



Co-funded by
the European Union

Looduse puhastusmeeskond: kuidas mikroobid „söövad“ saastet



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."

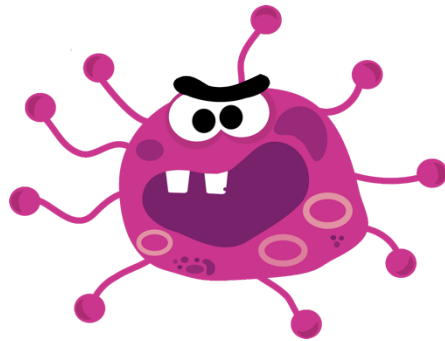




SISUKORD

· Sissejuhatus.....	2
· Mis on mikroobid?.....	3
· Mikroobide tähtsus.....	4
· Reostusprobleemid.....	5
· Mikroobide roll keskkonnareostuse puhastamisel.....	7
· Sissejuhatus biopuhastusse.....	10
· Kuidas mikroobid saasteaineid "söövad" ehk lagundavad.....	11
· Mikroobse bioremediatsiooni näited.....	12
· Mikroobide kõrvaldamine.....	13
· Loomulik sumbumine.....	16
· Juhtumiuuringud.....	17
· Biotehnoloogia ja tulevik.....	18
· Liitreaalsus tegevuses: mikroobide puhastamise uurimine.....	19
· AR-i rakendamine mikroobide biopuhastusalases hariduses.....	20
· Kokkuvõte.....	22
· Ressursid.....	24





Õppeteema üldine teema	Mikroobide biopuhastus ja keskkonnainnovatsioon
Õppeüksuse täpne nimetus	Looduse koristusmeeskond: kuidas mikroobid söövad reostust
Sihtkasutaja vanus	14–18 aastat
Õppija eeltingimused	Bioloogia, keemia ja keskkonnateaduse põhiteadmised
Õppeüksuse kirjeldus	See üksus tutvustab biopuhastuse kontseptsiooni, näidates, kuidas mikroobe kasutatakse saastunud keskkondade puhastamiseks. Õpilased uurivad interaktiivse sisu ja liitreaalsuse simulatsioonide kaudu mikroobide mitmekesisust, reostuse tüüpe ja puhastusmeetodeid.
Asjaomane teema	Bioloogia, keemia, keskkonnateadus, tehnoloogia
Märksõnad	Mikroobid, biopuhastus, reostus, jätkusuutlikkus, liitreaalsus, innovatsioon, keskkonnateadus
Põhioskused, võimed ja teadmised, mida saab omandada	Mikroobide rolli mõistmine reostuse puhastamisel, reaalsete biopuhastusjuhtumite hindamine, liitreaalsuse tööriistade rakendamine mikroobide tegevuse visualiseerimiseks ja keskkonnaprobleemidele lahenduste väljatöötamine.
Kasutatud ressursid ja didaktilised vahendid	Teadusartiklid, liitreaalsuse platvormid (Assemblr EDU, Merge Cube), interaktiivsed simulatsioonid, juhtumiuuringute dokumendid, mikrobioloogilised andmebaasid
Hindamiskriteeriumid ja hindamine	Hindamine interaktiivsete AR-põhiste simulatsioonide, mikroobide funktsioonide





	mõistmise, juhtumianalüüsi ja õppija loodud visuaalsete selgituste või projektide abil
--	--

Sissejuhatus

Biopuhastus on paljulubav lahendus võitluses keskkonnareostuse vastu. Oma olemuselt kasutab see mikroorganismide loomulikke võimeid saastunud alasid puhastada, pakkudes uuenduslikku ja sageli ökonoomset lähenemisviisi mõnele tänapäeva kõige kriitilisemale ökoloogilisele probleemile. Baktereid, seeni või taimi kasutades kujundab biopuhastus ümber seda, kuidas me saasteainetega, alates naftareostusest kuni mürgiste raskmetallideni, toime tuleme, kuna meie arusaam nendest looduslikest süsteemidest aina kasvab.





Kontseptsioon on suhteliselt lihtne: mikroorganismidel, pisikestel, kuid võimsatel eluvormidel, on ainulaadsed ainevahetusrajad, mis võimaldavad neil lagundada või muuta kahjulikke aineid vähem toksilisteks ühenditeks. Saastunud keskkonnas saab neid organisme soodustada või täiendada, et kiirendada saasteainete lagunemist, aidates seeläbi taastada ökoloogilist tasakaalu.

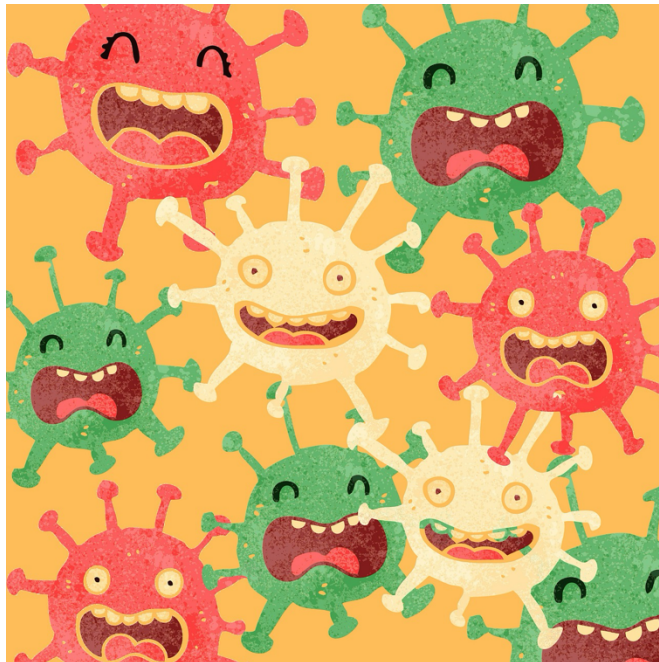
Tuntud näide on naftareostuse likvideerimine. 1989. aasta Exxon Valdezi katastroof tõi esile selliste intsidentide katastroofilised tagajärjed, tekitades samal ajal huvi biopuhastuse vastu. Teadlased on avastanud, et teatud bakterid, näiteks *Alcanivorax borkumensis*, toituvad looduslikult toornaftas leiduvatest süsivesinikest. Nende mikroobide viimine lekkekohtadesse või nende kasvu soodustamine lisatud toitainetega saab oluliselt parandada puhastustöid, vähendades nii kohest kui ka pikaajalist keskkonnakahju.

Lisaks naftale on biopuhastus praktiline ka raskmetallide reostuse korral. Tööstustegevus jätab sageli maha ohtlikke elemente, nagu plii, elavhõbe ja kaadmium, mis kujutavad endast ohtu nii ökosüsteemidele kui ka inimeste tervisele. Teatud bakterid ja seened, mida tuntakse biosorbentidena, suudavad neid metalle oma rakustruktuuridega siduda, muutes need vähem toksiliseks ja keskkonnast kergemini eraldatavaks (Hartman, 2024).

Mis on mikroobid?

Mikroobid ehk mikroorganismid on mikroskoopilised eluvormid, mis on palja silmaga tavaliselt nähtamatud. Nad on uskumatult mitmekesised ja asustavad praktiliselt iga keskkonda Maal, alates süvamere lõõridest kuni inimkehani. Mikroobidel on oluline roll ökosüsteemides, inimeste tervises ja erinevates tööstusprotsessides.





Peamised

1. **Bakterid:** ilma Neil on ainevahetusvõime. Bakterid on kõikjal levinud, neid leidub mullas, vees ja osana inimese mikrobiomist. Kuigi mõned bakterid on patogeensed, on paljud kasulikud, aidates kaasa sellistele protsessidele nagu seedimine ja toitainete ringlus.
2. **Arhed:** Arhed on samuti üherakulised prokarüootid, kes erinevad bakteritest oma geneetilise ülesehituse ja membraanide koostise poolest. Nad on tuntud oma edenemise poolest äärmuslikes keskkondades, nagu kuumaveeallikad ja soolajärved, kuid neid leidub ka levinumates elupaikades, sealhulgas inimese soolestikus. Arhed mängivad rolli sellistes protsessides nagu metaani tootmine ja lämmastikuringlus (https://et.wikipedia.org/wiki/Arhea?utm_source=chatgpt.com).
3. **Seened:** Sellesse rühma kuuluvad pärmid, hallitusseened ja seened. Seened on eukarüootsed organismid (tuumaga), mis võivad olla ühe- või mitmerakulised. Nad on ökosüsteemides olulised lagundajad, lagundades orgaanilist ainet, ning neil on rakendusi toidutootmises ja meditsiinis.
4. **Protistid:** Mitmekesine rühm enamasti üherakulisi eukarüootseid organisme. Protistide hulka kuuluvad algloomad ja teatud tüüpi vetikad. Nad elavad erinevates keskkondades, alates mageveest kuni meresüsteemideni, ning mängivad rolli toitainete ringluses ja on osa toiduvõrgust.
5. **Viirused:** rakulised üksused, mis koosnevad geneetilisest materjalist (DNA või RNA), mis on ümbritsetud valkkestaga. Viirused vajavad paljunemiseks peremeesrakku ja on teadaolevalt haiguste põhjustajad inimestel, loomadel ja taimedel. Kuigi kõiki definitsioone ei peeta "elavaks", uuritakse neid mikrobioloogias põhjalikult (https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com).

mikroobide tüübid:

üherakulised organismid
tuumata (prokarüootid).
väga erinev kuju ja





Mikroobide tähtsus

Mikroorganismid on Maal eluks üliolulised, mängides olulist rolli keskkonnaprotsessides, inimeste tervises ja biotehnoloogias.

