



Co-funded by
the European Union

Laborist loodusesse: kuidas teadlased katsetavad mikroobset puhastamist päris ökosüsteemides



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."

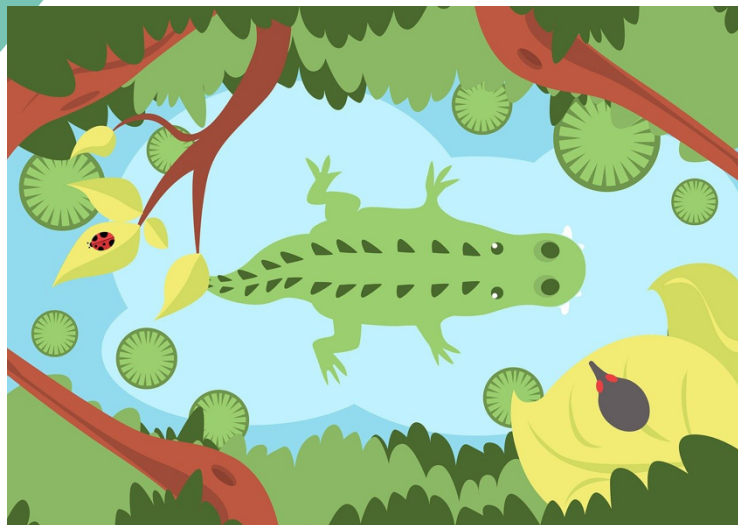




SISUKORD

· Sissejuhatus.....	2
· Miks on välikatsed olulised.....	3
· Laboriedust välistrateegiani.....	4
· Reaalse maailma juhtumianalüüsid	8
· AR-i integreerimine mikroobide biopuhastusse välikatsetes.....	10
· Liitreaalsuse reaalse maailma näited keskkonna- või bioloogilis-alastes valdkondades.....	12
· Ressursid.....	19





Õppeteema üldine teema	Biopuhastus ja keskkonna puhastamine mikroorganismide abil (bioloogiliselt inspireeritud lahendused)
Õppeüksuse täpne nimetus	<i>Laborist põllule: kuidas teadlased testivad mikroobide puhastust reaalsetes ökosüsteemides</i>
Sihtkasutaja vanus	14–18 aastat
Õppija eeltingimused	Bioloogia, keemia ja keskkonnateaduse põhiteadmised
Õppeüksuse kirjeldus	See üksus tutvustab õpilastele reaalse maailma mikroobset biopuhastust. Kasutades liitreaalsuse tööriistu, uurivad õpilased, kuidas teadlased kavandavad, jälgivad ja hindavad mikroobide puhastust laboritingimustest kuni tegelike saastunud kohtadeni. Tähelepanu keskmes on mikroobide ökoloogia, saasteainete dünaamika ja täiustatud visualiseerimise kasutamine keskkonnaprotsesside mõistmiseks.
Kaasatud subjektid	Bioloogia, keemia, keskkonnateadus, tehnoloogia
Märksõnad	Biopuhastus, mikroobid, bioinspireeritud, liitreaalsus, välikatsed, keskkonna taastamine, STEM, visualiseerimine
Peamised omandatavad oskused, võimed ja teadmised	- Mikroobide rolli mõistmine saasteainete lagundamisel - Biopuhastuse visualiseerimine liitreaalsuse abil - Keskkonnaandmete tõlgendamine - Probleemide lahendamine ja süsteemne mõtlemine ökoloogilises kontekstis - Lihtsate liitreaalsusega täiustatud puhastusmodelite väljatöötamine
Kasutatud ressursid ja didaktilised vahendid	Teaduskirjandus (nt AEM, Frontiers), hariduslikud liitreaalsuse tööriistad (nt JigSpace, Merge Cube), keskkonnaalased juhtumiuuringud, virtuaalsed õppekäigud, simulatsiooniandmed
Hindamiskriteeriumid ja hindamine	Hindamine liitreaalsusel põhinevate ülesannete abil: reostuse visualiseerimine, mikroobide aktiivsuse simuleerimine, lagunemisradade testid ja virtuaalsete laborist välitöö stsenaariumide refleksiivne tagasiside





Sissejuhatus

Petri

reaalses



tassist kaugemale –
mikroobide
puhastamise testimine
maailmas

<https://www.theguardian.com/environment/2023/sep/28/plastic-eating-bacteria-enzyme-recycling-waste>

Kui mõtleme teadusele tegevuses, kujutame sageli ette valgeid laborikitleid, mikroskoobe ja Petri tasse – puhtaid ja kontrollitud keskkondi, kus avastusi tehakse ideaalsetes tingimustes. Ja kuigi see on teadusprotsessi oluline osa, nõuab reaalsete probleemide, näiteks reostuse, lahendamine enamat kui lihtsalt edu laboris. Siin tulevadki mängu välikatsed, kus laboris toimivad asjad jäävad ellu ja toimivad ka looduses.

Üks tänapäeva keskkonnateaduse põnevamaid tööriistu on bioremediatsioon – protsess, kus pisikesi elusorganisme, nagu bakterid ja seened, kasutatakse saastunud keskkonna puhastamiseks. Need mikroobid suudavad "süüa" kahjulikke aineid, nagu õli, raskmetallid või mürgised kemikaalid, ja muuta need kahjututeks materjalideks. Laboris on teadlased avastanud sadu mikroobiliike, mis suudavad seedida laia valikut aineid, sealhulgas diislikütust, kroomi ja uraaniühendeid (Lovley jt, 2022). Aga kas needsamad mikroobid suudavad ellu jääda saastunud jões, metsas või mürgiste jäätmete ladestamiskohas? See on suur küsimus.

Loodus on ettearvamatu. Sellised tingimused nagu temperatuur, päikesevalgus, veevool ja teiste organismide olemasolu mõjutavad kõik mikroobide käitumist väljaspool laborit. Isegi kui mikroob on Petri tassis saasteainete lagundamisel suurepärase, ei pruugi see järve või pinnasesse sattudes üldse toimida. Näiteks *Alcanivorax borkumensis*, looduslikult esinev





merebakter, edeneb õliga saastunud merevees ja aitab lagundada süsivesinikke, kuid ainult teatud temperatuuri- ja toitainetingimustes (Yakimov jt, 2007). Seetõttu peavad teadlased katsetama biopuhastusstrateegiaid reaalsetes ökosüsteemides väikesemahuliste katsete kaudu, mida nimetatakse pilootuuringuteks või välikatseteks.

Need katsed aitavad teadlastel mõista, kas valitud mikroobid on tõhusad, ohutud ja suudavad looduslikes tingimustes ellu jääda. Näiteks on teadlased läbi viinud välikatseid Rifle'is Colorados, kasutades *Geobakter*liike, et vähendada uraani saastumist põhjavees, süstides neile lihtsaid toitaineid, näiteks atsetaati (Anderson jt, 2003). Teises Itaalia projektis löid teadlased põhjaveekihti biobarjääri, et testida kuuevalentse kroomi (Cr VI) redutseerimist põhjavees, kasutades looduslikult esinevaid mikroobe (Beccari jt, 2010). Need reaalsed katsed annavad väärtuslikku teavet selle kohta, kuidas biopuhastust saab ohutult ja tõhusalt rakendada laiemas mastaabis.

Selles moodulis saate teada, kuidas teadlased viivad mikroobid laborilaualt põllule ning kuidas nad hoolikalt ette valmistavad, testivad ja jälgivad mikroobide puhastustöid. Samuti uurite reaalseid juhtumianalüüse, kus biopuhastus on aidanud taastada saastunud alasid, ja saate teada väljakutsetest, millega teadlased keerukate looduskeskkondadega tegeledes silmitsi seisavad. Mis kõige tähtsam, näete, kuidas see töö kujundab puhtama ja jätkusuutlikuma tuleviku ning kuidas teadus liigub laborist kaugemale, et rahuldada meie planeedi vajadusi (Singh jt, 2023).

2. Miks on välikatsed olulised

Enne mikroobide laiaulatuslikku kasutamist reostuse puhastamiseks peavad teadlased neid testima väljaspool laborit reaalsetes tingimustes. Seda protsessi nimetatakse **välikatseteks** ja see on oluline samm tagamaks, et biopuhastus on nii tõhus kui ka ohutu, kui seda rakendatakse looduslikes keskkondades, nagu jõed, järved, pinnas või isegi põhjaveeallikad. Välikatsed annavad vastused olulistele küsimustele: *Kas mikroobid jäävad ellu? Kas nad käituvad nii põllul kui laboris samamoodi? Kas sellel võivad olla ootamatud tagajärjed?*

2.1. Labor vs. väli: kontrollitud vs. keerulised keskkonnad

Laboris saavad teadlased kontrollida peaaegu kõike – temperatuuri, pH-d, niiskust, toitaineid ja saasteaine tüüpi. Looduses on aga palju segasem. Välingimustes võivad mikroobid silmitsi seista:

- **Kõikuvad temperatuurid** (mis mõjutavad ainevahetust),
- **Madal toitainete tase** (mis vähendavad mikroobide kasvu),
- **Kohalike mikroorganismide olemasolu** (mis võib konkureerida või segada),
- **Muutuvad saasteainete kontsentratsioonid** (mis võib halvenemise jaoks liiga kõrge või liiga madal olla),
- **Füüsilised tõkked** näiteks mullaosakesed või hapnikupuudus (eriti maa all või vee all).

