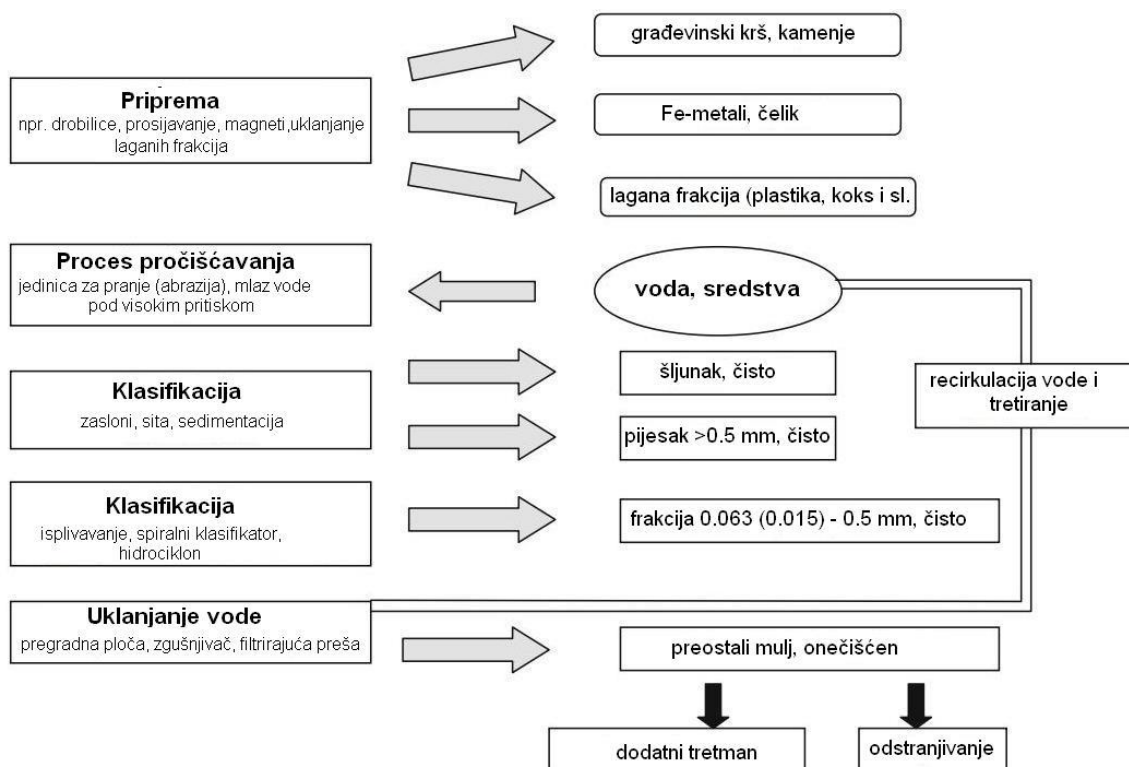
Slika 5. Kapsuliranje (izvor:www.fs.fed.us)

### 4.3. KEMIJSKE METODE SANACIJE TLA

#### Ispiranje tla

Ispiranje tla je inovativna metoda gdje se tlo miješa s vodom za ispiranje kako bi se uklonili onečišćivači adsorbirani na čestice tla. Ponekad se u vodu dodaju sredstva za ekstrakciju (helatori, kiseline itd.) kako bi se poboljšao taj proces. Tlo i voda kojom se ono čistilo zatim se odvajaju. Preostali mulj može se dodatno obraditi jer sadrži veću koncentraciju onečišćivača od izvornog tla a otpadne vode može se pročititi i ponovno slati u postupak (Slika 6) (NJDEP, 1998).

Kod ove metode potrebno je iskapanje tla i prethodno odvajanje od kamenja, krhotina i ostalih prevelikih predmeta koji mogu oštetiti strojeve. Metoda postaje manje učinkovita čim je tlo bogatije organskom tvari i sitnijim česticama gline i praha jer oni otežavaju proces odvajanja onečišćivača od čestica tla. Česta zamjerka je i to što ona ne rješava problem onečišćivača već samo smanjuje volumen koji je potrebno zbrinuti (Meuser, 2013). U odnosu na količinu materijala koji ostaje onečišćen i zahtjeva daljnji tretman, ispiranje tla je uglavnom isplativa metoda te troškovi iznose oko 113 \$/m<sup>3</sup> (Meuser, 2013).