1. Keskkonnavaline tähtsus

- Toitainete ringlus: Mikroobid on biogeokeemilistes tsüklites, sealhulgas lämmastiku-, süsiniku- ja väävlitsüklites, olulised, hõlbustades nende elementide muundumist ja liikumist ökosüsteemides (preprints.org).
- Biopuhastus: Teatud mikroobid suudavad lagundada keskkonnasaasteaineid, näiteks süsivesinikke ja raskmetalle, mistõttu on nad saastunud alade puhastamisel hindamatu väärtusega.

2. Inimeste tervis

- Mikrobioomi funktsioon: Inimese mikrobiom, mis koosneb triljonitest mikroobidest, on lahutamatu osa seedimisest, immuunsüsteemi arengust ja patogeenide eest kaitsmisest. Selle mikrobiokoosluse häired on seotud mitmesuguste haigustega (pmc.ncbi.nlm.nih.gov).
- Haiguste ennetamine ja ravi: mikrobioomi mõistmise edusammud on viinud uudsete ravimeetoditeni, sealhulgas mikrobioomi moduleerimiseni haiguste raviks või ennetamiseks (loodus.com).

3. Biotehnoloogilised rakendused

- Tööstuslikud protsessid: Mikroobe rakendatakse biotehnoloogias antibiootikumide, ensüümide, biokütuste ja kääritatud toiduainete tootmiseks. Nende ainevahetusvõimet kasutatakse ära erinevates tööstusharudes.
- Geenitehnoloogia: Geneetiliselt muundatud mikroobid arendatakse kindlate ülesannete jaoks, näiteks terapeutiliste ühendite tootmiseks või keskkonnasaasteainete lagundamiseks, mis näitab nende mitmekülgset biotehnoloogias.





Reostusprobleemid

Keskkonnareostuse tüübid



Fig 1.Environmental pollution, source:

https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de

Õhusaaste

Õhusaaste viitab kahjulike ainete, sealhulgas gaaside, tahkete osakeste ja bioloogiliste molekulide olemasolule Maa atmosfääris, mis võivad ohustada inimeste tervist ja keskkonda. Levinud saasteained, nagu süsinikmonooksiid, lämmastikoksiidid, vääveldioksiid, osoon ja tahked osakesed, pärinevad sageli fossiilkütuste põletamisest transpordis, tööstuses ja energiatootmises. Tagajärjed ulatuvad hingamisteede haigustest ja südame-veresoonkonna probleemidest kuni keskkonna halvenemiseni, nagu happevihmad ja globaalne soojenemine.

Veereostus

Veereostus on veekogude, sealhulgas jõgede, järvede, ookeanide ja põhjavee saastumine, mis muudab need inimestele ohtlikuks ja kahjulikuks vee-elustikule. Tavaliselt on selle põhjuseks selliste saasteainete nagu tööstusjäätmete, reovee, pestitsiidide, plasti ja raskmetallide heide veeallikatesse. See reostus põhjustab mitmeid probleeme, sealhulgas vees levivaid haigusi, ökosüsteemide hävimist ja joogivee kättesaadavuse vähenemist.

Pinnase reostus

Pinnase reostus hõlmab maa kvaliteedi halvenemist mürgiste kemikaalide, raskmetallide ja





jäätmete kaudu, mis häirivad mulla tervist ja tootlikkust. Allikate hulka kuuluvad tööstustegevus, põllumajanduskemikaalid, ebaõige jäätmete kõrvaldamine ja kaevandustegevus. Saastunud pinnas võib mõjutada toiduohutust, taimede kasvu ja põhjavee kvaliteeti ning kujutada endast otsest ohtu inimeste ja loomade tervisele.

Mürasaaste

Mürasaaste on keskkonnas esinev liigne või häiriv müratase, mis häirib normaalset tegevust ja heaolu. See pärineb peamiselt liiklusest, ehitusest, tööstusprotsessidest ja linnaarendusest. Krooniline kokkupuude kõrge müratasemega on seotud paljude terviseprobleemidega, sealhulgas kuulmislanguse, unehäirete, suurenenud stressitaseme ja kognitiivse soorituse halvenemisega, eriti lastel.

Valgusreostus

Valgusreostus viitab liigsele või valesti suunatud tehisvalgusele, mis helendab öötaevast ja häirib loomuliku pimedust. See tekib peamiselt tänavavalgustusest, reklaamidest, hoonetest ja avalikest ruumidest linnapiirkondades. Valgusreostus mitte ainult ei varja tähtede nähtavust, vaid häirib ka eluslooduse käitumist ja inimeste ööpäevaseid rütme, põhjustades ökoloogilist tasakaalutust ja unega seotud terviseprobleeme.

Termiline reostus

Termiline reostus tekib siis, kui tööstused juhivad kuuma vett või õhku looduskeskkonda, eriti veesüsteemidesse, muutes temperatuuri tasakaalu. Elektrijaamad, tootmisüksused ja rafineerimistehased on tüüpilised põhjustajad. Kõrgem temperatuur vähendab vee hapnikusisaldust, kahjustab tundlikke veeorganisme ning võib põhjustada bioloogilise mitmekesisuse kadu ja vetikate õitsemist, häirides veeökosüsteeme.

Radioaktiivne reostus

Radioaktiivne reostus on keskkonna saastumine radioaktiivsete ainetega kas juhuslike keskkonda sattumiste, jäätmete ebaõige kõrvaldamise või looduslike sündmuste kaudu. Levinud allikate hulka kuuluvad tuumaelektrijaamad, meditsiini- ja uurimisasutused ning varasemad tuumarelvade katsetused. Selline reostus kujutab endast pikaajalist ohtu inimeste tervisele ja ökosüsteemidele, mille mõjude hulka kuuluvad vähk, geneetilised mutatsioonid ja püsiv keskkonnareostus.

Mikroobide roll keskkonnareostuse puhastamisel





Mikroorganismidel on keskkonnareostuse leevendamisel oluline ja loomulik roll bioremediatsioonis. Tuntud protsessi kaudu, mille käigus bakterid, seened, vetikad või arhed lagundavad, muundavad või immobiliseerivad kahjulikke saasteaineid. Need mikroobid on väga kohanemisvõimelised ja võivad areneda erinevates keskkondades, sealhulgas saastunud õhus, vees ja pinnases. Veekogudes on bakterid, näiteks *Pseudomonas* ja vetikate samaseid *Harilik klorell* võib lagundada õliühendeid, eemaldada raskmetalle ja absorbeerida liigseid toitaineid, aidates taastada vee kvaliteeti (UNEP, 2021). Pinnasesaaste puhastamisel lagundavad teatud mikroobid keerulisi süsivesinikke, pestitsiide ja isegi raskmetalle, samas kui seened, näiteks *Phanerochaete chrysosporium* lagundavad püsivaid orgaanilisi saasteaineid (FAO, 2021). Õhupuhastussüsteemid, sealhulgas biofiltrid ja bioskraberid, kasutavad mikroobide kooslusi lenduvate orgaaniliste ühendite ja ammoniaagi eemaldamiseks tööstuslikest heitgaasidest (EPA, 2023). Lisaks on mikroobide biotehnoloogia edusammud võimaldanud luua mikroobitüvesid, mis on suunatud spetsiifilistele saasteainetele suurema efektiivsusega. Mikroobse puhastamise ökoloogiline kasu mitte ainult ei vähenda sõltuvust keemilistest või mehaanilistest sekkumistest, vaid edendab ka säästvat keskkonnajuhtimist. Sellisena peetakse mikroobe üha enam olulisteks liitlasteks reostuse vastases võitluses ja pikaajalise ökoloogilise taastamise saavutamisel.

Õhusaaste puhastamise meetodid

Õhusaastet leevendatakse mehaanilise filtreerimise, keemilise neutraliseerimise ja üha enam ka bioloogiliste meetodite abil. Sellised tehnoloogiad nagu elektrostaatilisid filtrid ja skraberid eemaldavad tööstusheidetest tahkeid osakesi ja gaase, samas kui katalüüsmuundurid vähendavad sõidukite saasteaineid. Biofiltratsioonisüsteemid, mis kasutavad mikroobikooslusi õhus levivate toksiinide, näiteks lenduvate orgaaniliste ühendite ja vääliühendite, metaboliseerimiseks, pakuvad jätkusuutlikku alternatiivi keemilisele töötlemisele. Need bioloogilised süsteemid on eriti tõhusad reovee ja kompostimisjaamade lõhnaainete töötlemisel (Deshusses, 1997).





Veereostuse puhastusmeetodid

Veereostuse puhastamine hõlmab mitmeastmelisi puhastusprotsesse, mis ühendavad füüsikalise eraldamise, keemilise desinfitseerimise ja bioloogilise lagunemise. Setitamine ja membraanfiltrimine eemaldavad tahked ained, samas kui osoonimine ja koagulatsioon kõrvaldavad patogeene ja raskmetalle. Bioloogilised töötused, nagu aktiivmuda ja biokilereaktorid, tuginevad mikroobide aktiivsusele orgaanilise aine ja toitainete seedimiseks. Samuti on uuritud mikroobseid kütuseelemente, mis võimaldavad samaaegselt puhastada reovett ja toota elektrit, demonstreerides uuenduslikke kaheotstarbelisi rakendusi (Logan et al., 2006).

Pinnasereostuse puhastusmeetodid

Pinnasereostuse puhastamisel kasutatakse selliseid strateegiaid nagu kaevamine, keemiline immobiliseerimine ja bioloogilised protsessid. Biopuhastusmeetodid on eriti tõhusad, kasutades kohalikke või sissetoodud mikroobe nafta süsivesinike, lahustite ja pestitsiidide lagundamiseks. Fütopuhastus, mida täiustavad risosfääriga seotud mikroobid, pakub rohelist lahendust, soodustades saasteainete omastamist või lagunemist taimede ja mikroobide vastastikmõju kaudu. Hiljutised uuringud rõhutavad mikroobide konsortsiumide edu polütsükliliste aromaatsete süsivesinike (PAH-ide) lagundamisel keerukalt saastunud muldades (Meckenstock jt, 2015).