Näiteks, *Pseudomonas putida*, biopuhastusuuringutes sageli kasutatav bakter, lagundab laborikultuurides tõhusalt õli ja lahusteid. Segatud saasteainetega põllumuldades võib selle efektiivsus aga langeda konkurentsi tõttu kohalike mikroobikooslustega ja ebaregulaarse hapnikuvarustuse tõttu (Cases & de Lorenzo, 2005).





2.2. Biosaadavuse mõistmine reaalses maailmas

Laboris on saasteained sageli lahustunud või ligipääsetavas vormis, kuid looduses võivad need olla lõksus mullaosakestes või peidetud settekihtidesse. See raskendab mikroobidel nendeni jõudmist ja lagundamist. Seda kontseptsiooni tuntakse kui **biosaadavus**, mis viitab saasteaine ligipääsetavusele mikroobide tegevuseks.

Näiteks on pärast leket peenesse settekihti kinni jäänud õli palju raskem puhastada kui veepinnal hõljuvat õli, kuna mikroobid ei pääse sellele kergesti ligi (Prince jt, 2013). Välikatsetes peavad teadlased hindama mitte ainult mikroobi võimet, vaid ka seda, kas reostus on füüsiliselt lagundamiseks kättesaadav.

2.3. Ohutuse ja keskkonnamõju seire

Välikatsete tegemise oluline põhjus on **ohutuse tagamine** Isegi kui mikroob lagundab saasteaineid, võib sellel olla ettenägematuid kõrvalmõjusid:

- See võib kohalikke liike konkurentsivälja tõrjuda.
- See võib tekitada kahjulikke kõrvalsaadusi.
- See võib levida kavandatud piirkonnast kaugemale.

Välikatsed võimaldavad teadlastel jälgida neid tulemusi ja piirata sissetoodud mikroobide levikut või mõju. Näiteks testivad teadlased geneetiliselt muundatud mikroobe (GMO-sid) enne laiemat kasutamist kaalumist ainult turvalistes välitingimustes rangete eeskirjade kohaselt (Ghosal jt, 2016).

3. Labori edust välistrateegiani

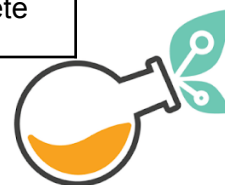
Mikroobse puhastusmeetodi üleviimine laborist saastunud kohta on palju enam kui lihtsalt ulatuse suurendamine. See nõuab hoolikat planeerimist ja testimist, et tagada mikroobide tõhus toimimine reaalses tingimustes. Välikatsetused hõlmavad mitut etappi – alates saastunud koha valimisest ja mikroobide ettevalmistamisest kuni nende paigutamise, nende aktiivsuse jälgimise ja tulemuste hindamiseni. Need sammud aitavad kontrollida, kas mikroobid suudavad areneda ka väljaspool kontrollitud keskkonda, suhelda korralikult kohalike kogukondadega ja tegelikult vähendada reostust keerulistes keskkondades.

Mitmed hiljutised uuringud rõhutavad selle protsessi olulisust. Uraaniga saastunud põhjaveekihtides tehtud välikatsed on näidanud, et stimuleerivad looduslikud *Geobakter* Liigid võivad vähendada lahustuva uraani taset ohutu piirini (turn0search0, turn0search6). Samamoodi näitab PAH-idega saastunud pinnase katseprojekt biomassi rajamiseks, et mikroobne tervendamine võib olla nii tõhus kui ka kulutõhus, kuigi kohaspetsiifilised tõkked, nagu mulla struktuur ja kliima, mõjutavad tulemusi oluliselt (turn0search1, turn0search9). Need teadmised kinnitavad, et välikatsed on olulised varieeruvuse, biosaadavuse, mikroobide dünaamika ja ökoloogilise ohutuse mõistmiseks.

Järgmistes osades uurite, kuidas teadlased kavandavad ja viivad läbi välikatsete programmi, jaotades selle olulisteks sammudeks. Allolev tabel esitab need sammud selgelt ja seejärel selgitatakse iga sammu põhjalikumalt koos täiendavate alateemadega õppimise rikastamiseks.

3.1. Välitaseme testimise etapid: ülevaattetabel

Samm	Alamateemad	Eesmärk
A. Asukoha valik ja reostuse hindamine	• Geokeemiline profileerimine • Natiivne mikroobide baasolukord • Biosaadavuse analüüs	Mõista kohapealseid tingimusi ja saasteainete esinemist





B. Mikroobide selektsioon või stimuleerimine	• Kohalikud vs. sissetoodud liigid • Stimuleeritud konsortsiumid • Geneetilised/inseneritehnilised täiustused	Valige saasteaine ja ökosüsteemiga sobivad mikroobid
C. Kohaletoimetamine ja ettevalmistamine	• Toitainete lisamine (nt atsetaat) • Biobarjääri loomine • Biokile kasutamine	Mikroobide kasutuselevõtt ja ellujäämise/aktiivsuse suurendamine
D. Jälgimine ja jälgimine	• Keemiline proovide võtmine • Molekulaarsed tööriistad (DNA/RNA) • Kogukonna muutused ja PICT-hindamine	Jälgige saasteainete vähenemist ja mikroobide käitumist
E. Tulemuste hindamine ja skaleerimine	• Saasteainete vähendamise näitajad • Ohutus/ökoloogiline mõju • Suurendamise planeerimine	Edu mõõtmine ja tulevaste rakenduste suunamine

3.2. Laiendatud selgitus ja alateemad

A. Asukoha valik ja reostuse hindamine

Biopuhastuse koha kindlaksmääramine nõuab põhjalikku uurimist. Teadlased alustavad geokeemilise profiilimisega, uurides pinnase või põhjavee parameetreid, nagu pH, lahustunud hapnik, redokspotentsiaal ja toitainete sisaldus, mis määravad, kas mikroobid suudavad ellu jääda ja saasteaineid lagundada (Madison jt, 2022). Samuti loovad nad mikroobide baasjoone, sekveneerides 16S rRNA geene, et paljastada kohalikke populatsioone, sealhulgas baktereid, mis on võimelised lagundama klooritud lahusteid või nafta süsivesinikke (Madison jt, 2022). Teine oluline samm on saasteaine biosaadavuse hindamine, mis näitab, kui hästi saasteaine mikroobidele kättesaadav on. Savirikkas pinnases tugevalt adsorbeerunud või mittevesifaasi vedelikesse lõksus olevad ained võivad enne biolagundamise jätkumist vajada võimendamist (Semple jt, 2004).

Need sammud aitavad koos valida koha, kus nii keskkonnatingimused kui ka mikroobide esinemine toetavad tõhusat tervendamist, vältides katsete ebaõnnestumisi koha sobimatuse tõttu.

B. Mikroobide selektsioon või stimuleerimine

Kui leiukoht on iseloomustatud, otsustavad teadlased, kas tuua sisse spetsiifilisi mikroobe (bioaugmentatsioon) või elavdada kohalikke mikroobe (biostimulatsioon). Klooritud lahustitega, näiteks trikloroetüleeniga, saastunud põhjavee leiukohtades mõõdeti madala, kuid tuvastatava populatsiooni hulka *Dehalokoid* (10^1 – 10^2 rakku/ml) juhendas elektronidoonorite lisamise ja bioaugmentatsiooni kombineeritud kasutamist pilootkatsete ajal, tagades kiire ja täieliku deklorineerimise (Madison jt, 2022). Piirid Teistes keskkondades on kohalike organismide stimuleerimine toitainete, näiteks atsetaadi abil, osutunud piisavaks. Näiteks näitasid NGS-andmed ja qPCR-i kvantifitseerimine, et anaeroobse biolagundamise eest vastutavad geenid (nt alküülsuktsinaatsüntaas) olid pärast biostimulatsiooni 100–1000 korda levinumad, mis näitab efektiivset looduslikku saasteainete nörgenemist (Madison jt, 2022), Piirid.





Molekulaarsete andmete toel loodud kohandatud mikroobide konsortsiumide kasutamine aitab tagada mitmete lagunemisradade aktiivsuse, eriti segatud saasteainete puhul, mis on pilootprojektides populaarsust kogumas (Madison jt, 2022).