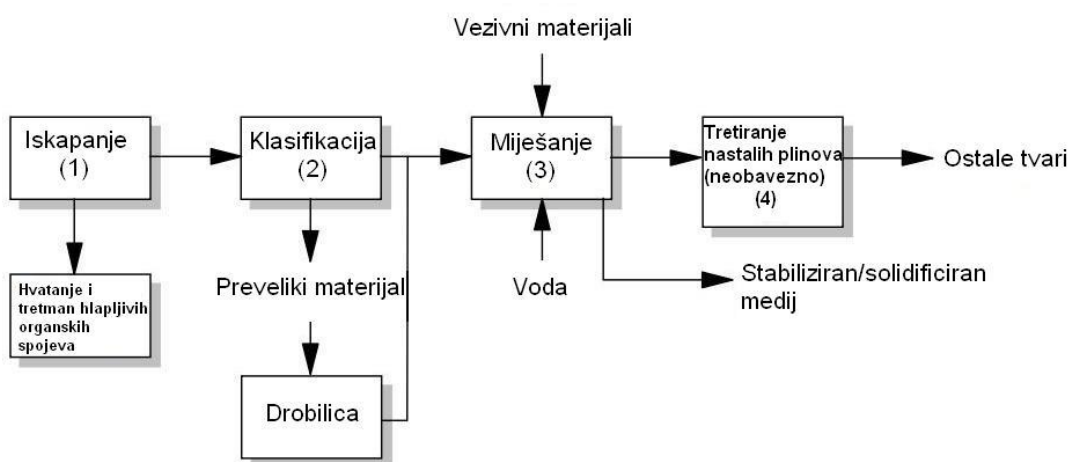
Slika 6. Shema ispiranja tla (izvor: Meuser, 2013).

---

## Solidifikacija

Solidifikacija je uobičajena metoda kojoj je cilj pretvoriti onečišćivače u netopljivi i nepokretan oblik te ih sakupiti u zbijenu, čvrstu masu. Postupak se sastoji od miješanja kontaminiranog tla s vezivnim materijalima poput vapna, silikata, termoplastike te uz dodatak vode (NJDEP, 1998). Ovaj postupak zahtijeva iskopavanje onečišćenog tla. Nakon iskopa materijal se klasificira, a veći se uklanja ili lomi te se potom koristi (Slika 7). Kako bi se osiguralo ravnomjerno miješanje tla sa vezujućim materijalima koriste se rotirajući bubnjevi i standardna građevinska oprema (Meuser, 2013).

Metoda je učinkovita kod tala onečišćena teškim metalima, jeftina je (prema Meuseru, 2013., u Sjedinjenim Američkim Državama troškovi iskopavanja i solidifikacije tla iznose maksimalno 73 \$/m<sup>3</sup>) i jednostavna za korištenje no mane su joj što se miješanjem sa vezivnim materijalima povećava volumen tla kojeg treba zbrinuti, a vremenski uvjeti mogu ugroziti dugoročnu imobilizaciju onečišćivača. (NJDEP, 1998).



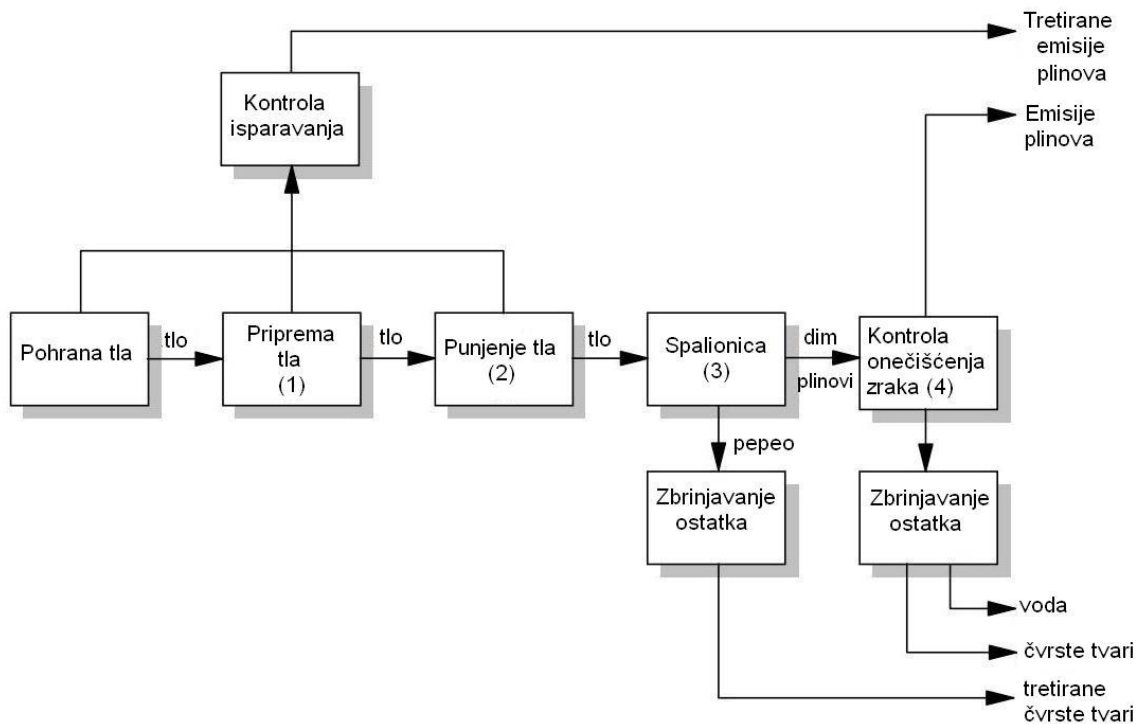
Slika 7. Shema solidifikacije (izvor: NJDEP, 1998).