Mürasaaste vähendamise meetodid

Erinevalt keemilistest saasteainetest ei saa mürareostust eemaldada, kuid seda tuleb planeerimise ja projekteerimise abil leevendada. Strateegiate hulka kuuluvad akustilised barjäärid, heli neelavad ehitusmaterjalid ja linna rohealad, mis vähendavad ümbritsevat mürataset. Taimestik ja pinnas, mis saavad kasu tervislikest mikroobikooslustest, mängivad müra vähendamisel passiivset, kuid toetavat rolli, pehmendades pindu ja neelates helienergiat. Linnametsade kujundamise uuring näitas, et tiheda taimestiku integreerimine võib linnakeskkonnas müra vähendada kuni 10 dB võrra (Fang & Ling, 2003).

Valgusreostuse vähendamise meetodid

Valgusreostuse vähendamine hõlmab nutikat valgustusdisaini ja kogukonna planeerimist, et minimeerida ebavajalikku kunstlikku valgustust. Sellised võtted nagu täieliku valguslähendusega valgustite, liikumisandurite ja sooja värvi LED-ide kasutamine aitavad piirata taevahelendust ja pimestamist. Kuigi mikroobide tegevus ei vähenda otseselt valgusreostust, on kunstliku valguse minimeerimine kasulik öistele ökosüsteemidele, mis sõltuvad mikroobiderikastest muldadest ja looduslikest valgustsüklitest. Uuringud näitavad, et kunstlik valgustus häirib öiseid tolmeldamisvõrgustikke ja mikroobide aktiivsust mullakoorikutes (Knop jt, 2017).





Termilise saastumise leevendamise meetodid

Soojusreostust, eriti tööstusheidetest veekogudesse, hallatakse insener-jahutussüsteemide, näiteks jahutustiidide ja -tornide abil. Tähtsates looduslikes süsteemides, näiteks tehismärgalades, kasutatakse termiliselt taluvaid mikroobe mitte ainult temperatuuri reguleerimiseks, vaid ka kuumutatud heitvees sisalduvate saasteainete lagundamiseks. Vymazali (2011) uuring rõhutab tehismärgala kasutamist toitainete eemaldamiseks ja temperatuuri alandamiseks reovee puhastamisel.

Radioaktiivse reostuse puhastusmeetodid

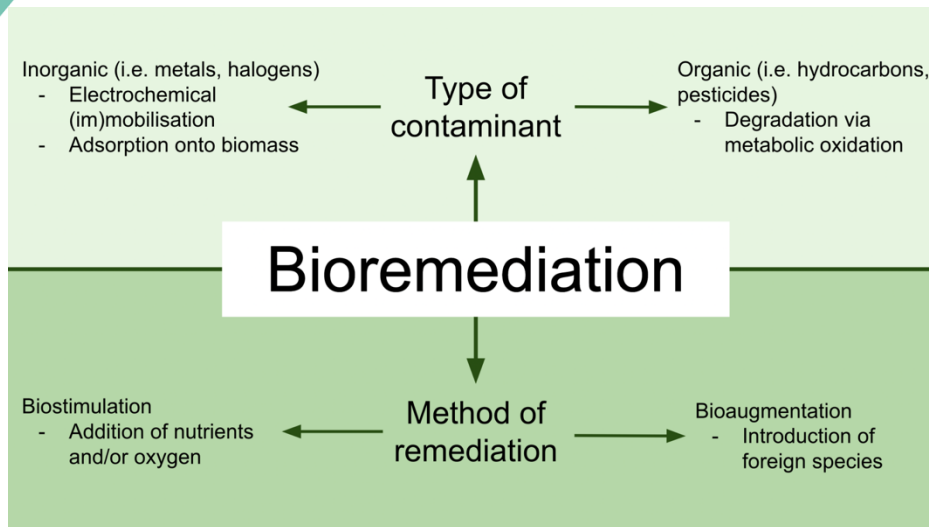
Radioaktiivse saastumise kõrvaldamine hõlmab ohjeldamist, klaasistamist ja üha enam bioloogilist stabiliseerimist. Mõned mikroobid, näiteks *Deinococcus radiodurans* ja uraani redutseerivad *Geobakter*liigid, on kiirguskindlad ja võivad muuta radionukliidide lahustuvust või liikuvust. Neid organisme uuritakse nende rolli osas pikaajalises biopuhastuses tuumajäätmete hoidlates. Fredricksoni jt (2004) hiljutine uuring on näidanud paljulubavat uraani mikroobset redutseerimist anaeroobsetes tingimustes, mis piirab selle liikuvust põhjavees.

Table 1. Environmental Pollution Types and Associated Treatment Techniques

Reostuse tüüp	Mikroobide puhastusmeetod	Näide mikroobidest
Õhk	Biofiltratsioon, bioskraberid	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Aspergillus</i>
Vesi	Aktiveeritud muda, bioaugmentatsioon, vetikad	<i>Nitrosomonas</i> , <i>P. putida</i> , <i>Chlorella</i>
Muld	Bioremediatsioon, mükoremediatsioon	<i>Phanerochaete</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Rhizobium</i>
Müra	Otsest rolli ei ole	—
Valgus	Otsest rolli ei ole	—
Termiline	Kaudsed (termofiilsed mikroobid)	<i>Thermus aquaticus</i> , <i>B. stearothermophilus</i>
Radioaktiivne	Eksperimentaalne (kiirgusresistentsed mikroobid)	<i>Deinococcus radiodurans</i> , radiotroopsed seened



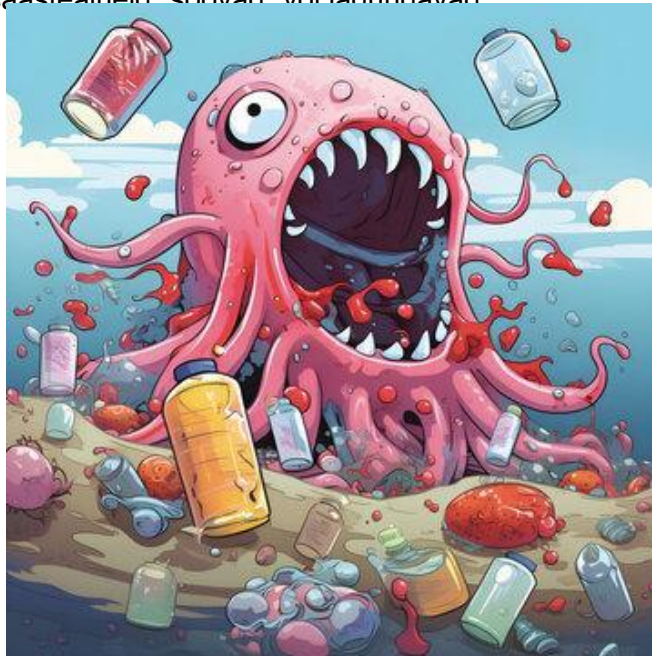
Sissejuhatus bioremediatsiooni

Fig 2. Bioremediation, source: <https://tinyurl.com/pbdyp7a>

Biopuhastus on jätkusuutlik ja bioloogiliselt juhitud lähenemisviis, mis kasutab elusaid mikroorganisme, peamiselt baktereid, seeni, vetikaid ja arhesid, keskkonna saasteainete lagundamiseks, detoksitseerimiseks või vähem kahjulikuks muutmiseks. Kuigi traditsiooniliselt seostatakse biopuhastust pinnase reostusega, on see osutunud tõhusaks laias spektris keskkonnakontekstides, sealhulgas saastunud vees, saastunud õhus ja isegi radioaktiivsete jäätmete leiukohtades. Näiteks veesüsteemides kasutatakse nafta lagundavaid baktereid ja toitaineid tarbivaid vetikaid naftareostuse ja eutroofsete järvede puhastamiseks. Õhu puhastamisel kasutavad biofiltrid mikroobseid biokilesid tööstuslike heitgaaside lenduvate orgaaniliste ühendite (VOC) ja väävlirikaste gaaside püüdmiseks ja biolagundamiseks. Lisaks on radioaktiivne biopuhastus arenev valdkond, kus ekstremofiilsed mikroobid nagu *GeobakterjaDeinococcus radiodurans* uuritakse nende võimet immobiliseerida või muuta radioaktiivseid elemente. Mikroobide konsortsiumide ja geneetiliselt muundatud tüvede üha suurenev kasutamine on veelgi laiendanud biopuhastuse potentsiaali keerukate ja tõrksate saasteainete puhul. Singhi ja Strongi (2022) sõnul on omika tehnoloogiate ja bioinformaatika tööriistade integreerimine oluliselt suurendanud mikroobsete sekkumiste spetsiifilisust, kiirust ja skaleeritavust keskkonna puhastamisel. Kuna globaalsed reostusprobleemid süvenevad, pakub biopuhastus odavat, väikese energiatarbega ja ökoloogiliselt taastavat alternatiivi tavapärastele keemilistele ja mehaanilistele puhastusmeetoditele.



Kuidas mikroobid saasteaineid "söövad" või lagundavad



Mikroorganismid saasteaineid kaudu, kus energia-, süsiniku-bioloogiline kui mikroobid muudavad aineid, muutes vähem kahjulikeks

süivesinikke lagundavad bakterid, nagu *Pseudomonas*, *Alcanivorax* ja *Mükobakter*. Suudavad aeroobse hingamise käigus õli komponente metaboliseerida, oksüdeerides neid süsinikdioksiidiks ja veeks. Anaeroobsetes tingimustes saavad teatud bakterid kasutada saasteaineid ka alternatiivsete elektronaktseptoritena, mis võimaldab neil lagundada ühendeid nagu nitraadid, klooritud lahustid või raskmetallid.