C. Kohaletoimetamine ja ettevalmistamine

Mikroobide kohaletoimetamine ja nende aktiivsuse tagamine kohapeal sõltub tugevatest kohaletoimetamisstrateegiatest. Uraaniga saastunud põhjaveekihtides pumpavad perioodilised atsetaadi süstid puuraukudesse elektronidoonoreid kütusena. *Geobakter*-juhitud U(VI) vähenemine kuude jooksul (Anderson jt, 2003; Lovley jt, 2005). Põhjavee voolu suunamiseks läbi mikroobide rikaste piirkondade kaudu kasutatakse ka reaktiivseid barjääre, mis koosnevad läbilaskvatest toitainevöönditest. Mullas toetavad mikroobide koloniseerimist ja saasteainetega kokkupuudet kandjad, näiteks biokile karkassid, helmed või orgaaniline kompost, mis on kriitilise tähtsusega keerukates maatriksites, kus toitained ja mikroobid võivad ebaühtlaselt jaotuda (Semple jt, 2004). Järjepideva tervendamistulemuse tagamiseks tuleb manustamissüsteemide kavandamisel arvestada poorsuse, läbilaskvuse ja hooajaliste tingimuste varieeruvusega.

D. Jälgimine ja jälgimine

Saasteainete kontsentratsioonist kaugemale ulatuv seire on oluline. Meeskonnad teevad perioodiliselt keemilist analüüsi (nt saasteainete tase, lahustunud hapnik, pH, ainevahetuse kõrvalsaadused) mitmel sügavusel ja asukohas. Lisaks mõõdavad molekulaarbioloogilised tööriistad (MBT-d), näiteks qPCR, funktsionaalsete geenide arvukust (nt naftaleensuktsinaadi süntaas, *gltA* tsitraatsüntaasi jaoks), samas kui RNA-põhised testid peegeldavad aktiivset mikroobide metabolismi (Madison et al., 2022).

Kõige tähelepanuväärsem on see, et *Geobacteri* tsitraat-süntaasi geeni (*gltA*) transkriptide suurenemine jälgib tihedalt atsetaadi kohaletoimetamist ja uraani redutseerimise aktiivsust välitööde ajal (Methe jt, 2005; Holmes jt, 2007). Teadlased jälgivad ka oksüdatiivse stressi markereid, et tagada anaeroobsete tingimuste säilimine ja et hapniku sissevool ei pärsi mikroobide lagunemist (Holmes jt, 2007).

E. Tulemuste hindamine ja skaleerimine

Saasteainete vähendamise näitajate, näiteks regulatiivse vastavuse saavutamise aja analüüsimine aitab hinnata välitööde elujõulisust. Näiteks langes uraani tase alla ohutuspiiride ~40 päeva jooksul pärast atsetaadiga stimuleerimist (Lovley jt, 2005). Paralleelne ökoloogiline seire, sealhulgas muutused mikroobide mitmekesisuses, kohalike koosluste vastupanuvõimes ja toksiliste kõrvalsaaduste puudumine, kinnitab ökosüsteemi taastumist (Xiong jt, 2025). Kui välikatsetused on edukad, arvestatakse täiemahulise kasutuselevõtu planeerimisel hooajalist vooludünaamikat, toitainete logistikat, regulatiivseid heakskiite ja sidusrühmade heakskiitu. Välikatsete tulemused annavad teavet kulude-tulude analüüsi ja pikaajaliste seirenõuete koostamiseks.





Et paremini mõista, kuidas välitöödel mikroobset biopuhastust planeeritakse ja optimeeritakse, uurivad teadlased sageli nii edasijõudnud kui ka uusimaid kontseptsioone, mis parandavad puhastusstrateegiate täpsust ja tõhusust. Need lisateemad esindavad tipptasemel teaduslikke lähenemisviise ja pakuvad laiemat konteksti keskkonnainnovatsioonist huvitatud üliõpilastele.

a. Mikroobide transport ja biokonvektsioon

Paljudes saastunud kohtades, eriti pinnases ja põhjaveekihtides, ei jää mikroobid lihtsalt paika, kus nad asuvad. Nad liiguvad, mõnikord passiivse voolamise teel vees ja mõnikord omaenda liikumise abil. **Biokonvektsioon** viitab mikroobipopulatsioonide liikumisele vastusena hapniku- või keemilistele gradientidele. Need iseorganiseeruvad voolud aitavad mikroobidel jõuda sügavamale või ligipääsmatute saasteaineteni.

Mikroobide liikumise mõistmine poorsetes materjalides, nagu liiv või savi, aitab teadlastel kujundada paremaid süstimisüsteeme või valida suurema liikuvusega mikroobitüvesid. Näiteks on hiljutised modelleerimisuurinud uurinud, kuidas bakterid põhjaveesüsteemides jaotuvad, et optimeerida saasteainete lagunemist, rõhutades vedeliku dünaamika olulisust mikroobide puhastamisel (Banerjee jt, 2024).

b. Biokiled kui välistrateegia

Mikroobid kinnituvad sageli pindadele ja moodustavad **biokiled**, õhukesed mikroobikoosluste kihid, mis on ümbritsetud kaitsva matriksiga. Välitingimustes saab biokilesid strateegiliselt kasutada: need aitavad mikroobidel paigal püsida, keskkonnastressile vastu seista ja saasteainetega tõhusamalt suhelda. Biokiledel põhinevaid lähenemisviise kasutatakse tavaliselt reovee puhastamisel ja neid katsetatakse nüüd pinnase ja sette puhastamisel.

Näiteks biobarjäärisüsteemides moodustavad mikroobid biokilesid mööda läbilaskvaid seinu maa all. Saastunud põhjavee voolamisel lagundavad biokiles olevad mikroobid saasteaineid, näiteks raskmetalle või süsivesinikke. See lähenemisviis on eriti kasulik, kui on vaja pikaajalist või passiivset puhastamist suurtes või raskesti ligipääsetavates piirkondades.

c. Reostusest tingitud kogukonna tolerantsus (PICT)

Teadlased kasutavad ka meetodit, mida nimetatakse **Reostusest tingitud kogukonna tolerantsus (PICT)** et hinnata, kuidas saastunud keskkondades elavad mikroobikooslused aja jooksul kohanevad. See kontseptsioon aitab teadlastel hinnata ökosüsteemi tervist ja vastupanuvõimet ning teha kindlaks, kas sissetoodud mikroobid muudavad looduslikku mikroobide tasakaalu tahtmatul viisil.

Näiteks kui kohalik mulla mikroobide kooslus muutub aja jooksul saasteaine suhtes tolerantsemaks, võib see viidata kas edukale kohanemisele või jätkuvalle keskkonnastressile. PICT-analüüs aitab teadlastel jälgida mikroobide evolutsiooni ja tagab, et ökosüsteem tõeliselt taastub, mitte ainult ei muutu resistentseks.

d. Multi-oomika tööriistad välitöödeks

Kaasaegne keskkonnateadus tugineb üha enam **multioomika**...genoomika, transkriptoomika, proteoomika ja metaboloomika kombinatsioon, et mõista, millised mikroobid esinevad, kui aktiivsed nad on ja milliseid kemikaale nad toodavad. Need tööriistad võimaldavad teadlastel jälgida mitte ainult mikroobide ellujäämist välitingimustes, vaid ka nende käitumist reaajas.

Näiteks kasutati hiljutises uuringus keskkonna DNA (eDNA) ja RNA sekveneerimist, et jälgida mikroobide aktiivsust naftaga saastunud muldade biopuhastuse ajal. Need meetodid aitavad tagada, et





mikroobid mitte ainult ei ole kohal, vaid lagundavad aktiivselt saasteaineid ega tekita protsessi käigus kahjulikke kõrvalsaadusi.

e. Ennustav modelleerimine ja simulatsioon

Enne laiaulatuslikku rakendamist kasutavad teadlased arvutisimulatsioonid ja ennustusmodelid et ennustada mikroobide käitumist erinevates keskkonnatingimustes. Need mudelid võtavad arvesse selliseid tegureid nagu veevool, toitainete tase, temperatuur ja saasteainete kontsentratsioon.

Sellised tööriistad aitavad kavandada paremaid pilootuuringuid, tuvastades ideaalsed tingimused mikroobide kasvuks ja aktiivsuseks. Näiteks simulatsioonid saavad ennustada, kas toitainete süstimisega strateegia jõuab saastunud tsooni või hajub liiga kiiresti. Laboriandmete ja keskkonnamõõtmiste kombineerimise abil vähendavad ennustusmodelid ebakindlust ja parandavad edukust.

Biopuhastuses on laborist põllule liikumine keeruline, kuid oluline teekond. Iga samm, alates õige koha ja mikroobide valikust kuni jälgimise, tulemuste analüüsimise ja ulatuse suurendamise planeerimiseni, tagab, et puhastusmeetod on teaduslikult usaldusväärne, keskkonnasõbralik ja praktiliselt tõhus ettearvatutes looduslikes tingimustes. Selliste alateemade nagu mikroobide transport ja oomika integreerimine aitab näidata, kuidas täiustatud tööriistad seda protsessi veelgi täiustavad.

