

Što je to (fito)remedijacija ili ekološka sanacija zemljišta

Prof. dr. sc. Vladimir Vukadinović

Uvriježeno je u RH da se sve mjere popravke zemljišta označavaju kao [melioracije](#), neovisno dali se uređuje vodni režim zemljišta (*hidromelioracije*; odvodnja, navodnjavanje, izrada nasipa, kanalske mreže i dr.) ili se vrše dugoročne kemijske, fizikalne ili biološke popravke tla. Opći, široki pojam *melioracije* se u specifičnim mjerama popravaka zemljišta, posebice u stručnoj i znanstvenoj literaturi, često zamjenjuje izrazima *restoracija* (*Land restoration*, obnova zemljišta), *reklamacija* (*Land reclamation*, općenito melioracije, kondicioniranje, popravke zemljišta), *rehabilitacija* (*Land rehabilitation*), odnosno *remedijacija* (*Land remediation*, *sanacija zemljišta* u smislu „izliječene zemljišta“, odnosno njegov oporavak), *habitacija* (*Land habititation*, stvaranje novog zemljišta za različite potrebe ljudi).

Dakle, [melioracije, u širem smislu se mogu definirati kao sustav mjera za radikalno poboljšanje nepovoljnih hidroloških, kemijskih i agroklimatskih uvjeta s ciljem učinkovitijeg korištenja zemljišnih resursa](#). Budući da [meliorativni zahvati](#) povećavaju [produktivnost zemljišta](#), omogućuju učinkovitiju poljoprivrednu eksploataciju siromašnih, degradiranih ili malo korištenih zemljišta, kao i privođenje agrikulturni tzv. „*djevičanskih zemljišta*“, npr. močvara, pustinja, područja iskrčenih šuma i šikara, [antropogeno degradiranih zemljišta](#) i dr. Najčešće se pod melioracijama podrazumijeva obnova zemljišta koje je oštećeno prirodnim pojavama (npr. erozijom), ili industrijskim i urbanim procesima, ali je obuhvaćeno i uređenje okoliša zbog podizanja životnog standarda i kvalitete života ljudi.

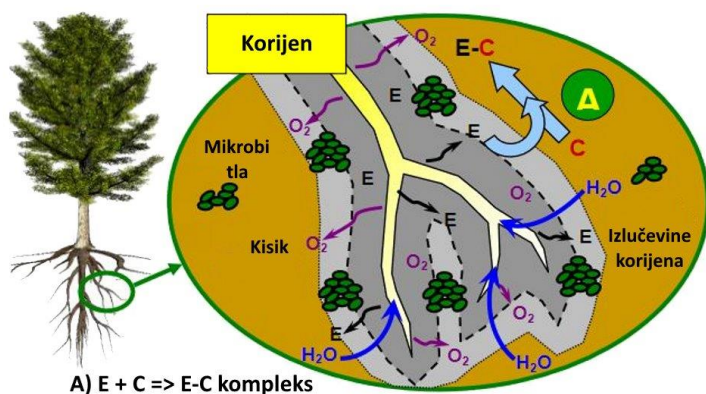
[Glavni meliorativni zahvati obuhvaćaju više različitih popravki \(uređenja\) zemljišta](#) (navodnjavanje, odvodnja, popunjavanje, izrada nasipa i kanalske mreže, rigolanje, terasiranje, dreniranje, antierozivne mjere, isušivanje poldera itd.), ali i specifične zahvate *kemijske popravke* (*kalcizacija, humizacija, meliorativna gnojidba, gipsanje* i dr.), *fizikalne popravke* (*primjena anorganskih i organskih kondicionera* za popravak strukture, toplinskih svojstava, izmjenjivačkog kapaciteta te vlaženja tla) i *biološke popravke* (*kalcizacija, humizacija, primjena bakterijskih gnojiva* i dr.).