#### 4.4. TERMALNE METODE SANACIJE TLA

##### Spaljivanje

Spaljivanje je uobičajena metoda koja se koristi za tretiranje onečišćenog tla na temperaturi dovoljno visokoj da uništi štetne tvari. Zahtijeva iskopavanje tla, a spalionica može biti stacionarna ili mobilna te se u tom slučaju tlo mora prevesti do nove lokacije (Hollander i sur., 2010).

Spalionice koriste različite mehanizme za postizanje visoke temperature od 870 do 1200°C kako bi se uništili onečišćivači organskog podrijetla. Najčešće su to sustavi sa rotacijskom pećima ili infracrvenom tehnologijom. Nusprodukt spaljivanja su plinovi koji se također moraju kontrolirano ispustiti u atmosferu te pepeo koji je potrebno naknadno zbrinuti po odgovarajućim propisima (Slika 8). Ova metoda se koristi već dugi niz godina te je učinkovita u sanaciji tla onečišćenog polutantima organskog podrijetla (NJDEP, 1998). Troškovi ove metode u Sjedinjenim Američkim Državama iznose od 34 do 228 \$/m<sup>3</sup>, odnosno od 154 do 228 \$/m<sup>3</sup> (za tretiranje kloriranih alifatskih spojeva i PAH-ova<sup>1</sup>), 127 \$/m<sup>3</sup> (za PCB-ove<sup>2</sup>) i 134 \$/m<sup>3</sup> (za pesticide) (Meuser, 2013).



Slika 8. Dijagram spaljivanja (izvor: NJDEP, 1998).

<sup>1</sup> policikličkih aromatskih ugljikovodika

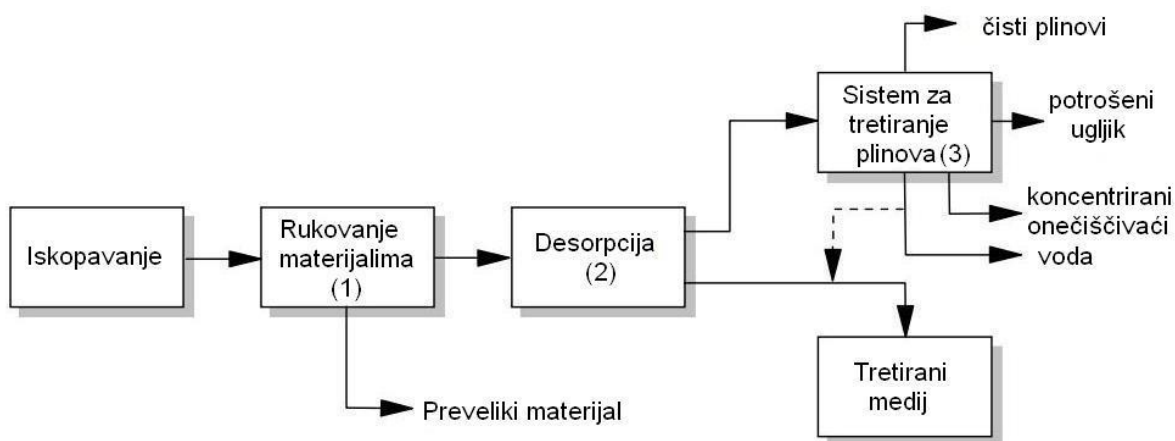
<sup>2</sup> poliklorirane bifenile

---

## Toplinska desorpcija

Termalna desorpcija je inovativna metoda koja koristi toplinu kako bi se povećala nestabilnost onečišćivača u tlu, tako da se mogu ukloniti od čvrste faze tla. Za razliku od metode spaljivanja koja uništava onečišćivače na visokoj temperaturi, ovdje se oni sakupljaju u obliku pare kako bi se mogli kemijski razgraditi. Toplinska desorpcije stoga ima dvije glavne komponente; sustav za samu desorpciju te sustav za tretiranje pare (Slika 9) (Hollander i sur., 2010).

U principu, sama toplinska desorpcija je sustav za fizičko odvajanje i ne rezultira uništenjem onečišćivača već smanjuje njihov volumen (NJDEP, 1998).