4. Reaalse maailma juhtumiuuringud

Enne konkreetsete näidete juurde asumist on oluline mõista mikroobse bioremediatsiooni reaalse projektide uurimise eesmärki:

Reaalse maailma juhtumiuuringud pakuvad konkreetseid tõendeid selle kohta, kuidas biopuhastusstrateegiaid keerukates keskkonnatingimustes kavandatakse, rakendatakse ja hinnatakse. Need näitavad, mis toimib, millised väljakutsed tekivad ja kuidas teadlased kohandavad meetodeid kohalikele ökosüsteemidele.

Altpoolt leiame kaks hästi dokumenteeritud väliprojekti, millest üks keskendub uraaniga saastunud põhjaveele ja teine mereõlireostuse puhastamisele, mõlemad näitavad, kuidas mikroobe on edukalt kasutatud reaalse reostusprobleemide lahendamiseks.

Juhtumiuuring 4.1: Uraaniga saastunud põhjavesi kaevandamisest mõjutatud põhjaveekihi

- **Probleem ja asukoht:** Uraani kaevandamisest varem mõjutatud põhjavesi sisaldas ohtlikult kõrges koguses lahustuvat uraani (U(VI)), mis ohustas inimeste tervist ja ökosüsteeme.
- **Lähenemisviis:** Teadlased stimuleerisid põlisrahvaste *Geobakter* liigid, eriti *Geobacter metallireducens*, süstides põhjaveekihti atsetaati elektronidoonorina (turn0search21). See kiirendas U(VI) mikroobset redutseerimist vähem lahustuvaks U(IV)-ks, mis sadestub põhjaveest.
- **Tulemused:** Ligikaudu 40 päeva jooksul näitasid allavoolu puurkaevud uraani taseme langust allapoole regulatiivset terviseriski taset, samas kui uuendamispuuraugud jäid samaks, mis rõhutab piirkondlikku tõhusust (turn0search21). Biomeetriline ja molekulaarne jälgimine kinnitasid suurenenud aktiivsust. *Geobakter*, eriti stressireaktsiooni geenide ekspressioon, näiteks *koostöö* *jasodA* (pöörd0otsingu6, pöörd0otsingu14).





- **Tähtsus:** See pilootuuring kinnitas, et kohalike mikroobipopulatsioonide stimuleerimine suudab uraani ohutult ja tõhusalt kohapeal immobiliseerida, tekitades minimaalse ökoloogilise häiringu.

Juhtumiuuring 4.2: Mere naftareostuse biopuhastus Mehhiko lahes

- **Probleem ja kontekst:** Deepwater Horizoni naftareostuse ajal ohustas laialdane süsivesinike saastumine mereelustikku, rannikualade ökosüsteeme ja kohalikku kalapüüki.
- **Lähenemisviis:** Pärast leket näitas mikroobide seire kohalike õli lagundavate bakterite järsku kasvu, eriti *Alcanivorax borkumensis* ja *Oleispira antarctica*. Nende kasvu soodustas veelgi toitainete (lämmastiku ja fosfori) lisamine biopindaktiivseid aineid tootvate mikroobikoosluste toetamiseks (turn0search1, turn0search26, turn0search22).
- **Tulemused:** Need kohalikud populatsioonid muutusid mõjutatud tsoonides kiiresti domineerivaks, kiirendades süsivesinike lagunemist. Väliuuringud kinnitasid saasteainete tõhusat lagunemist ilma võõrliikide sissetoomiseta (turn0search1, turn0search7).
- **Tähtsus:** See projekt näitas, et õigesti stimuleeritud kohalikud merebakterid võivad mängida olulist rolli õlireostuse looduslikul ja jätkusuutlikul puhastamisel.

Need kaks reaalse maailma näidet toovad esile, kuidas biopuhastusstrateegiad on kohandatud konkreetsetele saasteainetele ja ökosüsteemidele. Mõlemas projektis töötasid teadlased kohalike mikroobikooslustega, stimuleerides ja jälgides nende loomulikke tegevust, et saavutada mõõdetavaid puhastustulemusi ohutult ja kulutõhusalt. Sellised väliuuringud võimaldavad õpilastel näha, kuidas bioloogia, keemia ja keskkonnateadus saavad reostusprobleemide lahendamiseks koostööd teha.

Kohapealne stimuleerimine *Geobakter* Uraani eemaldavad liigid: välitööde demonstratsioon (2003), sh geeniekspressioonkoostööjasodA (Lovley jt)

- Väliuuring, mis näitab *Alcanivorax borkumensis* domineerimine ja aktiivsus mere naftareostustsoonides (pärast Deepwater Horizoni operatsiooni)
- Süsivesinike biopuhastusmehhanismide ja mikroobide reaktsiooni ülevaade reaalsetes naftareostustes [Piirid+15PMC+15PMC+15](#)
- Lisateavet *G. metallireducens* uraani ja vanaadiumi redutseerimine saastunud põhjaveekihtides (Vikipeedia kokkuvõte) [NRC veeb+13Vikipeedia+13ScienceDirect+13](#)



AR-i integreerimine mikroobide biopuhastusse välikatsetes

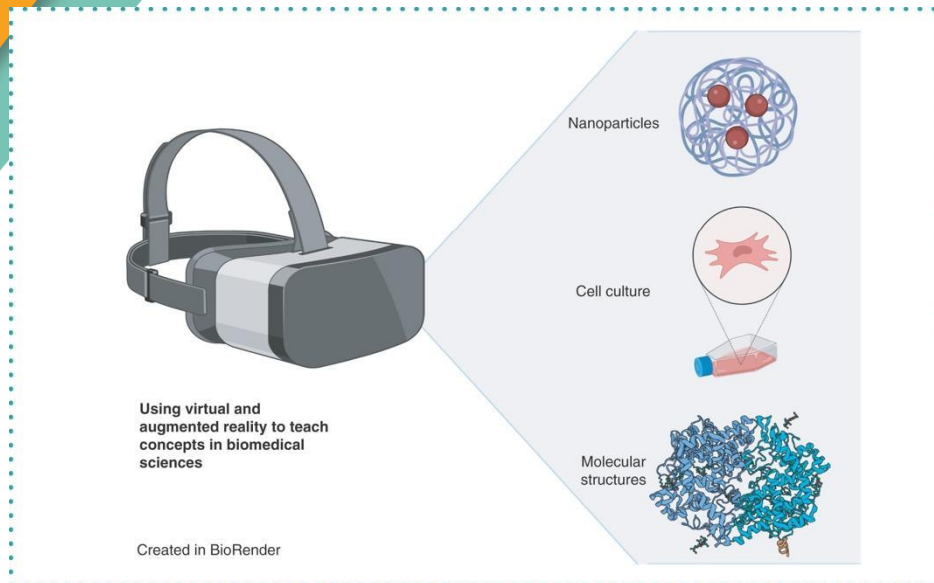


Fig 1- AR in biomedical science, source: Hemme et al., 2023

Mikroobse biopuhastusstrateegiate üleminekul laboritingimustest keerukatesse välikeskondadesse seisavad teadlased silmitsi mitmete väljakutsetega: mikroobide käitumise jälgimine kohapeal, ruumiliste ja ajaliste andmete edastamine sidusrühmadele ning ökosüsteemi ohutuse tagamine. Liitreaalsust (AR) uuritakse üha enam digitaalse liidesena, mis saab parandada visualiseerimist, reaajas jälgimist ja andmete tõlgendamist keskkonnateadustes. Kuigi AR-i on laialdaselt kasutatud keskkonnahariduses ja tööstusseires, on selle kasutamine mikroobse biopuhastuses esile kerkimas, mida toetavad edusammud georuumiliste andmete integreerimises, oomika visualiseerimises ja välipõhistes digitaalsetes liideses.

1. AR mikroobide aktiivsuse ja saasteainete lagunemise visualiseerimiseks

AR saab teadlasi aidata **visualiseerida mikroobide interaktsioone saasteainetega** 3D-s, asetatuna reaalsele keskkondadele. Välikatsetes on kriitilise tähtsusega mõista, kus ja kuidas mikroobid toimivad, eriti maa-alustes või veesüsteemides. Näiteks uraani biopuhastuse kohapealsel teostamisel on oluline ruumiline arusaam tsoonidest, kus *Geobakter* liikide aktiivsuse hindamine on tervendamise edukuse hindamisel ülioluline.

Uuringud on näidanud, et AR-i saab kasutada ülekatte loomiseks **keskkonna georuumilised andmed** näiteks saasteainete kontsentratsioonid, põhjavee vool või toitainete jaotus, füüsilistesse asukohtadesse tahvelarvutite või AR-prillide abil (Silva & Gültekin, 2021). See võimaldab väliteadlastel "näha", kus mikroobide aktiivsus eeldatavasti saavutab haripunkti, ja aitab korreleerida lagunemisnäitajaid keskkonnamuutujatega, nagu pH, redokspotentsiaal või biosaadavus.