Zemljište, posebice poljoprivredno tlo, ograničen je i teško obnovljiv resurs, pa kad dođe do njegove devastacije, odnosno značajnog gubitka njegove kvalitete ([efektivne plodnosti](#)), skupo i teško ga je vratiti u prethodno stanje, a vrlo često je to i neisplativo pa i nemoguće. Stoga je neophodno da se proizvođači pridržavaju [pravila održivosti](#), odnosno [dobre poljoprivredne prakse](#), ali uz permanentnu brigu i nadzor države.

Remedijacija zemljišta (od lat. *remediare*; liječiti, ili lat. *remedium*; vraćanje ravnoteže) je u suštini proces njegove sanacije kojim se zemljišni resursi vraćaju u prijašnje ili "osnovno stanje", odnosno stanje prije nastanka štete. U posljednje vrijeme sve više se sanaciju zemljišta koriste i biološke tehnologije (*bioremedijacija*) koje uključuju najčešće biljke i bakterije. Naime, suvremene [biotehnologije su postale atraktivne alternative konvencionalnim tehnologijama čišćenja zemljišta](#) zbog relativno niskih kapitalnih troškova i inherentno estetske prirode zasađenih površina. Također, prirodni biotehnološki procesi zahtijevaju manje opreme, uštede energije i rada u odnosu na druge metode, jer biljke obavljaju većinu posla, a zemljište se sanira bez mehaničke obrade, premještanja tla ili crpljenja podzemne vode. Zatim, drveće kao i manje biljke korištene u fitoremedijaciji su izvrsne u kontroli erozije tla, čine prostor privlačnijim, smanjuju buku i poboljšavaju kvalitetu okolnog zraka. Izbor biljaka je uglavnom vezan za sposobnost biljaka da uklanjaju toksične tvari pa su to najčešće [biljke hiperakumulatori](#) s intenzivnim specifičnim usvajanjem pojedinih toksičnih, radioaktivnih ili pak suviška pojedinih biogenih elemenata koji tada djeluju toksično (npr. cink, bakar i drugi), onečišćenja naftom ili svojstvima koja pomažu u rješavanju drugih ekoloških problema. Treba naglasiti da je fitoremedijacija, odnosno [uklanjanje štetnih tvari biljkama hiperakumulatorima danas vrlo efikasno, jer se koriste transgene \(GMO\) biljke](#).

Suvremene biotehnologije sanacije zemljišta ili voda, mogu se podijeliti u nekoliko strategija i specifičnih tehnoloških procesa (Slika 1.):