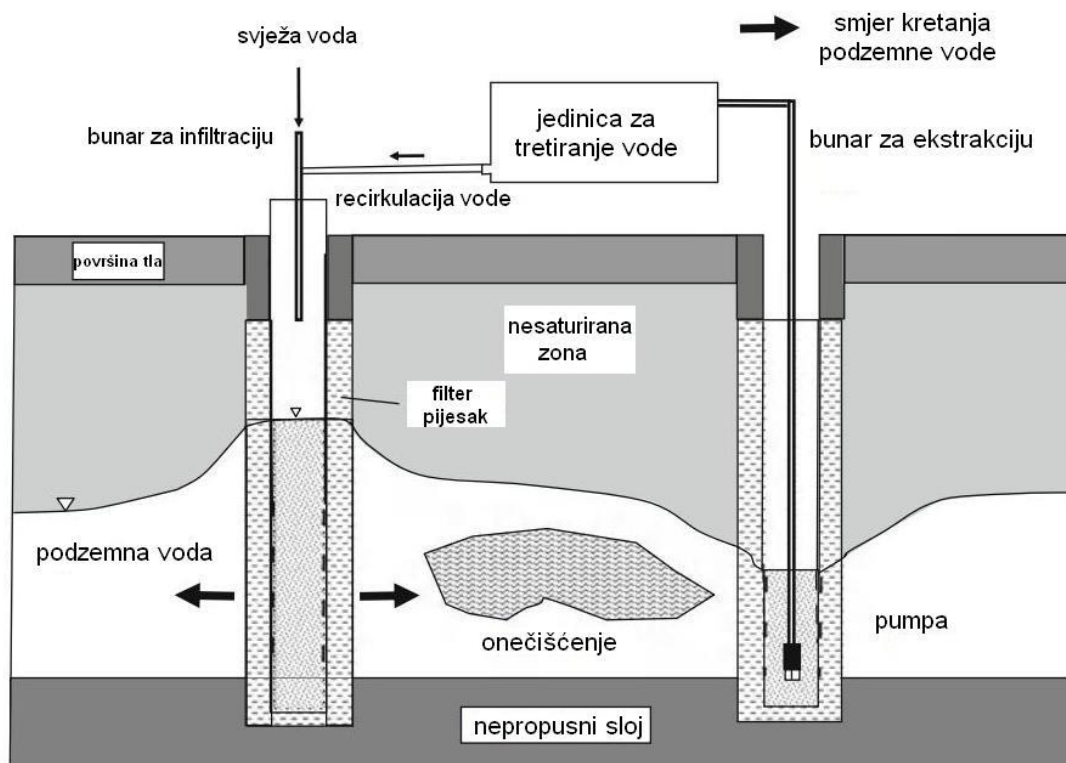
Slika 9. Shema toplinske desorpcije (izvor: NJDEP, 1998).

## 4.5. METODE SANACIJE VODE

### *Pump-and-treat* metoda

*Pump-and-treat* je najčešće primjenjivana metoda za sanaciju podzemnih voda. Da bi se postavio sustav potrebno je točno locirati onečišćenje i dubinu podzemne vode kako bi se omogućilo instaliranje bunara za ekstrakciju. Mreža bunara se postavlja na način da crpi onečišćenje iz područja njegove najveće koncentracije ili na rubovima kako bi se minimaliziralo širenje (Slika 10) (Meuser, 2013).

Nedostatak ove metode je što zahtijeva vanjski izvor energije što ju čini vrlo skupom kada se koristi tijekom dugog razdoblja. Također, u početnom stadiju crpi se velika količina čiste vode što dovodi do smanjenja ovog resursa. Ograničena je njena učinkovitost kod heterogenih vodonosnika a u nekim slučajevima otežava sanaciju jer proširuje onečišćenje ispod površine. U tom slučaju ova se metoda kombinira sa metodom propusne reaktivne barijere (Pitchel, 2007.) opisane u sljedećem poglavlju. Troškovi *pump-and-treat* metode koji uključuju jedan ekstrakcijski bunar na dubini od 10 metara i vrijeme sanacije od jedne godine iznose od 38 400 do 78 000 € što uključuje i pročišćavanje onečišćene vode (Meuser, 2013).



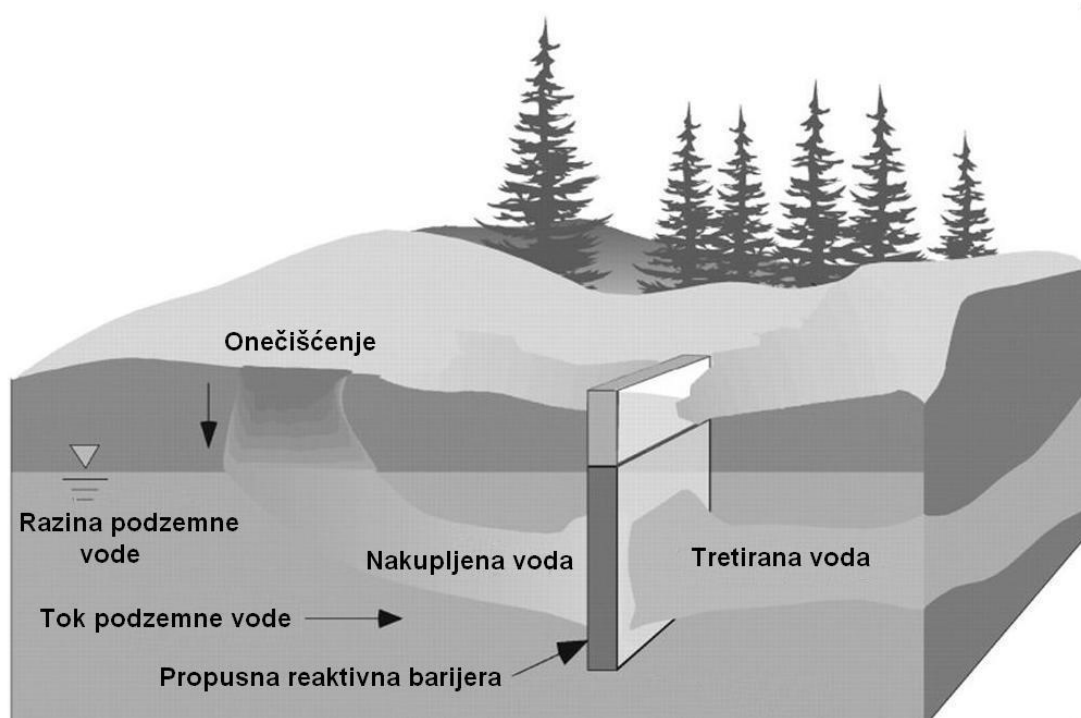
Slika 10. *Pump-and-treat* metoda (izvor: Meuser, 2013).