Seened, näiteks *Phanerochaete chrysosporium* on võimelised lagundama püsivaid orgaanilisi saasteaineid, nagu pestitsiidid ja värvained, tootes ligninolüütilisi ensüüme, mis lagundavad keerukaid molekule väiksemateks fragmentideks. Mõned mikroobid muudavad isegi raskmetallid redoksreaktsioonide kaudu lahustumatuteks vormideks, immobiliseerides need pinnases või settes. Keskkonnategurid, sealhulgas pH, temperatuur, hapniku kättesaadavus ja kaas-substraatide olemasolu, mõjutavad neid protsesse. Ghosal jt (2016) hiljutiste leidude kohaselt toimivad mikroobikooslused sageli tõhusamalt konsortsiumidena, kus erinevad liigid töötavad sünergiliselt, et lagundada keerulisi saasteainete segusid tõhusamalt kui üksikud tüved. Need bioloogilised mehhanismid on nii looduslike kui ka tehislike biopuhastussüsteemide keskmes, muutes mikroobid asendamatuks teguriks keskkonnareostuse säästval töötlemisel.

on võimelised lagundama ainevahetusprotsesside saasteained toimivad või toitainelikkatena. See lagunemine toimub siis, eritavad ensüüme, mis keemiliselt mürgiseid need lihtsamateks ja ühenditeks. Näiteks

Mikroobse bioremediatsiooni näited

Pseudomonas ja õli lagunemine

Perekonna liigid *Pseudomonas*, eriti *Pseudomonas aeruginosa*, on tuntud oma võime poolest lagundada toornaftas leiduvaid süivesinikke. Need bakterid toodavad biopindaktiivseid aineid, mis emulgeerivad õli, suurendades selle bioaadavust mikroobseks lagundamiseks. Hiljutised uuringud on näidanud, et kooskultiveerimine *P. aeruginosa* koos *Bacillus subtilis* suurendab toornafta lagundamise efektiivsust, saavutades kuni 63,05% õlikomponentide eemaldamise. pmc.ncbi.nlm.nih.gov/frontiersin.org





Ideonella sakaiensis ja plastikust söömise võime

Ideonella sakaiensis on bakter, mis on võimeline lagundama polüetüleentereftalaati (PET), mis on tavaline plastik, mida kasutatakse pudelites ja pakendites. See eritab ensüümi nimega PETase, mis lagundab PETi selle monomeerideks, tereftaalhappeks ja etüleenglükooliks, mida bakter seejärel kasvuks kasutab. Hiljutised uuringud on keskendunud PETase efektiivsuse suurendamisele geenitehnoloogia abil, et parandada plastiku lagunemiskiirust. et.wikipedia.org

Geobakterite liigid ja metallide puhastamine

Perekonna liikmed *Geobakter*, näiteks *Geobacter metallireducens*, on tuntud oma võime poolest vähendada ja immobiliseerida raskmetalle, sealhulgas uraani ja kroomi, saastunud keskkonnas. Need bakterid kannavad oma ainevahetusprotsesside käigus elektrone metalliioonidele, muutes lahustuvad toksilised metallid lahustumatuteks vormideks, mis sadestuvad lahusest välja, vähendades seeläbi nende liikuvust ja biosaadavust.

Mitmekesised biopuhastusmeetodid

Biopuhastust saab kasutada mitmel viisil, igaüks erinevate saasteainete ja kohtade jaoks:

- Fütoremediatsioon – taimed aitavad puhastada pinnast, vett ja õhku saasteainetest.
- Mikroobide puhastamine – mikroobid lagundavad saasteaineid ja muudavad need ohutumateks aineteks.
- Mükoremediatsioon – seeni kasutatakse paljude saasteainete puhastamiseks.
- Biomanipulatsioon – loomad, nagu kalad, aitavad puhastada saastunud vett.

Need meetodid pakuvad keskkonnaprobleemide lahendamiseks palju võimalusi. Need näitavad, kuidas loodus saab aidata meil koristada

(<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>).

Table 2. Bioremediation Techniques

Bioremediatsiooni tehnika	Kirjeldus	Näited
Fütoremediatsioon	Taimed aitavad puhastada pinnast, vett ja õhku saasteainetest.	Rhizofiltratsioon, fütоекстраheerimine, fütostimulatsioon, fütostabiliseerimine
Mikroobide puhastamine	Mikroobid lagunevad ja muudavad saasteained ohutumaks.	Biostimulatsioon, bioaugmentatsioon, sisemine bioremediatsioon



Mükoremediatsioon	Seeni kasutatakse selliste saasteainete nagu raskmetallide ja õli puhastamiseks.	Raskmetallide, süsivesinike ja orgaaniliste ühendite seente poolt lagundamine
Biomanipulatsioon	Loomad, nagu kalad, aitavad puhastada saastunud vett.	Kalade kasutamine vetikate õitsemise tõrjeks ja vee kvaliteedi parandamiseks

Mikroobide kõrvaldamine

Mikroobid on mikroskoopilised organismid, mis liigitatakse kahte olulisse eluvaldkonda: arhed ja eubakterid. Need hõlmavad laia valikut eluvorme, sealhulgas primaartootjaid, kes muudavad valguse või keemilised ühendid energiaks, aga ka heterotroofe ja lagundajaid, kes vajavad elatist välistelt allikatelt. Oma olemuselt kõikjal levinud mikroobe leidub praktiliselt igas keskkonnas Maal.

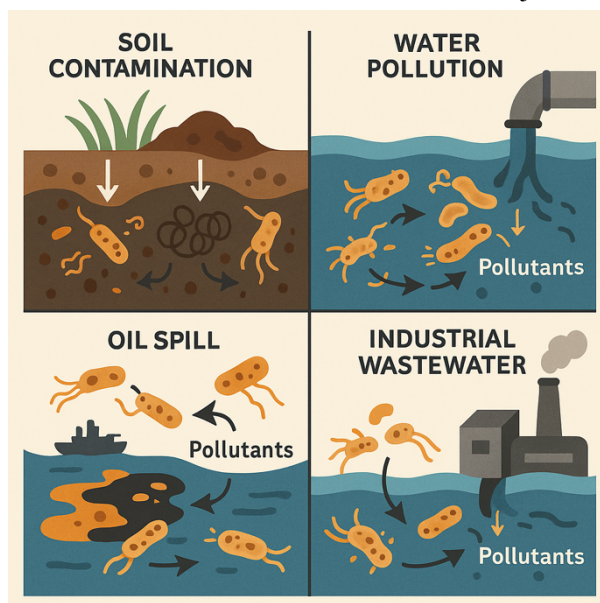
Need pisikesed organismid mängivad inimelus olulist rolli. Nad aitavad puhastada saasteaineid, rikastavad mullaviljakust, aitavad kaasa toidutehnoloogia arengule ja sünteesivad olulisi toitaineid, mis toetavad meie tervist. Enamasti eksisteerime mikroobidega koos, teadmata nende olemasolust.

Kuigi paljud mikroobid täidavad kaitsefunktsioone, näiteks varjavad meid kahjulike patogeenide eest, võivad teised avaldada kahjulikku mõju. Nad võivad põhjustada haiguspuhanguid, rikkuda toitu või aidata kaasa materjalide lagunemisele ja lagunemisele (Postgate, 2003).

Mikroobide ja tehnoloogiad

Mikroobne

mis kasutab mikroobide saasteainete muutmiseks ning



tervendamise strateegiad

puhastus on puhastusmeetodi tüüp, pinnases elavate loomulikke funktsioone mittetoksiliseks hõlmab tavaliselt bioaugmentatsiooni ja biostimulatsiooni. Oma madala lagundamisvõime

väikese koguse ja

tõttu on kohalikud mikroobid

on saasteainete toksilisuse tõttu pidevalt piiratud saasteainetega saastunud keskkonnas.

Bioaugmentatsioon hõlmab kohustuslike lagundavate bakterite kombineerimist tüvedega,



mis taluvad mitmeid raskmetalle (HM), et kõrvaldada sihtsaasteained (joonis 3). Biostimulatsioon parandab mulla kvaliteeti, lisades kasvuhormoone ja toitaineid kohaliku mikrofloora arengu soodustamiseks. Allpool käsitletakse aga mitmesuguseid mikroobseid tehnoloogiaid keskkonna parandamiseks.

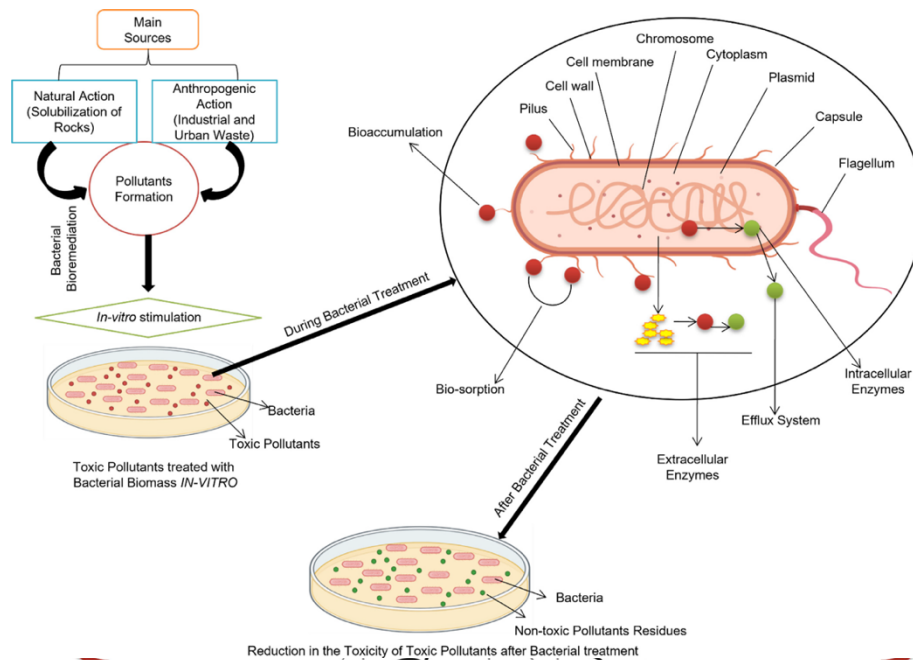
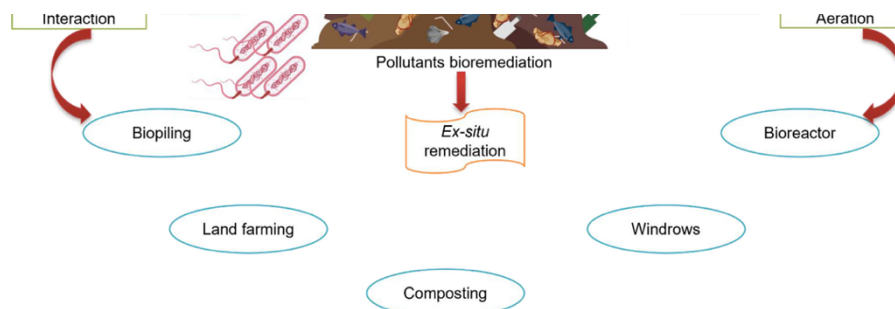