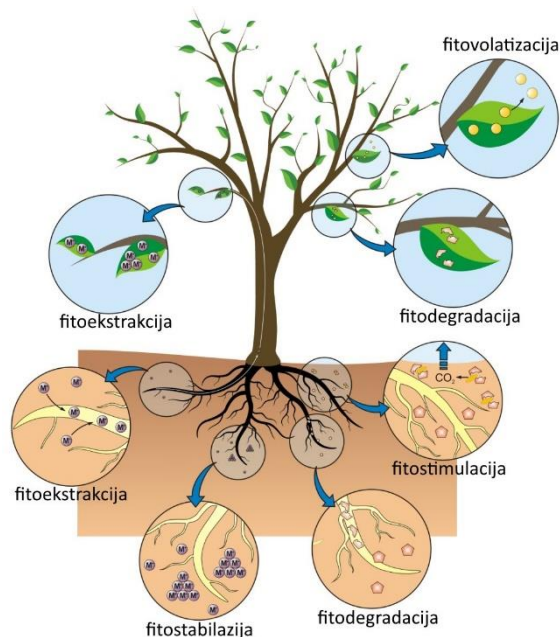
- 1) **Rizodegradacija ili fitostimulacija (Phytostimulation; Rhizodegradation)**: odvija se u blizini korijena (rizosfera) gdje biljke izlučuju različite organske tvari koje intenziviraju mikrobiološku aktivnost i tako pojačava mikrobiološku razgradnju štetnih tvari. Fitostimulacija je učinkovita u razgradnji ugljikovodika nafte (npr. PCB i PAH), a kad su uključene i neke vodene biljke (npr. *Ceratophyllum*) moguće je učinkovito razgrađivanje atrazina,
- 2) **Fitoakumulacija ili fitoekstrakcija (Phytoaccumulation ili Phytoextraction, ponekad se označavaju i kao fitosekvestracija ili fitostabilizacija, odnosno Phytosequestration ili Phytostabilization)**: korijenske izlučevine imobiliziraju onečišćivače, uglavnom bez njihove degradacije, pri čemu nastaju fitokemijski kompleksi (*kelati*) koje biljke usvajaju i oni završavaju u izdancima biljaka i lišću (Slika 2.). Metoda se prvenstveno koristi za detoksikaciju otpada koji sadrži metale, a iz biljne mase moguće ih je reciklirati. Generalno, lako su usvojivi (*bioraspoloživi*) metali i elementi iz tla kadmij, nikel, cink, arsen, selen i bakar, umjereno bioraspoloživi su kobalt, mangan i željezo, a nisu bioraspoloživi olovo, krom i uran, premda se njihova bioraspoloživost može se poboljšati dodatkom kelatnih tvari u tlo,
- 3) **Rizofiltracija i hidroponski sustavi za obradu vodenih tokova (Phytohydraulics)**: tehnika je slična *fitoakumulaciji*, ali biljke koje se koriste za čišćenje uzgajaju se u tlima visoke razine podzemne vode ili hidroponima, pri čemu je korijen biljaka uronjen je u inertni supstrat (pijesak i perlit i/ili vermikulit) s onečišćenom vodom. Ovakav se sustav može koristiti za *ex-situ* obradu podzemnih voda kad se podzemna voda crpi i koristi za navodnjavanje biljaka, a biljke i korijenje zasićeno kontaminantima se skuplja i zbrinjava na siguran način,



Slika 2. Mehanizam fitosekvestracije

uklanjanje onečišćenja u podzemnoj vodi koja se nalazi u kontaktu s korijenom. Drveće djeluje kao prirodna pumpa koja korijenom usvaja onečišćenu vodu i zadržava kontaminante. Primjerice, topola (*Populus*) usvoji dnevno do 115 l vode, a pamučno drvo (*Ceiba pentandra*) i do 1325 l/dan (Slika 3.),

- 5) **Fitohlapljivost (Phytovolatilization)**: proces u kojem biljke usvajaju kontaminiranu vodu i u transpiracijskoj struji izbacuju ih u atmosferu preko lista, odnosno pući,
- 6) **Fitodegradacija**: u tom procesu biljke zapravo metaboliziraju i uništavaju usvojene kontaminante unutar biljnih tkiva i korijena. Velik broj organskih spojeva može se ukloniti iz tla ovom metodom, uključujući organska otapala u podzemnoj vodi, naftu i različite toksične aromatske spojeve, uključujući i aromatične spojeve u zraku.



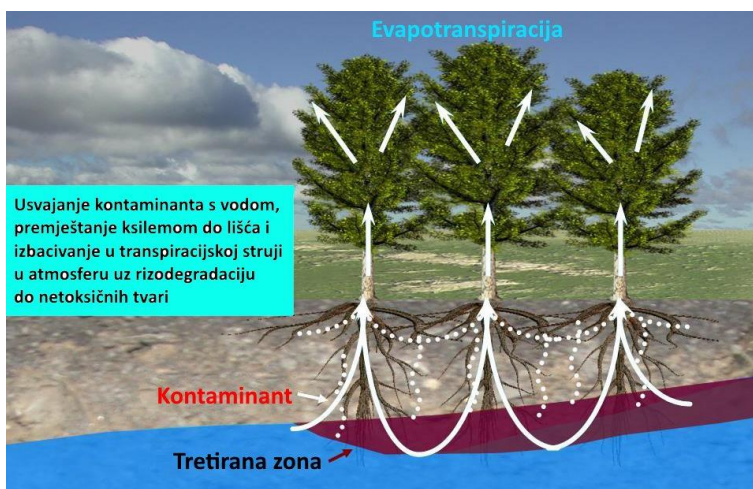
Slika 1. Shematski prikaz fitoremedijacijskih strategija.