---

## Propusna reaktivna barijera

Propusna reaktivna barijera je uobičajena metoda koja se sastoji od reaktivne zone u tlu koja uništava halogenizirane organske spojeve i uklanjanja specifične anorganske spojeve. Primjenjuje se za sanaciju podzemne vode a u reaktivnoj zoni koriste se različiti materijali kao što su vapnenac, aktivni ugljen i zeolit (slika 11). Oni adsorbiraju i kemijski talože onečišćivače. Barijera se može sastojati i od odabranih mikroorganizmama koji djeluju kao biološki reaktor i dalje degradiraju ciljane onečišćivače. Prednosti ove metode su što se tlo ne mora iskopati i ne zahtjeva veće održavanje te je djelotvorna u uklanjanju najčešćih onečišćivača. Koristi se već više od dva desetljeća te je relativno jeftina. Problemi mogu nastati kada zbog zasićenosti ili visoke koncentracije onečišćivača barijera izgubi svoju prvotnu učinkovitost (Reddy i Cameselle, 2009).

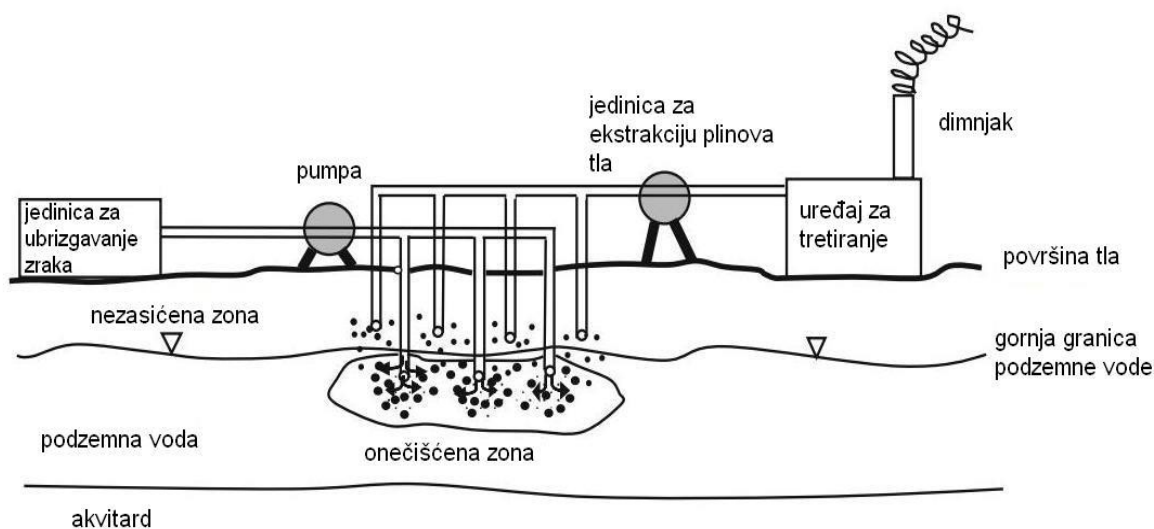


Slika 11. Propusna reaktivna barijera (izvor: geoscienceworld.org)

## Prozračivanje (*Air sparging*)

Prozračivanje je uobičajena metoda pročišćavanja podzemnih voda. Svježi zrak ili kisik injektira se pod pritiskom u vodonosnik te dopijeva do onečišćene vode u tlu. Mjehurići zraka koji se pritom stvaraju adsorbiraju hlapljiva organska onečišćenja i premještaju se u zonu nezasićenu onečišćivačima. Tu se buše bunari za ekstrakciju plinova koji u konačnici crpe plinove iz tla (slika 12). Prednost ove metode je što je u optimalnim uvjetima (pjeskovito, homogeno tlo) vrijeme tretmana relativno kratko - obično manje od 1 do 3 godine (NJDEP, 1998).

Ograničavajući faktori ove metode su faza tekućine i heterogenost vodonosnika s niskom propusnošću. Glavni problem je ograničena dostupnost onečišćivača jer oni mogu migrirati na manje pristupačna mjesta te ponovno onečistiti podzemne vode. Prema tome, učinkovitost prozračivanjem teško je izračunati zbog nepredvidivosti kretanja onečišćivača (Meuser, 2013).