Figure 3-In vitro mechanisms of bacterial bioremediation in the polluted environment, source: Sharma et al., 2022



- Biopuhastuse kohapealsed meetodid

See puhastusmeede välistab vajaduse saastunud pinnase kaevandamise ja transportimise järele väljaspool asuvasse puhastusjaama, vähendades seeläbi pinnase häirimist, minimeerides abiliste ja kogukonna kokkupuudet toksiinidega ning potentsiaalselt alandades puhastuskulusid. Pinnase läbilaskvus, reostuse sügavus, temperatuur ja tõenäoline keemiline süvaleostumine on kõik olulised välinäitajad, mida arvestada (Fasani jt, 2018). Saasteainete kohapealne puhastamine on kujutatud joonisel 4.





Figure 4. Microbial bioremediation for the restoration of the contaminated sites via *in-situ* and *ex-situ* remediation, source: Sharma et al., 2022

Mikroobid ei lagunda olulisi saasteaineid, vaid mõjutavad nende füüsikalis-keemilisi omadusi (Sharma jt, 2021f; Sharma jt, 2021g). Puhastuskomponent hõlmab rakusisest akumulatsioonist, edasist rakukompleksi moodustumist ning oksüdatsiooni-redutseerimise või sadestamise arvutusi. Ohtlikke raskmetalle leidub laialdaselt tööstusprotsessides ja need on olulised keskkonnasaasteained. Molekulaarfiltratsioon metallide eraldamiseks madala kvaliteediga materjalidest oli lihtne ja edukas (Dhaliwal jt, 2020). *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Torulopsis bombicola*, *Desulfuromonas palmitatis* ja teised mikroorganismid võivad detoksifitseerida mehaanilisi jäätmeid, reoveeset ja puhastada raskmetallidega saastunud jääke ja pinnast (Priya ja Nagan, 2015). Mikroobide biomassil on mitmekesine biosorptsioonivõime ja liikide vahel esineb olulisi muutusi. Nende erakordne biosorptsioonivõime on tingitud suuremast mahu ja pinna suhtest ning tõenäolistest keerulise keemilise adsorptsiooni kohtadest, peamiselt rakumembraanidel (Li jt, 2019). Mikroorganismid on segakultuurides sageli vastupidavamad ja püsivad seal kauem. Seetõttu on põllukultuuride konsortsiumid metallide biosorptsiooni osas metaboolselt domineerivad ja sobivad seega laiaulatuslikuks kasutamiseks. Kuna iga mikroorganismi raku biosorptsioonivõime on erinev, sõltub see konkreetsetest töötlemis- ja testimistingimustest (Dhaliwal jt, 2020).

Loomulik sumbumine

Saasteained muundatakse biolagundamise käigus vähem ohtlikuks vormiks või immobiliseeritakse (loomulik nõrgenemine). Need muundumis- ja immobiliseerimismehhanismid on peamiselt põhjustatud mikroorganismide biolagundamise teel ja vähemal määral looduslikult esineva keemilise ja geoloogilise keskkonna sorptsiooni interaktsioonide kaudu. See mehhanism on saasteainele spetsiifiline ja on heaks kiidetud lähenemisviisina kütusekomponentide, näiteks BTEX-i (benseen, toluen, etüülbenseen ja ksüleen), töötlemiseks, kuid mitte paljude teiste klasside puhul (Ganiyu jt, 2022). Loodusliku nõrgenemise jaoks vajalik periood varieerub oluliselt sõltuvalt asukoha asjaoludest. Paljud saastunud alad ei

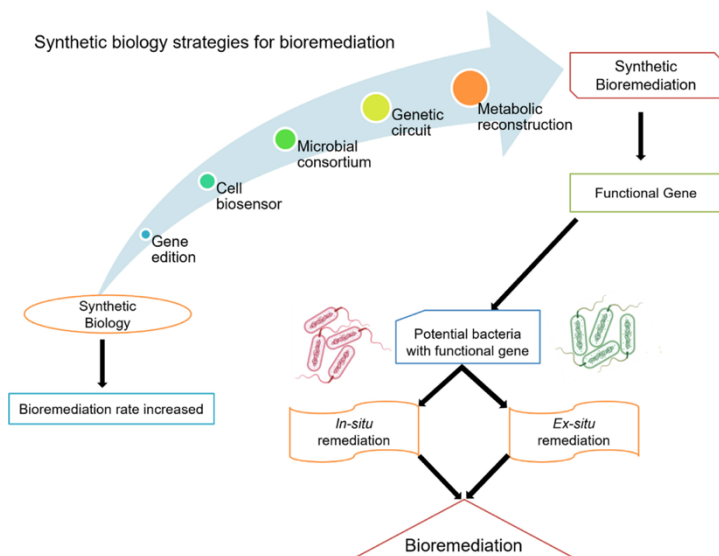




pruugi vajada ulatuslikku puhastusstrateegiat ning bionõrgendamine on nii kulutõhus kui ka tõhus. Tegelikult on Ameerika Ühendriigid edukalt kasutanud mitmesuguseid biopuhastusmeetodeid hindadega, mis on umbes 80–90% odavamad kui keemilistel ja füüsikalistel põhimõtetel põhinevad alternatiivsed puhastustehnoloogiad. Järeldustest selgub, et puhastuskulud vähenevad oluliselt, minimaalselt häirides asukohta. Tööstuslikud ja keskkonnabiotehnoloogiad soosivad samuti uudeid lähenemisviise, mis viivad protsessideni, mis kasutavad puhtaid tehnoloogiad, et maksimeerida toodangut ja tekitada vähem jääke (Rhea ja Clark, 2022). Kuna enamik muldasid on oligotroofsed või neil puuduvad vajalikud mikroobid, muutub ainuüksi biolagunemine paljudel juhtudel ebapiisavaks ja aeganõudvaks.

Need geneetilised ja metaboolse inseneritöö meetodid võivad bioremediatsiooni protsessis abiks olla (Liang jt, 2020). Geeni redigeerimiseks ja metaboolseks inseneritööks on saasteaineid elavad bakterid ideaalsed kandidaadid, kuna neid kasutatakse ellujäämiseks ja varjupaiga leidmiseks mitmesuguste toksiliste, refraktaarsete ja mittelagunevate ksenobiootikumide stressirohketes tingimustes. Lisaks näib metaboolse raja mõistmine olevat mikroobse bioremediatsiooni analüüsimisel ülioluline (Plewniak jt, 2018). Joonis 5 illustreerib metaboolse rekonstrueerimise rolli sünteetilises bioremediatsioonis, kasutades ohtlike saasteainete töötlemiseks nii in situ kui ka ex situ viise.

Figure 5. Role of metabolic reconstruction in synthetic bioremediation via in-situ and ex-situ routes to bioremediation of hazardous pollutants.



Juhtumiuuringud

Deepwater Horizoni naftareostus (2010, Mehhiko laht)

Deepwater Horizoni katastroof vabastas Mehhiko lahte ligikaudu 134 miljonit gallonit toornaftat, mis on üks ajaloo suurimaid mereleketeid. Pärastlõunal vohasid kohalikud merebakterid, eelkõige liigid *Alcanivorax* ja *Cyclocasticus*, mis mängisid olulist rolli süsivesinike





lagundamisel. Need mikroobid kasutasid naftat süsinikuallikana, vähendades tõhusalt lekke keskkonnamõju. Mehhiko lahe uurimisalgatuse (GoMRI) rahastatud uuring andis ülevaate mikroobide genoomikast ja süsivesinike biopuhastusreaktsioonidest mere ökosüsteemides.

Plastireostus ookeanides

Plastjätmed, eriti mikroplastid, on merekeskkonnas laialt levinud, ohustades mereelustikku ja inimeste tervist. Selle probleemi lahendamiseks uuritakse uuenduslikke biopuhastusmeetodeid:

Kogukonna juhitud algatused: Indias Keralas algatas Munambami kalapüügikogukond projekti Drive to Recover Ocean Plastic (DROP). Üle 600 kalalaeva osaleb projektis, kogudes oma reise ajal plastjätmeid, mille tulemusel ainuüksi aastatel 2024–2025 taaskasutati 22 000 kg plasti.timesofindia.indiatimes.com

Mikroobsed lahendused: Uuringud on tuvastanud plastikut lagundavaid seeni, mis on võimelised lagundama sünteetilisi polümeere, näiteks polüuretaani. Neid seeni saaks kasutada kontrollitud keskkondades, näiteks reoveepuhastites, plastikureostuse leevendamiseks.reuters.com+bassconnections.duke.edu+1

Raskmetallide saastumine kaevandustes

Kaevandustegevus põhjustab sageli ümbritseva pinnase ja veekogude raskmetallide saastumist. Mikroobe kasutavad biopuhastusstrategiad on osutunud paljulubavaks nende saasteainete leevendamisel:

Qixia mäe plii-tsingi kaevandus, Hiina: Uuringud näitasid kaevanduse ümbruse pinnases tõsist raskmetallide reostust. Mikroobikooslused, sealhulgas *Sphingomonas* ja *Pseudomonas* liigid, näitasid üles resistentsust raskmetallide suhtes ja aitasid kaasa pinnase tervendamise jõupingutustele.pubs.rsc.org

Tar Creek Superfundi sait, USA: Mahajäetud kaevandustest pärit plii, tsingi, kaadmiumi ja rauaga saastunud põhjavee puhastamiseks rakendati uuenduslikku biopuhastussüsteemi. Süsteem kasutab aeroobsete ja anaeroobsete bakteritega töödeldud tiikide seeriat, mis vähendab oluliselt raskmetallide kontsentratsiooni vees.