hidroponima, pri čemu je korijen biljaka uronjen je u inertni supstrat (pijesak i perlit i/ili vermikulit) s onečišćenom vodom. Ovakav se sustav može koristiti za *ex-situ* obradu podzemnih voda kad se podzemna voda crpi i koristi za navodnjavanje biljaka, a biljke i korijenje zasićeno kontaminantima se skuplja i zbrinjava na siguran način,

4) **Fitohidraulika (Hydraulic Control)**: koristi biljke s dubokim korijenjem, najčešće drveće (npr. topola), za

Fitoremedijacija može biti vrlo efikasna tehnologija za uklanjanje štetnih elemenata iz tla, ali i dalje ostaje problem kamo s korištenim biljkama koje sadrže visoku koncentraciju kontaminanata i opasne su za dalju uporabu. Stoga [fitoekstrakcija ima više ograničenja](#) jer je ograničena na relativno plitku korijensku zonu, biljke *hiperakumulatori* često sporo rastu, a njihovu biomasu potrebno je dugoročno sigurno zbrinuti. Također, biljke *hiperakumulatori* mogu biti invazivne vrste. [U većini slučajeva bioremedijacija ograničena je na plitka tla](#), potoke i podzemne vode jer korijenje biljaka često ne može doseći duboku podzemnu vodu pa tada duboka obrada (i rigovanje) može pomoći u premještanju teških metala i drugih kontaminanata bliže površini tla.

Biološka sanacija ne osigurava potpuno uklanjanje nekih kontaminanata (npr. teški metali mogu graditi vrlo stabilne neraspoložive organometalne komplekse; *kelati*), a jedan dio štetnih tvari može perkolirati dublje iz onečišćenog tla, sve do podzemne vode.



Slika 3. [Fitohidraulika u funkciji rizodegradacije i snižavanja razine podzemne vode](#)

Ograničenja bioremedijacije ipak nisu takva da se ova sjajna sposobnost biljaka ne iskoristi te se i dalje intenzivno istražuju bioremedijacijske tehnike, ali se već sve češće i praktično koriste u detoksikaciji zemljišta nakon onečišćenja naftom, različitim toksičnim tvarima, teškim metalima, kao i drugim kemijskim elementima kao što su radionuklidi, arsen, selen i dr., za razgradnju različitih organskih tvari (muljeva, gradskog otpada i dr.), odnosno općenito za sanaciju onečišćenog okoliša. Naime biološke tehnike sanacije zemljišta, osim što su jeftine, vrlo su efikasne u obradi otpada i sprječavanju zagađenja. Neke bakterije efikasno se mogu uzgajati na različitim otpadnim tvarima te se stimulacijom već prisutnih sojeva u tlu ili unosom agresivnih GMO bakterija, otpad može brzo i učinkovito transformirati u bezopasne proizvode. [Stoga je bioremedijacija, odnosno biološki način detoksikacije okoliša od teških metala, organskih spojeva, npr. nafte, radionuklida, pesticida, plastike itd., danas područje sve većeg znanstvenog interesa](#) jer se nekoristan i štetan otpad može jeftino ukloniti iz okoliša ili pretvoriti u biogoriva za pokretanje elektro generatora. Mikroorganizmi se mogu potaknuti i na proizvodnju enzima potrebnih za sintezu nafte, plastike, različitih lijekova i drugih farmaceutskih proizvoda, građevinske materijale i dr.