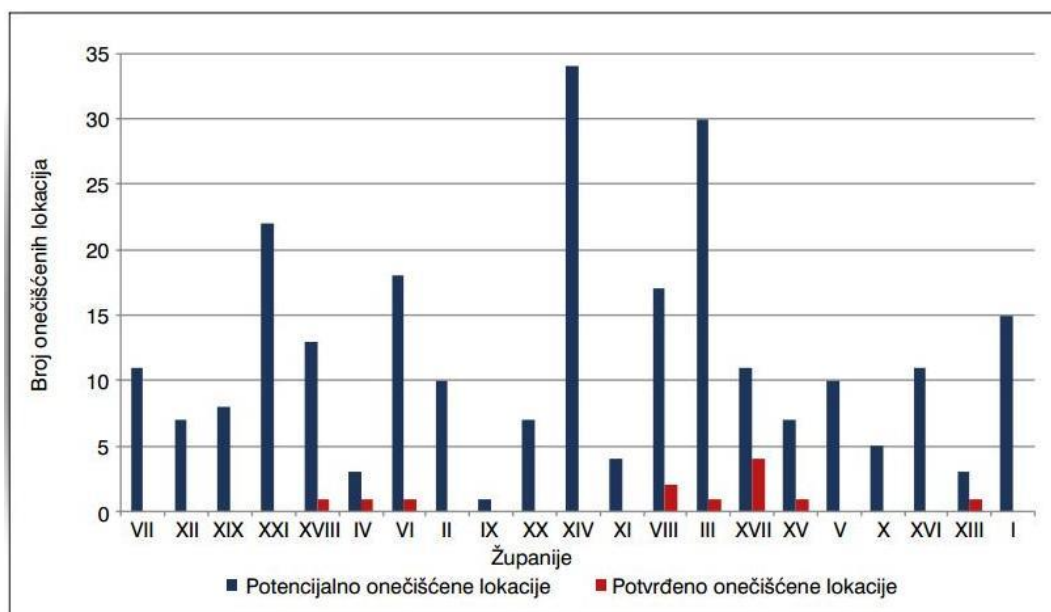
Slika 12. Prozračivanje (izvor: Meuser, 2013).

---

## 5. STANJE *BROWNFIELDA* U HRVATSKOJ

Poslijeratnu Hrvatsku obilježili su teško prijelazno razdoblje, problemi te loše upravljanje tvrtkama kako u državnom, tako i u privatnom vlasništvu. Kao posljedica ovih događanja brojna industrijska područja su nedovoljno iskorištena, djelomično uništena ili potpuno zapuštena. Promijene u vlasničkoj strukturi hrvatskog gospodarstva zajedno sa ulogom i funkcijom vlade rezultirale su novostvorenim lokalnim i regionalnim samoupravama slabo osposobljenima za rad sa gospodarskim subjektima u vlasništvu više javnih ustanova na različitim razinama vlasti. Neučinkovita upravljačka struktura očituje se u sporim procedurama i provedbom zakonodavstva, posebice u stečajnim i likvidacijskim postupcima također povezanih sa revitalizacijom *brownfield* lokacija. Neadekvatno korištenje zemljišne politike na lokalnoj razini, nejednakost u pristupu informacijama, oslabljeno tržište zemljišta zbog loše katastarske evidencije i zastarjelost zemljišnih knjiga glavne su prepreke investicijama u Hrvatskoj (Đokić i Sumpor, 2010).

*Brownfield* lokacije u nas većinom su rezultat dugotrajnih postupaka likvidacije i neučinkovitog upravljanja državnom imovinom te napuštenih vojnih objekata, ali i kao posljedica ratnih zbivanja. U nekim gradovima koji su bili u ratnoj zoni (npr. Osijek, Sisak, Karlovac, Šibenik, Slavonski Brod) neka industrijska postrojenja uništena su tijekom rata i nikada nisu obnovljena. Na slici 13 Prikazan je raspored 247 potencijalno onečišćenih lokacija i 12 potvrđeno onečišćenih lokaliteta po županijama od kojih su neki bivša koksara u Bakru, odlagalište otpada Lemić Brdo, Tvornica elektroda i ferolegura Šibenik, TE-Plomin, Borovo (Vukovar) itd. (AZO, 2011).



Slika 13. Broj potvrđenih i onečišćenih lokacija po županijama (izvor:AZO, 2011).

Legenda: VII – Bjelovarsko-bilogorska, XII – Brodsko-posavska, XIX – Dubrovačko-neretvanska, XXI – Grad Zagreb, XVIII – Istarska, IV – Karlovačka, VI – Koprivničko-križevačka, II – Krapinsko-zagorska, IX – Ličko-senjska, XX – Međimurska, XIV – Osječko-baranjska, XI – Požeško-slavonska, VIII – Primorsko-goranska, III – Sisačko-moslavačka, XVII – Splitsko-dalmatinska, XV – Šibensko-kninska, V – Varaždinska, X – Virovitičko-podravska, XVI – Vukovarsko-srijemska, XIII – Zadarska, I – Zagrebačka

2009. godine savjetodavno tijelo za održivu prenamjenu *brownfielda* Svjetske banke posjetilo je Hrvatsku a preporuke za uspostavu baze podataka i izrada alata za identifikaciju rizika samo su neki od rezultata tog posjeta (Đokić i Sumpor, 2010).