Biotehnoloogia ja tulevik

Mikroobide täiustamine keskkonna puhastamiseks

Biotehnoloogia edusammud on võimaldanud teadlastel mikroorganisme geneetiliselt muundada, et parandada nende võimet lagundada keskkonnasaasteaineid. Sellised meetodid nagu CRISPR-Cas9 võimaldavad mikroobide genoomi täpselt muuta, parandades nende ainevahetusradaseid keerukate saasteainete lagundamiseks. Näiteks on *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis* ja *Escherichia coli* bakterid muundatud nii, et need üleekspresseriksid ensüüme nagu tsütokroom P450 ja dioksügenaasid, mille tulemuseks on orgaaniliste saasteainete kiirenenud lagunemine.mdpi.com/researchgate.net

Lisaks kasutavad IISER Bhopali teadlaste välja töötatud tööriistad, näiteks XenoBug, masinõpet, et ennustada bakteriaalseid ensüüme, mis on võimelised lagundama mitmesuguseid saasteaineid, lihtsustades seeläbi tõhusate mikroobitüvede tuvastamist biopuhastustöödeks.timesofindia.indiatimes.com

Eetilised ja ökoloogilised kaalutlused

Kuigi geneetiliselt muundatud mikroobid pakuvad paljulubavaid lahendusi reostuse kõrvaldamiseks, tekitab nende kasutuselevõtt mitmeid eetilisi ja ökoloogilisi probleeme:

- Ökoloogiline mõju: Muundatud organismide keskkonda sattumine võib häirida olemasolevaid ökosüsteeme, mis võib kaasa tuua ettenägematuid tagajärgi, näiteks kohalike mikroobikoosluste väljatõrjumise või horisontaalse geeniülekanne mittesihthiikidele. reustus.jatkusuutliikkuse-kataloog.com
- Bioloogilist ohjeldamist puudutavad väljakutsed: On ülioluline tagada, et geneetiliselt muundatud mikroobid ei püsiks kauem kui nende kavandatud kasutusala. Sisemise bioloogilist ohjeldamist





käsitlevad strateegiad on alles väljatöötamisel ja nende tõhusus reaalsetes oludes on endiselt ebakindel. loodus.com

- Võrdsus ja juurdepääs: Biopuhastustehnoloogiate eelised peavad olema kättesaadavad kõigile kogukondadele, eriti neile, keda reostus ebaproportsionaalselt mõjutab. On oht, et patenteeritud tehnoloogiad võivad piirata juurdepääsu ebasoodsas olukorras olevatele piirkondadele, süvendades keskkonnaalast ebaõiglust. reostus.jatkusuutlikkuse-kataloog.com
- Taastamisesmärkide määratlemine: „Puhta” või „taastatud” keskkonna määratlemine on subjektiivne ja võib sidusrühmade lõikes erineda. Kogukondade kaasamine tervendamise eesmärkide seadmisel on oluline, et tagada biopuhastusmeetmete vastavus kohalikele väärtustele ja vajadustele. reostus.jatkusuutlikkuse-kataloog.com

Roheliste tehnoloogiate tulevikupotentsiaal

Biotehnoloogia integreerimine keskkonna tervendamisse on paljulubav säästvate ja tõhusate puhastusstrateegiade väljatöötamisel:

- Sünteetiline bioloogia ja suunatud evolutsioon: Sünteetilise bioloogia ja suunatud evolutsiooni rakendamise abil saavad teadlased kujundada mikroobe, millel on täiustatud võime lagundada saasteaineid, pakkudes kohandatud lahendusi konkreetsete saastumissenaariumide jaoks.
- Nanobioremediatsioon: Nanotehnoloogia kombineerimine mikroobse tervendamisega võib parandada bioremediatsioonainete kohaletoimetamist ja tõhusust, võimaldades saasteainete täpsemat sihtimist. prism.sustainability-directory.com
- Mikroobsed kütuseelemendid (MFC-d): MFC-d kasutavad elektri tootmiseks mikroobide ainevahetusprotsesse, lagundades samal ajal orgaanilisi saasteaineid, pakkudes kahekordset eelist energia tootmisel ja keskkonna puhastamisel. et.wikipedia.org
- Mikroobse elektrolüüsi teel süsiniku kogumine (MECC): see tehnoloogia kasutab mikroobe süsinikdioksiidi kogumiseks reoveepuhastusprotsesside ajal, muutes selle stabiilseks mineraalseks vormiks ja aidates kaasa süsiniku sidumisele. et.wikipedia.org

Nende tehnoloogiate arenedes on mikrobioloogide, keskkonnateadlaste, eetikute ja poliitikakujundajate vaheline interdistsiplinaarne koostöö hädavajalik, et tagada reostuse biotehnoloogiliste lahenduste tõhusus, eetika ja õiglus.

Liitreaalsus tegevuses: mikroobide puhastamise uurimine

Kujutage ette, et saate visualiseerida mikroskoopilisi mikroobe, jälgida, kuidas nad saasteainetega suhtlevad, ja olla tunnistajaks nende tegevusele, kui nad puhastavad õlireostusi või plastjätmeid – kõik see teie vahetus keskkonnas. See kaasahaarav kogemus on võimalik tänu liitreaalsusele (AR) – tehnoloogiale, mis asetab digitaalse sisu reaalsele maailmale selliste seadmete kaudu nagu nutitelefonid, tahvelarvutid või AR-prillid.

Hiljutised uuringud on rõhutanud liitreaalsuse (AR) tõhusust loodusteaduste hariduse edendamisel. Arici (2024) uuring näitas, et AR-tehnoloogia toetab keskkonnatundlikkust ja positiivset käitumist, muutes selle väärtuslikuks tööriistaks loodusteaduste hariduses.

Mikrobioloogia valdkonnas on liitreaalsust tõhusalt kasutatud keerukate protsesside õppimise hõlbustamiseks. Herlina jt (2024) uuringus töötati välja liitreaalsusel põhinev mikrobioloogia praktikumi juhend, mis parandas oluliselt õpilaste arusaamist ja kaasatust, võimaldades neil suhelda viiruste ja teiste mikroorganismide 3D-mudelitega.

Selles osas saate teada mitte ainult mikroobide märkimisväärsed võimetest keskkonna puhastamisel, vaid saate nendega ka liitreaalsuse (AR) kogemuste kaudu suhelda. Need tegevused on loodud selleks, et muuta abstraktsed teaduslikud mõisted käegakatsutavaks, parandada teie arusaamist mikroobsetest protsessidest ja inspireerida uuenduslikku mõtlemist reostuse jätkusuutlike lahenduste osas.

„Liitreaalsus tegevuses: mikroobide puhastamine“ on hariduslik kontseptsioon, mis integreerib uusi tehnoloogiaid keskkonnateadusega, et muuta mikroobse biopuhastuse nähtamatud protsessid nähtavaks ja interaktiivseks. Mikroobide puhastamine, tuntud ka kui biopuhastus, viitab mikroorganismide, näiteks bakterite, seente ja vetikate kasutamisele ohtlike saasteainete lagundamiseks või muutmiseks vähem





kahjulikuks vormiks. See protsess mängib olulist rolli keskkonnaprobleemide, näiteks naftareostuse, raskmetallide saastumise ja plastreostuse lahendamisel. Näiteks *Pseudomonas* ja *Bacillus* liike kasutatakse tavaliselt süsivesinike lagundamiseks, samas kui *Deinococcus radiodurans* on näidanud märkimisväärset potentsiaali radioaktiivsete jäätmete puhastamisel (Gadd, 2010; Varjani, 2017). Liitreaalsuse (AR) integreerimine sellesse konteksti pakub uutset pedagoogilist tööriista keeruliste bioloogiliste interaktsioonide visualiseerimiseks, mis muidu oleksid palja silmaga nähtamatud. AR saab simuleerida saastunud keskkondi, kuvada mikroobide aktiivsust reaajas ja võimaldada õppijatel suhelda erinevate biopuhastusstrateegiatega, parandades nii arusaamist kui ka kaasatust. Bacca jt uuring. (2014) ja Dunleavy jt (2009) näitavad, et liitreaalsus toetab kogemuslikku õppimist, muutes abstraktsed teadusprotsessid ligipääsetavamaks ja meeldejäavamaks. Hariduslikke liitreaalsuse rakendusi, nagu Unity koos Vuforia, JigSpace või Assemblr EDU, saab kasutada mikroobide reaktsioonide dünaamiliste simulatsioonide loomiseks keskkonnatoksiinidele. See lähenemisviis mitte ainult ei rikasta teaduslikku kirjaoskust, vaid julgustab õpilasi kriitiliselt mõtlema jätkusuutlike lahenduste ja biotehnoloogia rolli üle keskkonnakaitses. Liitreaalsuse ja mikroobse biopuhastuse kombinatsioon pakub võimsa interdistsiplinaarse õpikogemuse, mis põhineb Singhi ja Chandra (2019) poolt reostuskontrolli biotehnoloogia uurimisel välja toodud põhimõtetel ning mida toetab Crawfordi ja Crawfordi biopuhastuse põhimõtete ja rakenduste töös esitatud alusraamistik.