2. AR ja multioomika integreerimine välitöödel

Üks peamisi väljakutseid välitöödel on järgmiste näitajate tõlgendamine: **multioomika andmed** (nt metagenoomika, transkriptoomika), mis on kogutud proovivõtukaevudest ja mullaproovidest. Traditsiooniliselt analüüsitakse neid andmekogumeid laborites ja visualiseeritakse arvutites. Siiski **AR võimaldab mikroobide geenide ekspressiooni reaajas ja asukohapõhist visualiseerimist** või rahvastiku nihked.

Näiteks AR-liidese abil saavad teadlased suunata seadme seirekaevule ja vaadata uraani redutseerimisega seotud geenide suhtelist arvukust (nt *koostöö*, *sodA*) või süsivesinike lagunemisradasid õliga saastunud muldades (Guo jt, 2023). See lähenemisviis mitte ainult ei toeta keerukate mikroobiandmete ruumilist tõlgendamist, vaid hõlbustab ka koostööd välitöörühmade ja laborianalüütikute vahel.

Hiljutised mikroobide ökoloogia uuringud on rõhutanud AR-i kasulikkust **metagenoomiliste andmete esitamine kontekstis**, parandades teaduslikku kommunikatsiooni ja võimaldades intuiitsemat otsuste langetamist kohapealse seire ajal (Wang jt, 2022).

3. AR riskihindamise ja ökoloogilise ohutuse jaoks

Välitingimustes tehtavad mikroobide testid peavad käsitlema ökoloogilisi ja ohutusprobleeme, eriti geneetiliselt muundatud organismide (GMOde) puhul. Liitreaalsus (AR) saab pakkuda visuaalset ülevaadet **riskikaart** esitlemiseks:

- Potentsiaalse mikroobide vohamise piirkonnad,
- Äärealad, kus sissetoodud mikroobid võivad levida,
- Lagunemiskolled või toksiliste kõrvalsaaduste tsoonid.

See lähenemisviis peegeldab liitreaalsuse kasutamist tervishoius ja bioohutuses, kus saastumisvõondite jälgimiseks kasutatakse reaajas kihte (nt Clean-AR õhus levivate riskide kaardistamiseks haiglates; Schmidt jt, 2021). Selle strateegia kohandamine keskkonna biopuhastusega võiks parandada reageerimist ja ohjeldamise planeerimist.

4. AR-toega suhtlus ja sidusrühmade kaasamine

Ulatuslikud biopuhastusprojektid hõlmavad sageli mitut sidusrühma: teadlasi, keskkonnaregulaatoreid, maaomanikke ja kohalikke kogukondi. **AR on osutunud tõhusaks teaduskommunikatsioonivahendiks**, võimaldades mittespetsialistidel mõista keerulisi tervendamisstrateegiaid (Garzón jt, 2019).

Pilootuuringutes on liitreaalsust kasutatud selleks, et **kavandatud sekkumiskavade katmine**, näiteks biobarjääri tsoonid või toitainete süstimise kaevud füüsilistel kaartidel või reaajas välitingimustes. See võimaldab sidusrühmadel visualiseerida võimalikke tulemusi, hinnata alade taastamise ajakava ja osaleda uurimisprotsessis sisukalt.

Kuigi mikroobse biopuhastuse valdkonnas on see alles arenev, **AR-tehnoloogiad on valmis oluliselt parandama välitegevust**, eriti kui see on integreeritud omikaandmete, georuumilise analüüsi ja ökoloogilise seirega. Need rakendused sobivad hästi kokku üleminekuga "laborist põllule", muutes nähtamatud bioloogilised ja keemilised protsessid reaajas kättesaadavaks, mõõdetavaks ja arusaadavaks. Kuna keskkonnauuringud digitaliseeruvad ja demokratiseeruvad jätkuvalt, paistab liitreaalsus silma paljulubava vahendina nii teadusliku ranguse kui ka avaliku läbipaistvuse toetamiseks.



5. Liitreaalsuse reaalse maailma näited keskkonna- või bioloogiasseotud valdkondades

Liitreaalsus (AR) on kiiresti arenenud visuaalse kaasamise tööriistast funktsionaalseks liideseks keerukaks teaduslikuks jälgimiseks ja otsuste langetamiseks. Keskkonnateaduses ja biotehnoloogias on AR hakanud ühendama füüsilisi maastikke reaajas andmetega, võimaldades teadlastel, inseneridel ja otsustajatel suhelda nähtamatute bioloogiliste või keemiliste protsessidega huvipakkuvas kohas.

Kuigi AR-i otsesed rakendused mikroobses biopuhastuses on alles väljatöötamisel, on üha rohkem reaalseid näiteid keskkonnaseire, saastekontrolli, andmete

visualiseerimise ja riskihindamine demonstreerib liitreaalsuse võimsat potentsiaali laborist välja protsesside täiustamisel. Allpool on toodud peamised näited, mis mõjutavad mikroobide puhastamist reaalses ökosüsteemides.

5.1. AR kohapealseks keskkonnaseireks ja andmete visualiseerimiseks

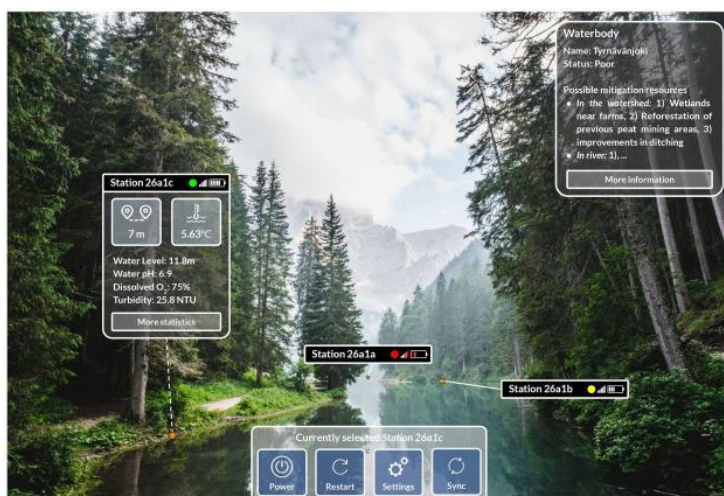
Ülevaade

Keskkonnaseire välitöödel hõlmab tavaliselt andurite paigaldamist, proovide kogumist ja kohapealsete analüüside tegemist – need meetodid viivitavad sageli reageerimisega ja piiravad ruumilist konteksti. Mikroobse biopuhastuse puhul muutub see eriti problemaatiliseks, kuna mikroobide aktiivsus, redokstingimused või saasteainete kontsentratsioonigradiendid on suures osas nähtamatud ja väga dünaamilised. Liitreaalsus (AR) lahendab need probleemid, võimaldades välitööde andmete reaajas ja ruumiliselt ankurdatud visualiseerimist, mis võimaldab teadlastel keskkonnateabega suhelda just seal, kus see on kõige olulisem (Wang jt, 2022; Pokrić jt, 2012).

Fig 2. A concept of an HMD-based AR application for visualising water quality, source: Cao et al., 2024

- Keskkonnateaduse andmed (nt pH, lahustunud hapnik, temperatuur),
- GIS-põhised asukohaplaanid (nt saasteallikate tsoonid),

või
See
keemilisi ja
tegelikul



- Ennustavad mudelid (nt COMSOL/MODFLOW),
 - Mikroobide aktiivsuse muustrid (nt eDNA-põhised arvukuse geeniekspressiooni profiilid).
- võimaldab teadlastel, keskkonnainseneridel või objektijuhtidel "näe" bioloogilisi protsesse rakendatakse väljal, hõlbustades





õigeaegseid ja tõendus põhiseid sekkumisi (Zhang jt, 2023).

Teaduslikud rakendused mikroobide bioremediatsioonis

Mikroobse tervendamise projektides saab AR abil:

- Kuvareaalajas kontsentratsioonid saasteainete, näiteks uraani, süsivesinike või nitraatide otse põllupinnal;
- Kattekiht mikroobide koloniseerimistsoonid (qPCR-i, eDNA või omicsi andmete põhjal) füüsiliste proovivõtukohtade kohtades;
- Näitabiosaadavuse tsoonid, kus saasteained on mikroobsele lagundamise teel ligipääsetavad või kättesaamatud mulla poorsuse või sidumisoleku põhjal (Guo jt, 2023);
- Visuaalselt esitamasüstimiskaevu mõjunt näidates, kuidas atsetaat levib maa all, et stimuleerida *Geobakter* populatsioonid (Lovley jt, 2003; Zhang jt, 2023).

Need rakendused muudavad biopuhastuse jälgimise reaktiivselt ennetavaks: potentsiaalseid rikkeid saab varakult tuvastada ja teadlased saavad reaalajas kaardi mikroobide aktiivsusest ja saasteainete käitumisest.

Näiteid reaalse maailma liitreaalsussüsteemidest

ekoNET: AR-toega keskkonnaseire platvorm

Arendatud asjade interneti põhise reostuse jälgimissüsteemina, **ekoNET** integreerib mobiilse liitreaalsuse keskkonnasensoritega, et visualiseerida reaalajas õhu- ja veekvaliteeti kohapeal (Pokrić jt, 2012). Kasutajad skaneerivad keskkonda mobiilseadmete abil, et vaadata saasteainete, näiteks CO₂, taset, EI₂ ja hägusust.