Za kraj, navest ćemo uspješan primjer prenamjene vojarne Karlo Rojc u Puli, gdje su istraživanje proveli Jakovčić i sur., (2013). Naime, grad Pula se tijekom jednog i pol stoljeća razvijao kao vojni grad što je rezultiralo postojanjem velikog broja vojnih objekata i djelatnika. Nakon 1990-ih godina započinje postupak povratka vojne imovine te je do danas gradu na upravljanje vraćeno 12 objekata. Jedan od njih je i vojarina Karlo Rojc. U prostoru centra danas djeluje stotinjak udruga pri čemu dominiraju udruge registrirane u djelatnosti kulture. Autori rada proveli su istraživanje među predstavnicima udruga sa sljedećim rezultatima:

„Većina ispitanika smatra da se otvaranje Centra na prostoru nekadašnje vojarne većinom pozitivno odrazilo i na kvalitetu života stanovnika gradske četvrti Monte Zaro. Uređenje prostora i dovođenje novih funkcija (na prostor vojarne Karlo Rojc, ali i vojarne Istarskih brigada) pridonijelo je daljnjem jačanju socijalnih, administrativnih i uslužnih funkcija gradske četvrti pri čemu je istodobno zaustavljen proces degradacije i devastacije urbanog pejzaža te je povećana vrijednost zemljišta na prostoru gradske četvrti.“ (Jakovčić, M. i sur., 2013).

---

## 6. ZAKLJUČAK

Zemljište je dragocjen prirodni resurs i temelj za održivost ljudske civilizacije. Rast stanovništva, osobito razvoj urbanih gradova visoke gustoće naseljenosti dovodi do globalne industrijalizacije i predstavlja veliki pritisak na okoliš, čime se znatno ugrožava održivost.

Problem *brownfield* lokacija krajem 20. stoljeća dolazi u fokus osobito u zapadnim zemljama koje se suočavaju sa sve većim nedostatkom slobodnog prostora za građenje.

Uzimajući u obzir sve prednosti postojeće infrastrukture i ostavljajući zelene površine netaknutima, *brownfieldi* su u središtu pozornosti stvaranja održivih strategija za razvoj urbanih sredina jer očuvanjem zelenih površina smanjuje se emisija stakleničkih plinova i samim time, pritisak na okoliš. U brzo rastućim gradovima, sanacija i prenamjena *brownfield* lokacija pruža priliku za ponovni razvoj i upotrebu područja koja bi se inače proširila diljem netaknutih krajolika daleko izvan urbanih središta. Odabir metode sanacije ovisi o stupnju, vrsti i opsegu onečišćenosti, tipu tla, vremenskom razdoblju izlaganja potencijalnom onečišćenju, budućem načinu korištenja te definiranom zakonskom okviru pojedine države o stupnju sanacije.

Uz dobro organizirano zakonodavstvo, državnu podršku i suradnju širokog spektra stručnjaka, moguće je razviti strateške kriterije za upravljačke mehanizme i holistički pristup ovom problemu.

U Hrvatskoj spore procedure i provedba zakonodavstva te loša investicijska klima otežavaju revitalizaciju *brownfield* lokacija.

---

## 7. POPIS LITERATURE

AZO – Agencija za zaštitu okoliša (2011). Odabrani pokazatelji stanja okoliša u Republici Hrvatskoj. AZO, Zagreb

CARACAS - Concerted Action on Risk Assessment for Contaminated Sites in the European Union (1999). Risk Assessment for Contaminated Sites in Europe. LQM Press, Nottingham.

Couch, C. i sur. (2003). Urban Regeneration in Europe. Blackwell Publishing, Oxford, UK.

Dixon, T.J. i sur. (2007). Sustainable Brownfield Regeneration; Liveable Places from Problem Spaces. Blackwell Publishing, Oxford, UK.

Đokić, I., Sumpor, M. (2010). Brownfield Redevelopment Issues in Croatia. Privredna kretanja i ekonomska politika 123/2010.

EPA – Environmental Protection Agency (1994). How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tanks sites: A guide for corrective action plan reviewers. <[http://www.epa.gov/swrust1/pubs/tum\\_ch2.pdf](http://www.epa.gov/swrust1/pubs/tum_ch2.pdf)> Pristupljeno 13. travnja, 2015.

EU CLARINET (2002). Brownfields and Redevelopment of Urban Areas, A Report from the Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies – Working Group 2001, Umweltbundesamt, Vienna.

GGHC - Green Guide for Health Care (2007). Brownfield Redevelopment Technical Brief. <[www.gghc.org](http://www.gghc.org)> Pristupljeno 14. travnja, 2015.