AR-i rakendamine mikroobide biopuhastushariduses

AR-põhiste õppetegevuste kavandamine

Liitreaalsus (AR) pakub kaasahaaravaid kogemusi, mis aitavad paremini mõista mikroobide biopuhastusprotsesse. Digitaalse teabe reaalsele keskkonnale kandmisega saab AR muuta abstraktsed mõisted käegakatsutavaks. Näiteks saavad õpilased visualiseerida, kuidas teatud mikroobid saasteainetega suhtlevad, jälgida lagunemisprotsessi ja mõista keskkonnamõju.

Hiljutised uuringud on näidanud liitreaalsuse (AR) tõhusust loodusteaduste hariduses. Süstemaatiline ülevaade tõi esile, et AR-i rakendused keskkonnahariduses parandavad oluliselt õpilaste arusaamist keerukatest mõistetest, suurendavad kaasatust ja edendavad keskkonnateadlikkust. Samamoodi on mikrobioloogia hariduse uuringud näidanud, et AR-põhised tööriistad võivad parandada õpilaste arusaamist ja huvi õppeaine vastu. ejmste.com/akadeemiline.oup.com

Teaduslik põhjendus, hariduslik integratsioon ja tööriistad

Mikroobne bioremediatsioon on protsess, mille käigus mikroorganisme kasutatakse saasteainete lagundamiseks, muundamiseks või eemaldamiseks keskkonnast, sealhulgas pinnasest, põhjaveest ja mere ökosüsteemidest. Kuigi bioremediatsioon on reostuse jätkusuutlikuks lahendamiseks hädavajalik, tekitab selle õpetamine märkimisväärsed väljakutseid nähtamatute ja keerukate mikroobide interaktsioonide tõttu. Liitreaalsus (AR) kui kaasahaarav tehnoloogia pakub ainulaadset võimalust parandada mikroobse bioremediatsiooni protsesside mõistmist ja edastamist. Interaktiivsete visualiseerimiste, ruumiliste ülekatte ja reaajas andmete integreerimise kaudu ületab AR lõhe abstraktsete mikrobioloogiliste teadmiste ja kogemusliku õppimise vahel (Bacca jt, 2014; Beck jt, 2022).

Üks liitreaalsuse peamisi eeliseid on võime visualiseerida nähtamatut mikroobide aktiivsust. 3D-simulatsioonide abil saavad õppijad jälgida, kuidas bakteritüved, näiteks *Alcanivorax borkumensis* või *Pseudomonas putida*, reageerivad saasteainetele nagu süsivesinikud või raskmetallid (Vidali, 2001). Need simulatsioonid suudavad demonstreerida biopuhastuse edenemist aja jooksul, näidates, kuidas keskkonnategurid (nt temperatuur, toitainete tase, hapniku kättesaadavus) mõjutavad mikroobide toimimist (Dunleavy & Dede, 2014). See interaktiivsus parandab kontseptuaalset meeldejätmist ja õppijate kaasatust, võimaldades aktiivset katsetamist virtuaalsetes keskkondades.

Lisaks pakub AR märkimisväärsed eeliseid ruumiline õppimine Mikroobsete protsesside projitseerimise abil reaalsele ruumile, näiteks saastunud pinnase või veekeskkonna ristlõigetel, saavad õpilased sügavama arusaama ruumilisest dünaamikast ja mikroobide-saasteainete vastastikmõjust (Martínez-García jt, 2020). Kuna otsene juurdepääs saastunud aladele või elusatele mikroobidele on sageli ohtlik või ebapraktiline, toimib liitreaalsus ...ohutu simulatsioonitööriist, jäljendades ohtlikke stsenaariume ilma reaalse maailma riskita (Bacca jt, 2014).





Hariduslikud kasutusjuhud

- AR-i naftareostuse labori simulatsioon: õpilased paigutavad Meta Questi või mobiilseadmete abil virtuaalseid mikroobe naftareostusele ja jälgivad lagunemist erinevates tingimustes.
- Interaktiivne pinnase puhastamise kaart: HoloLensil põhinev liitreaalsus võimaldab õppijatel uurida kihilisi pinnasemudeleid, mis näitavad saasteainete levikut ja mikroobide koloniseerimist (Gadd, 2010).
- Reaalajas andur + AR-armatuurlaud: keskkonnaandurid jälgivad saasteainete taset; AR-kiht näitab mikroobide reaktsioone, sidudes andmed bioloogilise funktsiooniga (Martínez-García jt, 2020).
- 3D mikroobide uurimise rakendus: õpilased skannivad QR-koode, et aktiveerida bakterite detailseid mudeleid, tuues esile rakkude struktuurid ja biolagundamise rollid (Beck jt, 2022).

Neid rakendusi toetavad ligipääsetavad tööriistad ja platvormid, sealhulgas Unity 3D, AR Foundation, ARKit/ARCore ja 3D-modelleerimistarkvara nagu Blender ja Sketchfab. Riistvara nagu Microsoft HoloLens ja Meta Quest 3 toetavad kaasahaaravaid reaalajas kogemusi, mis on üha taskukohasemad ja skaleeritavamad.

Õppekava integreerimine

Liitreaalsust saab rakendada keskkonnateaduse, biotehnoloogia või mikrobioloogia kursustel keskkoolis, ülikoolis või kutseõppes. Tõhusate pedagoogiliste strateegiate hulka kuuluvad:

- Uurimuspõhine õpe: julgustab õpilasi testima muutujaid virtuaalsetes biopuhastuskeskkondades.
- Mängupõhine õpe: Lisab motivatsiooni missioonide või probleemide lahendamise väljakutsete kaudu.
- Pööratud klassiruumid: õpilased uurivad enne tundi liitreaalsuse mooduleid ja rakendavad arutelu käigus kontseptsioone.

AR-i eelised selles kontekstis on kokku võetud allpool:

Kasu	Kirjeldus
Sukeldumine	Realistlikud ja interaktiivsed paranduskeskkondade simulatsioonid
Säilitamine	Multisensoorne õppimine parandab arusaamist ja mälu
Ligipääsetavus	Kaasaskantav ja skaleeritav digitaalsete seadmete vahel
Kohandamine	Simulatsioone saab kohandada vastavalt kohalikele saasteainetele, ökosüsteemidele või mikroobidele
Koostöö	Toetab meeskonnatööd ja jagatud AR-keskkondi

Tulevased arengud võivad hõlmata tehisintellektil põhinevaid liitreaalsuse (AR) juhendamissüsteeme, anduritega integreeritud visualiseerimisi ja pilvepõhiseid liitreaalsuse õppeplatvorme, mis parandavad veelgi ligipääsetavust ja kohanemisvõimet eri erialadel ja asukohtades.

Kokkuvõte

Liitreaalsus on võimas õppevahend mikroobse biopuhastuse õppimise parandamiseks. Muutes nähtamatud bioloogilised protsessid nähtavateks, interaktiivseteks ja manipuleeritavateks kogemusteks, aitab liitreaalsus õppijatel haarata keerulisi keskkonnainteraktsioone, mis on traditsiooniliste meetoditega sageli kättesaamatud. See võimaldab reaalsete stsenaariumide ohutut simuleerimist, parandab interaktiivse õppimise kaudu kaasatust ning toetab teadmiste omandamist ruumilise ja visuaalse mõtlemise kaudu.





Kuna kaasahaarava tehnoloogia valdkond areneb, on liitreaalsusest saamas keskkonnahariduse ja teavitustöö lahutamatu osa, eriti säästvate tavade, interdistsiplinaarse õppe ja teadusliku uudishimu edendamisel. Olenemata sellest, kas tegemist on klassiruumi, labori või avaliku keskkonnaga, saab liitreaalsus edendada õppijate põlvkonda, kes on paremini varustatud reostuse mõistmiseks ja sellega tegelemiseks bioloogiliste ja ökoloogiliste lahenduste abil.

Faas	Kirjeldus
Avast	- Uurige, kuidas mikroobid biopuhastuse abil keskkonnareostust puhastavad ja kuidas seda reaalsetes stsenaariumides rakendatakse.
	- Sisu arendamine: Looge hariduslikku sisu, mis seob bioloogia, keskkonnateaduse ja mikroobide puhastamisega seotud tehnoloogia.
	- Vajaduste analüüs: selgitada välja õppijate arusaam reostusest, mikroorganismidest ja ökoloogilisest taastamisest, et kujundada tõhusat õppetööd.
Käivit	- Õppekava rakendamine: Esitage interaktiivseid õppetunde reostuse tüüpide, mikroobide tegevuse ja biopuhastusmehhanismide kohta, kasutades liitreaalsuse tööriistu.
	- Interaktiivsed harjutused: kasutage liitreaalsuse rakendusi (nt Curiscope Virtuali-Tee, Merge Cube), et simuleerida saastunud keskkonda ja mikroobide aktiivsust.
	- Tagasiside kogumine: salvestage õpilaste tähelepanekuid ja tagasisidet virtuaalsete koristuste ja mikroobide käitumise simulatsioonide kohta, et täiustada õpikogemusi.
Täiust	- AR-i integreerimine: rakendage AR-i saastunud ökosüsteemide, mikroobikolooniate ja nende reostuse lagunemisprotsesside visualiseerimiseks.
	- Interaktiivne õpe: laske õpilastel testida virtuaalset mikroobide efektiivsust, tutvustades saasteaineid ja mõõtes puhastustulemusi.
	Mängustatud sisu:
	- Punktid ja märgid Teeni preemiaid reostusliikide tuvastamise, tõhusate puhastuste simuleerimise või mikroobide tegevuse optimeerimise eest.
	- Edetabelid: Hinnake tulemusi ajastatud väljakutsetes virtuaalsete saastunud kohtade puhastamisel.
Täiust	- Ülesanded ja tasemed Avada üha keerukamad etapid alates saasteainete tuvastamisest kuni tervete tervendusökosüsteemide haldamiseni.
	- Auhinnad uurimise eest Peida mikroobide liike või koristusvihjeid liitreaalsuse keskkondades, et ergutada sügavat uurimist.
	- Koostöös mängustatud ülesanded Meeskonnad töötavad koos, et lahendada ulatuslikke AR-põhiseid keskkonnakataastroofe, kasutades mikroobseid strateegiaid.
	AR-põhised hinnangud:
	- Hinnake õpilaste arusaamist, lastes neil liitreaalsuse abil reostuse koristusmissioone läbi viia ja tulemustest enne ja pärast analüüside abil aru anda.