Bioremediatsiooni mõjud: Mikroobide välikatsetes saab sarnase seadistuse konfiguratsioonid nii, et see kuvaks kaarte järgmistest kohtadest:

- Pinnasealused saasteainete pilved,
- Toitainete difusioonitsoonid,
- Mikroobide konsortsiumidega täiustatud reaktiivsed tõkked.

Põhjavee visualiseerimine AR abil

Zhang jt (2023) töötasid välja liitreaalsuse tööriista põhjavee voolu, saasteainete hajumise ja puhastustaristu visualiseerimiseks georeferentseeritud 3D-mudelite abil. See süsteem võimaldas kasutajatel mõista saasteainete allikate, puhaste tsoonide ja mikroobide aktiivsuse tsoonide vahelisi ruumilisi seoseid reaalsetes tööstusobjektides.

Rakendus välikatsetele: Liitreaalsus võiks abistada mikroobse kahjuritõrje pilootprojektides, näidates, kuidas saasteainete kontsentratsioonid pärast mikroobide inokuleerimist või toitainete süstimist ruumiliselt muutuvad, otse kohapeal, ilma et oleks vaja GIS-platvorme konsulteerida või laboritulemusi oodata.

Integratsioon omika ja simulatsioonimudelitega

AR-il on kasvav potentsiaal toetada **multioomikal põhinev välitõlgendus** Wang jt (2022) demonstreerisid AR-i integratsiooni metagenoomikaga, mis võimaldab kasutajatel funktsionaalset geeniekspressiooni katta (nt *koostöö*, *alkB*, *narG*) kindlatele GPS-märgisega saitidele, luues mikroobide funktsioonide ruumilisi vaateid.

Asjakohasus mikroobide välikatsete jaoks:

- Välitöörühmad said reaalajas visualiseerida saasteainete lagunemisega seotud mikroobide aktiivsust.





- Omika andmeid saaks kasutada selleks, et kontrollida, kas mikroobid vähendavad aktiivselt saasteaineid või lihtsalt jäävad ellu.

Toitainete hajumise või mikroobide transpordi prognoosimiseks saab kasutada simulatsioonitööriistu, näiteks COMSOL-i või MODFLOW-i. Koos liitreaalsusega saavad need mudelid **projitseeri oodatavad tulemused otse ehitusplatsile**, aidates kaasa süstimis skeemide ja seirejaamade planeerimisele (Silva & Gültekin, 2021).

Bioremediatsiooni praktika eelised

1. **Reaalajas otsuste tegemine**
Kohapealsete visualiseeringute ja reaalajas andmete kombineerimise abil saavad välitöörühmad biopuhastusstrateegiaid kiiresti kohandada (nt toitainete sissepritsimise muutmine, proovivõtuplaanide muutmine).
2. **Parem ruumitaju**
Keemiliste gradientide või mikroobide arvukuse tsoonide visualiseerimine otse põllul aitab parandusmeetmeid täpsemalt suunata.
3. **Täiustatud suhtlus**
Sidusrühmad (nt maaomanikud, reguleerivad asutused) saavad paremini aru nähtamatutest protsessidest, luues usaldust ja võimaldades selgemat riskikommunikatsiooni.
4. **Ohutuse ja ohjeldamise jälgimine**
AR abil saab tuvastada tsoone, kus võib tekkida mikroobide vohamine või sekundaarsed saasteained, toetades bioohutust geneetiliselt muundatud organismidega seotud juhtudel (Schmidt jt, 2021).

5.2. Jõulise reovee väljavool: mikroobide ja keemilise dünaamika AR-modelleerimine

Välja töötanud Silva & Gültekin (2021), *Jõukas heitvesion* AR-rakendus, mis simuleerib saasteainete ja mikroobipopulatsioonide vahelist keskkonnainteraaktsiooni. Mudel hõlmab järgmist:

- Toitainete dünaamika,
- Mikroobide kasvufaasid,
- Saasteainete lagunemiskiirused.

1. Toitainete dünaamika

Definitsioon:

Toitainete dünaamika viitab **toitainete liikumine, muundumine, kättesaadavus ja omastamine** (nt süsinik, lämmastik, fosfor, hapnik või elektronidoonorid nagu atsetaat), mis toetavad mikroobide elu ja mõjutavad nende aktiivsust saastunud keskkonnas.

Bioremediatsiooni kontekstis:

- Põllu puhastamisel kasutatavad mikroorganismid sõltuvad saasteainete kasvamisest ja metaboliseerimisest olemasolevatest toitainetest.
- Mõnikord on toidained **loomulikult esinev**, aga paljudel juhtudel peavad need olema **kunstlikult lisatud** (biostimulatsioon) mikroobide lagunemise soodustamiseks.
- Näiteks uraaniga saastunud põhjaveekihtides **atsetaat** süstitakse stimuleerimiseks *Geobakter* liigid, mis kasutavad seda elektronidoonorina lahustuva U(VI) redutseerimiseks lahustumatuks U(IV)-ks (Lovley jt, 2003).

AR-modelleerimisel:

- Toitainete dünaamikat visualiseeritakse järgmiselt: **levikutsoonid või kontsentratsioonigradiendid** mis aja jooksul muutuvad.
- Tudengid või teadlased näevad, kuidas **toitaineterikkad alad** võimaldada mikroobide kasvu ja saasteainete lagunemist.





- Simulatsioon võib samuti näidata **konkurents toitainete pärast**, mis mõjutab domineerivaid mikroobe.

2. Mikroobide kasvufaasid

Definitsioon:

Mikroobide kasvufaasid kirjeldavad **neljaastmeline tsükkel** mida mikroobipopulatsioonid tavaliselt uude keskkonda või substraati viimisel järgivad:

1. **Mahajäämusfaas**– Kohandumisperiood, mille jooksul mikroobid kohanevad uute tingimustega (kasvu ei toimu).
2. **Logaritmiline (eksponentsiaalne) faas**– Kiire paljunemine tänu rohkele toitainele.
3. **Statsionaarne faas**– Kasv aeglustub, kuna toidained ammenduvad ja jäätmed kogunevad.
4. **Surmafaas**– Mikroobid surevad ressursside puuduse või mürgiste kõrvalsaaduste kogunemise tõttu.

Bioremediatsiooni kontekstis:

- Kasvufaaside mõistmine on võtmetähtsusega **välitööde ajastus** näiteks uuesti vaksineerimine või toitainete taaskasutamine.
- Näiteks kui mikroobide populatsioon on statsionaarses faasis, siis saasteainete lagunemine peatub ilma edasiste toiminguteta.

AR-modelleerimisel:

- Neid faase kujutatakse visuaalselt, näiteks **mikroobikolooniate mullid laienevad ja stabiliseeruvad** või muutes värvi, kui nad sisenevad erinevatesse faasidesse.
- Kasutajad saavad **kohanda tingimusi (nt temperatuur, toitainete tarbimine)** ja jälgida, kuidas kasvufaas nihkub, aidates neil mõista **õrn tasakaal** vajalik edukaks välitingimustes toimuvaks biopuhastuseks.

3. Saasteainete lagunemiskiirused

Definitsioon:

Saasteainete lagunemiskiirus on **kiirus, millega konkreetne saasteaine laguneb või muundub** mikroobsete või keemiliste protsesside abil vähem kahjulikeks aineteks.

Bioremediatsiooni kontekstis:

- Mikroobid võivad saasteaineid lagundada järgmiselt:
 - o **Aeroobne lagunemine** (hapnikuga) – nt süsivesinikud *Pseudomonas* spp.
 - o **Anaeroobne lagunemine** (ilma hapnikuta) – nt uraan või nitraat *Geobakter* spp.
- Lagunemiskiirust mõjutavad tegurid on järgmised:
 - o Mikroobide tüve efektiivsus,
 - o Temperatuur ja pH,
 - o Saasteaine kontsentratsioon ja keemiline vorm,
 - o Toitainete kättesaadavus ja redokstingimused.

AR-modelleerimisel:

- Lagunemismäärasid esitatakse järgmiste näitajate kaudu: **visuaalse lagunemise kõverad, saasteainete pilva värvimuutused** või **ajastatud animatsioonid** näitab, kui palju saasteainet aja jooksul alles jääb.
- Kasutajad saavad jälgida, kuidas muutuvad keskkonnatingimused (nt rohkemate toitainete sissepritsimine või pH muutmine) mõjutavad lagunemise ajakava.





Miks need kolm on omavahel seotud

Need kolm protsessi, **toitainete kättesaadavus**, **mikroobide kasv** ja **saasteainete lagunemine**, moodustavad **dünaamiline tagasisideahel** biopuhastuses:

1. **Toitainete kättesaadavus** mõjutab...
2. **Mikroobide kasv**, mis juhib...
3. **Saasteainete lagunemine**, mis võib tarbida toitaineid ja toota kõrvalsaadusi, mõjutades mikroobide tervist.