Hollander, J.B. i sur. (2010). Principles of Brownfield Regeneration. Island Press, Washington DC

Jakovčić, M. i sur. (2013). Prenamjena vojnih brownfield lokaliteta: primjer prenamjene vojarnje Karlo Rojc u Puli. ANNALES.Ser.hist.sociol. 23: 487–500

Kuo, J. (2014). Practical Design Calculations for Groundwater and Soil Remediation. CRC Press, Boca Raton.

Kisić, I. (2012). Sanacija onečišćenog tla. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Meuser, H. (2013). Soil Remediation and Rehabilitation; Treatment of Contaminated and Disturbed Land. Springer, Dordrecht.

NJDEP - New Jersey Department of Environmental Protection (1998). Revised guidance document for the remediation of contaminated soils. Department of Environmental Protection State of New Jersey, USA.

---

Perovic, S., Kurtović Folić, N. (2012). Braunfield regeneracija - imperativ za održivi urbani razvoj. Građevinar 5. 373-383

Pitchel, J. (2007). Fundamentals of Site Remediation. Government Institutes, an imprint of The Scarecrow Press, Inc., Maryland.

Reddy, K., Cameselle, C. (2009). Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater. John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey

Thorton, G. (2008). Brownfield Regeneraion. <<http://www.eoearth.org/view/article/150793/>> Pristupljeno 15. travnja, 2015.

---

## 8.SAŽETAK

IVA HRELJA

SUVREMENE METODE SANACIJE TLA U URBANIM SREDINAMA

Većina gradova svijeta danas suočava se sa znatnim brojem neiskorištenih površina i objekata koje često zauzimaju atraktivne lokacije gradova i narušavaju kvalitetu života a nerijetko i ugrožavaju zdravlje stanovništva zbog različitih stupnjeva kontaminiranosti. Zbog intenzivnog rasta gradova ograničeno je slobodno građevinsko zemljište te se gradovi sve više okreću regeneraciji *brownfield* površina, kreirajući različite programe i strategije za njihovu obnovu.

Najrasprostranjeniju definiciju ovog pojma na području Europe predložila je radna grupa CLARINET (Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies) koja kaže da su *brownfield-i*:

- zapuštena ili u potpunosti neiskorištena zemljišta;
- napušteni, neiskorišteni (u mirovanju) industrijski i trgovački objekti;
- lokacije koje imaju stvarne ili primijećene probleme zagađenja/onečišćenja;
- lokacije koje se nalaze uglavnom u razvijenim urbanim područjima
- lokacije koje zahtijevaju intervenciju da bi ih se ponovo vratilo u upotrebu

Sanacija *brownfielda* dugotrajan je proces koji zahtijeva interdisciplinarnost, dobru organizaciju i razumijevanje svih problema koji proizlaze iz zapuštenih područja u urbanim sredinama te uključuje razne stručnjake, agencije i članove zajednice. Jedan hipotetski tim mogao bi uključivati vodeću tvrtku ili organizaciju, voditelja projekta i asistenta voditelja projekta, lokalno i/ili državno poduzeće, inženjera zaštite okoliša, pravnika, konzultanta za zaštitu okoliša, arhitekta, krajobraznog arhitekta te izvođača radova.

Koja će se metoda sanacije izabrati ovisi o stupnju, vrsti i opsegu onečišćenosti, tipu tla, vremenskom razdoblju izlaganja potencijalnom onečišćenju, budućem načinu korištenja te definiranom zakonskom okviru pojedine države o stupnju sanacije.

U Hrvatskoj spore procedure i provedba zakonodavstva te loša investicijska klima otežavaju revitalizaciju *brownfield* lokacija, no ipak postoje uspješni primjeri.

Ključne riječi: *brownfield*, sanacija, metode, tlo, voda



---

## 8.SUMMARY

IVA HRELJA

CONTEMPORARY METHODS OF SOIL REMEDIATION IN URBAN AREAS

Most cities in the world today are faced with a significant number of unused areas and facilities that often occupy attractive locations of cities and impair quality of life and public health due to the different degrees of contamination. Due to intensive growth of cities, vacant land is limited and cities are increasingly turning to the regeneration of brownfields creating a variety of programs and strategies for their reuse.

Most common definition of the term in Europe comes from the CLARINET group (Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies) that defines brownfields as sites that:

- have been affected by former uses of the site and surrounding land ;
- are derelict or underused;
- have real or perceived contamination problems;
- are mainly in developed urban areas
- require intervention to bring them back to beneficial use

Brownfield remediation is a lengthy process that requires interdisciplinary approach, good organization and understanding of all the problems arising from the neglected areas in urban areas and includes a variety of professionals, agencies and community members. One hypothetical team could include the leading company or organization, project manager and assistant project manager, local and / or state-owned agencies, environmental engineers, lawyers, environmental consultants, architects, landscape architects and contractors.

Which remediation methods are chosen depends on the level, type and extent of pollution, soil type, time of exposure to potential pollution, future usage and legal framework of the country on the degree of remediation.

In Croatia, slow procedures and enforcement of legislation and poor investment climate hinder the revitalization of brownfield sites, but there are some successful examples.

Keywords: Brownfield, remediation, methods, soil, water