Viited

- Arici, F. (2024). Liitreaalsuse tehnoloogia efektiivsuse uurimine loodusteaduste hariduses keskkonnakirjaoskuse, eneseregulatsiooni ja loodusteaduste õppimise motivatsiooni seisukohast. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 40(24), 8476–8496. <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2310921>
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S. ja Kinshuk. (2014). Liitreaalsuse trendid hariduses: uuringute ja rakenduste süstemaatiline ülevaade. *Educational Technology & Society*, 17(4), 133–149.
- Beck, D. A. C., Pope, R. K. ja McNicholas, P. J. (2022). Nähtamatu maailma paljastumine: liitreaalsus mikrobioloogia hariduses. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 23(1), e00143-21.
- Boopathy, R. (2021). Õhusaasteainete bioloogiline töötlemine: ülevaade. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20, 457–472. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09555-9>.
- Crawford, R. L. ja Crawford, D. L. (1996). *Bioremediatsioon: põhimõtted ja rakendused*. Cambridge University Press.
- Deshusses, M. A. (1997). Bioloogiline õhupuhastus biofiltrites. *Biotechnology Progress*, 13(3), 239–248.
- Dhaliwal, S.S., Singh, J., Taneja, P.K., Mandal, A., 2020. Raskmetallide eemaldamise puhastusmeetodid erinevatest allikatest saastunud pinnasest: ülevaade. *Environmental Science and Pollution Research* 27 (2), 1319–1333.
- Dunleavy, M. ja Dede, C. (2014). Liitreaalsuse õpetamine ja õppimine. Teoses J. M. Spector jt (toim.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (lk 735–745). Springer.
- Dunleavy, M., Dede, C. ja Mitchell, R. (2009). Kaasahaaravate osaluspõhiste liitreaalsuse simulatsioonide võimalused ja piirangud õpetamisel ja õppimisel. *Journal of Science Education and Technology*, 18(1), 7–22. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>





Fang, C. F. ja Ling, D. L. (2003). Puudevööndite mürasummutusmeetodite uurimine. *Landscape and Urban Planning*, 63(4), 187–195.

Fasani, E., Manara, A., Martini, F., Furini, A., DalCorso, G., 2018. Taimede geenitehnoloogia potentsiaal raskmetallidega saastunud muldade puhastamiseks. *Plant, cell & environment* 41 (5), 1201–1232.

ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsioon (FAO). (2021). Pinnase reostus: varjatud reaalsus. Välja otsitud aadressilt: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/19183EN>

Fredrickson, J. K., Zachara, J. M., Kennedy, D. W. jt (2004). *Geobacter metallireducens* redutseerib uraani ja soodustab selle immobiliseerimist. *Environmental Science & Technology*, 38(7), 2149–2154.

Gadd, G. M. (2010). Metallid, mineraalid ja mikroobid: geomikrobioloogia ja biopuhastus. *Mikrobioloogia*, 156(3), 609–643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>

Ganiyu, S.O., Sable, S., El-Din, M.G., 2022. Täiustatud oksüdeerimisprotsessid lahustunud orgaaniliste ainete lagundamiseks toodetud vees: protsessi toimivuse, lagunemiskineetika ja raja ülevaade. *Chemical Engineering Journal* 429, lk 132492.

Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K. ja Ahn, Y. (2016). Praegused teadmised polütsükliliste aromaatsete süsivesinike (PAH-de) mikroobse lagundamise kohta: ülevaade. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1369. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369>

Hartman A (2024). Biopuhastus: looduse ökoteadlik puhastusstrateegia. *Adv Genet Eng.* 13:282.

Haritash, A. K. ja Kaushik, C. P. (2009). Polütsükliliste aromaatsete süsivesinike (PAH-de) biolagundamise aspektid: ülevaade. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>.

Herlina.M, Fitriani.A, Lubis.R. (2024). Viirusmaterjalil põhineva liitreaalsuse tehnoloogial põhineva mikrobioloogia praktilise juhendi väljatöötamine, DOI: 10.35445/alishlah.v16i4.4952

Knop, E., Zoller, L., Ryser, R. jt (2017). Kunstlik valgus öösel kui uus oht tolmeldamisele. *Nature*, 548(7666), 206–209.

Kumar, M. ja Gopal, M. (2021). Mikroobne biopuhastus: jätkusuutlik vahend keskkonna puhastamiseks. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101693. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101693>.

Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W., 2019. Ülevaade raskmetallide saastumisest pinnases: mõjud, allikad ja puhastusmeetodid. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 28 (4), 380–394.

Liang, Y., Jiao, S., Wang, M., Yu, H., Shen, Z., 2020. CRISPR/Cas9-põhine genoomi redigeerimissüsteem *Rhodococcus ruber* TH jaoks. *Metabolic engineering* 57, 13–22.

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R. jt (2006). Mikroobsed kütuseelemendid: meetodika ja tehnoloogia. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192.

Martínez-García, M., Andrés, M. A. ja Andreu, A. (2020). Nähtamatu visualiseerimine: keskkonnahoidlikkuse edendamiseks kaasahaaravate tehnoloogiate kasutamise suunas. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 23.

Meckenstock, R. U., Elsner, M., Griebl, C. jt (2015). Biolagundamine: saastunud põhjaveekihtide mikroobse puhastamise kontrolli kontseptsioonide ajakohastamine. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7073–7081.





- Plewniak, F., Crognale, S., Rossetti, S., Bertin, P.N., 2018. Genoomiline vaade bioremediatsioonile: arseeni eemaldamise näide. *Frontiers in microbiology* 9, lk 820.
- Pointing, S. B. (2001). Valgemädaniku seente abil biopuhastuse teostatavus. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57(1–2), 20–33. <https://doi.org/10.1007/s002530100754>
- Priya, A.K., Nagan, S., 2015. Raskmetallide puhastamine galvaanilise katmise heitveest bakteritüvede abil ülesvoolu immobiliseeritud kolonnreaktoris. *Journal of Pure and Applied Microbiology* 9 (2), 1411–1416.
- Rhea, L.K., Clark, C., 2022. Suurte lahjendatud kloroeteenide ja 1,4-dioksaani pilvede ohjamine jälgitava loodusliku nõrgenemise (MNA) ja MNA suurendamise abil. *Remediation Journal*.
- Sharma, P, Bano.A, Pratap Singh.S, Kishore Dubey.N, Chandra.R, Iqbal.H.M.N.(2022) Hiljutised edusammud toksiliste saasteainete mikroobide abil abistatavates puhastusstrateegiates.
- Sharma, P., Kumar, S., 2021f. Tööstusheitvetest pärinevate raskmetallide biopuhastus endofüütide ja nende metaboolse aktiivsuse abil: hiljutised edusammud. *Bioresource Technology* 339, 125589.
- Sharma, P., Kumar, S., Pandey, A., 2021g. Metallide saasteainete bioremondimeetodid metagenoomika meetodite abil: ülevaade. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (4), lk 105684.
- Singh, R. ja Strong, P. J. (2022). Bioremediatsioon: praegused rakendused ja uued trendid. *Frontiers in Microbiology*, 13, 872695. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.872695>.
- Singh, J. ja Chandra, R. (2019). Reostuse kontrolli biotehnoloogia. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 1335–1355. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00865-6>
- ÜRO Keskkonnaprogramm (UNEP, 2021), Toidu- ja Põllumajandusorganisatsioon (FAO, 2021), USA Keskkonnakaitseagentuur (EPA, 2023)
- ÜRO Keskkonnaprogramm (UNEP, 2021). Veereostus. Välja otsitud aadressilt: <https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>
- USA Keskkonnakaitseagentuur (EPA). (2023). Bioreaktorid ja biofiltrid õhusaaste kontrollimiseks. Välja otsitud aadressilt: <https://www.epa.gov/air-research/bioreactors-and-biofilters-air-pollution-control>
- Varjani, S. J. (2017). Nafta süsivesinike mikroobne lagundamine. *Bioresource Technology*, 223, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- Vidali, M. (2001). Bioremediatsioon. Ülevaade. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172.
- Vymazal, J. (2011). Reovee puhastamiseks mõeldud tehismärgalad: viie aastakümne pikkune kogemus. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69.
- Zeyaulah, M. jt (2023). Biopuhastusmeetodite edusammud: hiljutised arengud ja tulevikuväljavaated. Keskkonnateadus ja reostuse uuringud. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27790-z>. https://et.wikipedia.org/wiki/Arhea?utm_source=chatgpt.com





https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com

preprints.org

pmc.ncbi.nlm.nih.gov

lloodus.com

https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de

<https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

<https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>

<https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN>

<https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>

<https://www.darksky.org/light-pollution/>

<https://www.epa.gov/nps/nonpoint-source-urban-areas>

<https://www.iaea.org/topics/radioactive-contamination>

[pmc.ncbi.nlm.nih.gov](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/frontiersin.org)
frontiersin.org
et.wikipedia.org

<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>
wired.com
timesofindia.indiatimes.com

reuters.com
bassconnections.duke.edu

pubs.rsc.org

mdpi.com
researchgate.net

reostus.jatkusuutikkuse-kataloog.com

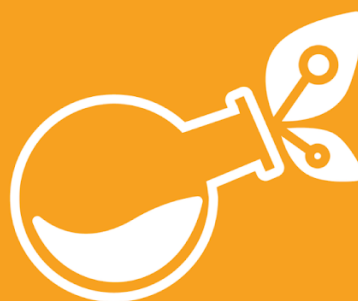
prism.sustainability-directory.com

ejmste.com
makadeemiline.oup.com





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.