Selle süsteemi modelleerimine AR-is võimaldab kasutajatel **näe neid vastastikuseid sõltuvusi** tegutsedes, pakkudes sügavat arusaamist keskkonnateadlastele, üliõpilastele või välitehnikutele.

Peamised omadused:

- Visualiseerib keemilise kontsentratsiooni muutusi ajas;
- Simuleerib mikroobide reaktsioone erinevate keskkonnastressorite korral;
- Töötab mobiilsetel liitreaalsuse platvormidel (nt nutitelefoni, tahvelarvutid).

Seos bioremediatsiooniga:

See rakendus esindab varajast, kuid praktilist lähenemist **modelipõhine liitreaalsus parandusprotsesside simuleerimiseks**, aidates teadlastel või üliõpilastel ennustada tulemusi välitingimustes. Reaalsetes tervendusprojektides saavad sellised tööriistad toetada sissepritseskeemide või toitainete lisamise planeerimist, näidates eeldatavat mikroobide käitumist ajas ja ruumis.

5.3. AR linna- ja tööstusreostuse teadlikkuse suurendamiseks

Itaalia teadlased on õhusaaste avalikkuse teadlikkuse suurendamiseks rakendanud liitreaalsussüsteemi. Süsteem kattub **Õhukvaliteedi indeksi (AQI) näitajad ja saasteainete allikad** füüsilistesse asukohtadesse GIS-i ja mobiilse liitreaalsuse abil.

Juhtumiuuring:

- Marche piirkond, Itaalia (Sanità jt, 2024): Süsteem integreeris satelliidiandmeid, linnaandureid ja õhukvaliteedi indeksi mudeleid, võimaldades kasutajatel saastunud alasid "läbi jalutada" ja visualiseerida NO₂ taset, PM_{2.5} ja osooni reaalajas.

Seos bioremediatsiooniga:

Kuigi see kasutusjuhtum töötati välja linnaõhu saastatuse jaoks, illustreerib see **AR-i visuaalne jõud nähtamatute keskkonnohtude näitamisel**. Samamoodi saab AR-i kohandada mikroobide väljade uurimiskohtadele, et näidata raskmetallide või õli maa-aluseid koldeid, mikroobide aktiivsuse levialasid või arenevaid redokstsoone, mis mõjutavad saasteainete biosaadavust.

5.4. Liitreaalsus interaktiivseks väliplaneerimiseks vee- ja pinnaseprojektides

Tööstuslikus keskkonnareostuse kõrvaldamises on mitme sisendi, proovivõtukaevude, sissepritsepunktide ja kohalike liikide tsoonide haldamine logistiliselt keeruline. Liitreaalsus saab toetada:

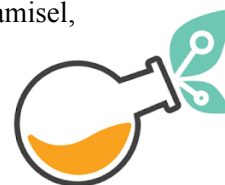
- Taristuelementide kohapealne kihistamine;
- Edusammude jälgimine (nt puhastatud tsoonid, mikroobide arvukus);
- Sissepritsepilvede ja lagunemisfrondi liikumise simulatsioon.

Näide:

- **Mobiilne liitreaalsus keskkonnaseireks** (Stojanovic jt, 2012): Demonstreerisid mobiilsete liitreaalsuse platvormide kasutamist georeferentsandmetega seotud keskkonnasimulatsioonide visualiseerimiseks.

Seos bioremediatsiooniga:

See mudel saab otseselt täiustada **välilogistika ja kommunikatsioon** mikroobide puhastamisel,





võimaldades reaajas kontrollida, millised tsoonid vajavad mikroobide taasinokuleerimist, kus saasteainete tase langeb või kuidas mikroobikooslused pärast töötlemist muutuvad.

5.5. Clean-AR: AR riskide kaardistamiseks ja saastumise kontrollimiseks

Algselt töötati see välja haiglate jaoks õhus levivate haiguste riskide haldamiseks, **Puhas AR** kasutab AR-prille ja 3D-modelleerimist järgmiseks:

- Tuvastage saastumisteed.
- Tõsta esile kõrge riskiga pinnad.
- Jälgige patogeenide levikut reaajas (Schmidt jt, 2021).

Seos bioremediatsiooniga:

Välitingimustes mikroobide puhul, eriti geneetiliselt muundatud mikroobide puhul, jälgimine **ökoloogilised ohjeldamisvõõndid** on oluline. AR-i saab sarnaselt kasutada järgmiselt:

- Märgi piirid, kus sissetoodud mikroobid ei tohiks levida.
- Tuvastage biokile vohamise tsoonid.
- Teavitage teadlasi tahtmatust mikroobide migratsioonist väljaspoole ravitsooni.

See tagab **bioohutuse nõuetele vastavus ja läbipaistev dokumentatsioon**, eriti regulatiivselt tundlikes kontekstides.

5.6. Tärkav uurimistöö: AR + multioomika välibioinformaatikas

Hiljutised uuringud näitavad, et AR saab integreeruda **omika platvormid** (metagenoomika, metaboolomika, transkriptoomika) mikroobide funktsionaalsete andmete esitamiseks kosmoses.

Näide:

- Wang jt (2022) arendasid liitreaalsuse visualiseerimismootori, mis integreerib keskkonna-DNA (eDNA) andmed GPS-koordinaatidega, et luua ruumiliselt täpseid mikroobide mitmekesisuse ja funktsionaalsete tunnuste kihte reaalsetes maastikes.

Seos bioremediatsiooniga:

Sellel on otsene kasulikkus väliuuringutes, kus teadlased peavad hindama, kas mikroobid lagundavad aktiivselt saasteaineid, ekspresseerides spetsiifilisi geene (*ntalkB*, *pahR*, *koostöö*) või moodustades konsortsiume. Liitreaalsuse abil saaks selliseid andmeid kohapeal visualiseerida koheseks ökoloogiliseks tõlgendamiseks.

Need reaalsed näited demonstreerivad, kuidas liitreaalsust kasutatakse keskkonnasektorites saastumise visualiseerimiseks, tervendamise dünaamika simuleerimiseks, ökoloogilise riski jälgimiseks ja mikrobioloogiliste andmete tõlgendamiseks. Iga näide pakub **mikroobse biopuhastuse jõupingutuste tõlgitav meetod**, eriti välikatsete ajal, kus ruumiteadlikkus, reaajas jälgimine ja ohutus on kriitilise tähtsusega.

Faas	Kirjeldus
Ava sta	-Teaduslik avastusTuvastage õpilastele mikroobide reaalseid kasutusvõimalusi reostuse kontrollimisel.
	-Juhtumipõhine uuringAnalüüsige tegelikke juhtumianalüüse (nt õlireostuse koristamine <i>Alcanivorax</i> või uraani puhastamine <i>Geobakter</i>).





	-Vajaduste analüüsTuvastage väärarusaamad või lüngad mikroobide tegevuse ja keskkonnaprobleemide mõistmisel.
Käi vita	-Interaktiivsed tunnidJuhendage õpilasi laborist välitöödele üleminekul, kasutades mikroobianimatsioone ja päriselulisi videoid.
	-AR-uuringKasutage tööriistu nagu CoSpaces või Assemblr EDU, et simuleerida välitöid ja visualiseerida saasteainete lagunemist aja jooksul.
	-GrupiülesandedÕpilased loovad liitreaalsuse abil mikroobide puhastusmudeleid või stsenaariume, et esitleda mikroobide lagunemist.
Täi ust am a	- AR-integratsioon: õpilased uurivad mikroobide levialasid, toitainete tsoone ja reostusgradiente, kasutades AR-i kihte.
	- Interaktiivne õpe: loo virtuaalseid puhastustsoone (nt õlireostuse koha AR-kaart ja mikroobide pealekandmise strateegia).
	Mängustatud sisu: Mikroobsete faaside või AR-interaktsioonide õige tuvastamise punktid • Ülesanded erinevate saasteainete (nt nafta vs raskmetallid) puhastamiseks • Koostöös toimuvad „mikroobide ja saasteainete” lahingud konkurentsivõimelise kasvudünaamika simuleerimiseks
	AR-põhised hinnangud: - AR-integreeritud hindamised, kus õpilased: • Simuleerige saasteainete lagunemist • Ühenda mikroobid saasteainetega • Tõlgendada reaalse maailma andmekogumeid (nt saasteainete kontsentratsiooni langus) - AR-stsenaariumide formatiivne vastastikune hindamine - Lõppülesanne: Õpilased kavandavad ja esitlevad mikroobidel põhinevat liitreaalsuse puhastusplaani saastunud ökosüsteemi jaoks.

Viited

- Anderson, R. T., Vrionis, H. A., Ortiz-Bernad, I., Resch, J. T., Long, P. E., Dayvault, R., ... & Lovely, D. R. (2003). *Geobacteri liikide kohapealse aktiivsuse stimuleerimine uraani eemaldamiseks uraaniga saastunud põhjaveekihi põhjaveest* Rakendus- ja keskkonnamikrobioloogia, 69(10), 5884–5891.
- Banerjee, R., Singh, J. ja Sarkar, A. (2024). *Biokonvektsioon ja bakterite transport läbi poorse keskkonna: mõju in situ bioremediatsioonile*. Keskkonnavedelike mehaanika, 24(2), 167–185.
- Biokile rakendused keskkonna puhastamisel. [Vikipeedia](#)
- Biokonvektsioon ja mikroobide liikuvus poorses keskkonnas. [arXiv](#)
- Beccari, M., Di Palma, L., Lombardi, F., & Majone, M. (2010). *Kroomiga saastunud põhjaveekihi puhastamise pilootprojektid biobarjääri ja reaktiivse tsooni tehnoloogiate abil*. Ohtlike materjalide ajakiri, 178(1-3), 875–882.
- Blanck, H. (2002). *Reostusest tingitud kogukonna tolerantsi (PICT) kriitiline ülevaade ja selle kasutamine keskkonnariskide hindamisel*. Keskkonnatoxicoloogia ja keemia, 21(3), 503–511.
- Cao, J., Liu, X., Su, X., Hædahl, J. E., Berg Fjellestad, T., Haziri, D., Hoang, A. N., Vu, A., Koskiahho, J., Karjalainen, S. M., Ronkanen, A. K., Tarkoma, S., Hui, P., 2024, *Pea külge kinnitatav ekraanipõhine liitreaalsus vee kvaliteedi visualiseerimiseks*. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.12.002>
- Juhtumid, I. ja de Lorenzo, V. (2005). *Geneetiliselt muundatud organismid keskkonna heaks: edulood ja ebaõnnestumised ning mida me neist õppinud oleme*. Rahvusvaheline Mikrobioloogia, 8(3), 213–222.





Põhjalik ülevaade: *PAH-idega saastunud ala biopuhastus täismõõdulises bioaias* (2024). [ScienceDirect](#)

Flemming, H.-C. ja Wuertz, S. (2019). *Bakterid ja arhead Maal ning nende arvukus biokilledes. Looduse ülevaated mikrobioloogiast*, 17(4), 247–260

Garzón, J., Pavón, J. ja Baldiris, S. (2019). *Liitreaalsuse süstemaatiline ülevaade ja metaanalüüs hariduskeskkonnas* Haridusuuringute ülevaade, 27, 244–260.

Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K. ja Ahn, Y. (2016). *Polütsükliliste aromaatsete süsivesinike (PAH-de) mikroobse lagundamise praegune tase: ülevaade* Mikrobioloogia piirid, 7, 1369.

Guo, J., Lin, X., Zhao, M. jt. (2023). *Integreeritud oomika mikroobide jälgimiseks naftaga saastunud pinnase välitingimustes toimuva biopuhastamise ajal* Kogu keskkonna teadus, 869, 161–1649.

Hemme, C.L., Careley, R., Norton, A., Ghuman, M., Nguyen, H., Ivone, R., Umenon, J., Shen, J., Bertin, M., King, R., Leibovitz, E., Bergstrom, R., Cho, B., 2023, Virtual- ja liitreaalsuse arendamine Rakendused loodusteaduste, tehnoloogia, inseneriteaduste ja matemaatika õpetamisel, *BioTechniques* 75: 11–20, 10.2144/btn-2023-0029

Holmes, D. E., Utturkar, S. M., D'haeseleer, P. jt. (2007). *Uraaniga saastunud pinnasealustes setetes kasvava Geobacter uraniireducens transkriptoom*. ISME ajakiri.

Lovley, D. R. jt (2003). *Geobacteri liikide kohapealse aktiivsuse stimuleerimine uraani eemaldamiseks uraaniga saastunud põhjaveekihi põhjaveest*. *Rakendus- ja keskkonnamikrobioloogia*, 69(10), 5884–5891.

Keller, A. A. ja Yang, R. T. (2021). *Ennustav modelleerimine bioremediatsioonis: teooriast välirakenduseni*. *Keskkonnateadus ja -tehnoloogia*, 55(8), 5082–5094.

Lovley, D. R. jt (2022). *Keskkonna biotehnoloogia: biopuhastus mikroobsüsteemide abil* Mikrobioloogia aastaülevaade, 76, 145–165.

Madison, A. S., Sorsby, S. J., Wang, Y. ja Key, T. A. (2022). *Kohapealse bioremediatsiooni efektiivsuse suurendamine molekulaarbioloogiliste vahendite välitööde abil*. Mikrobioloogia piirialad.

Multioomilised lähenemisviisid mikroobide ökoloogias veemajanduses. [arXiv](#)

Reostusest tingitud kogukonna taluvuse meetodi ülevaade. [Vikipeedia](#)

Pokrić, B. jt (2012). *ekoNET: keskkonnaseiresüsteem, mis kasutab liitreaalsust ja andurite liitmist* Traadita ja mobiilsidevõrkude ajakiri.

Prince, R. C., McFarlin, K. M., Butler, J. D. ja Febbo, E. J. (2013). *Dispergeeritud toornafta esmane biolagundamine meres* Kemosfäär, 90(2), 521–526.

Hiljutine põhjaveekihi uuring välitingimustes: *Bioremediatsioonimehhanismide mõju põhjavee uraani vähendamisele* (2024). [ScienceDirect](#)

Jätkusuutliku biopuhastusstrateegiate ülevaade (2024). [ScienceDirect](#)

Tervis, M. jt (2024). *Liitreaalsus õhukvaliteedi jälgimiseks Marche piirkonnas Itaalias* WJARR, 22(1), 120–128.

Schmidt, A., Barz, M. ja Wittstock, A. (2021). *Clean-AR: liitreaalsuse kasutamine õhus levivate haigustekitajate põhjustatud saastumise ohu vähendamiseks pindadel* Biomeditsiinitehnika praegused suunad, 7(1), 159–162.

Semple, K. T., Doick, K. J., Jones, K. C. jt (2004). *Saastunud pinnase ja sette biosaadavuse ja bioligipäasetavuse määratlemine on keeruline*. *Keskkonnateadus ja -tehnoloogia*.

Silva, E. R., & Gültekin, A. (2021). *Liitreaalsusega täiustatud loodusteaduste õpe põhikooliõpilastele: õppijate kaasamine reostuse ja jätkusuutlikkuse teemadesse* STEM-hariduse ajakiri, 22(3), 45–53.

Singh, J. S., Abhilash, P. C. ja Singh, H. B. (2023). *Mikroobide biopuhastus: keskkonna puhastamise ja jätkusuutlikkuse strateegiad* Kogu keskkonna teadus, 892, 164503.

Stojanovic, J. jt (2012). *Mobiilne liitreaalsus keskkonnaseireks* Personaal- ja kõikjalolev andmetöötlus, 16(8), 1027–1039.

Cr(VI) saasteainete kõrvaldamise uuring *Geobakteriliik: Cr(VI)-ga saastunud põhjavee biopuhastus* (2019). [Wikipedia+3ScienceDirect+3Wikipedia+3](#)

Thomsen, P. F. ja Willerslev, E. (2015). *Keskkonna-DNA – uus tööriist looduskaitstes mineviku ja oleviku bioloogilise mitmekesisuse jälgimiseks*. *Bioloogiline kaitse*, 183, 4–18.



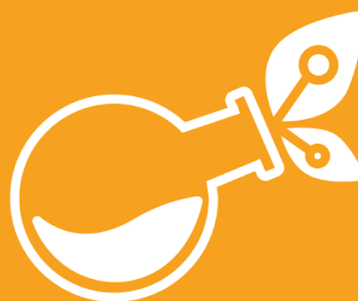


- Wang, X., Gao, Y. ja Liu, J. (2022). *Keskkonnaseire metagenoomikaandmete liitreaalsusel põhinev visualiseerimine* Arvutiteaduse piirid, 4, 934694.
- Wu-Juan Sun jt (2024). *Naftaga saastunud pinnase aktiveeritud mikroobse puhastamise katseprojektid välitöödel* (Keskkonna Geokeemiline Tervis). [ResearchGate+1PubMed+1](#)
- Xiong, W., Chen, L., Gao, H. jt. (2025). *Raskmetallide reostus ja muundumine pinnases: looduslike biopuhastusstrateegiate põhjalik ülevaade*. Umm Al-Qura rakendusteaduste ülikooli ajakiri.
- Yakimov, M. M., Timmis, K. N., & Golyshin, P. N. (2007). *Kohustuslikud naftat lagundavad merebakterid: võtmeisikud naftareostuse puhastamisel* Looduse ülevaated Mikrobioloogia, 5(10), 803–812.
- Zhang, Y., Karpf, A. ja Brovelli, M. A. (2023). *Liitreaalsus põhjavee visualiseerimiseks tööstusliku seire ja objektide puhastamise eesmärgil*. Arvutid ja geoteadused, 173, 105055.





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.