



Co-funded by
the European Union

Vom Labor zum Feld: Wie Wissenschaftler die mikrobielle Sanierung in realen Ökosystemen testen



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."

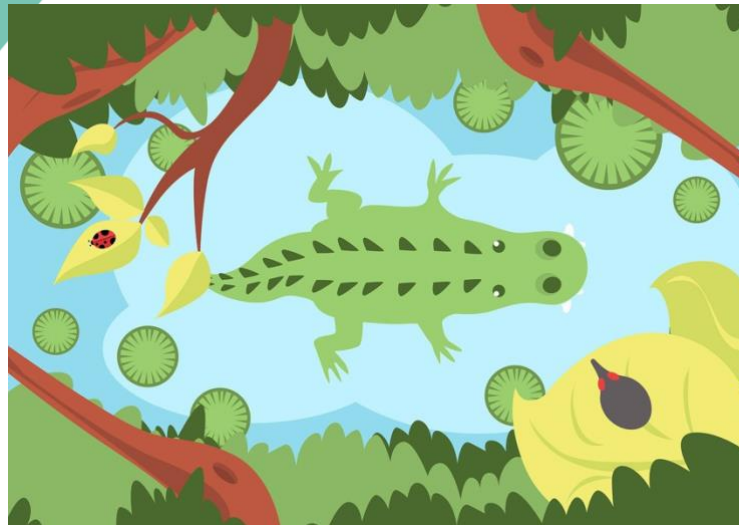




INHALTSVERZEICHNIS

· Einleitung.....	2
· Warum Feldversuche unerlässlich sind.....	3
· Vom Erfolg im Labor zur Strategie im Feld	4
· Fallstudien aus der Praxis	9
· AR-Integration in Feldversuchen zur mikrobiellen Bioremediation	11
· Beispiele für AR in der Praxis in umwelt- oder biologisch relevanten Bereichen	13
· Ressourcen.....	22





Allgemeines Thema des Lernpfads	Bioremediation und Umweltsanierung mit Mikroorganismen (bioinspirierte Lösungen)
Spezifischer Name der Lerneinheit	<i>Vom Labor zum Feld: Wie Wissenschaftler die mikrobielle Sanierung in realen Ökosystemen testen</i>
Zielgruppe	14–18 Jahre
Voraussetzungen für Lernende	Grundkenntnisse in Biologie, Chemie und Umweltwissenschaften
Beschreibung der Lerneinheit	Diese Einheit führt die Schüler in die mikrobielle Bioremediation in der Praxis ein. Mithilfe von AR-Tools untersuchen die Schüler, wie Wissenschaftler die mikrobielle Sanierung von Laborbedingungen bis hin zu tatsächlich verschmutzten Standorten konzipieren, überwachen und bewerten. Der Schwerpunkt liegt auf mikrobieller Ökologie, Schadstoffdynamik und der Verwendung von Augmented Visualization zum Verständnis von Umweltprozessen.
Beteiligte Fächer	Biologie, Chemie, Umweltwissenschaften, Technologie
Stichworte	Bioremediation, Mikroben, Bioinspiriert, AR, Feldversuche, Umweltsanierung, MINT, Visualisierung
Zu erwerbende Schlüsselkompetenzen, Fähigkeiten und Kenntnisse	- Verständnis der Rolle von Mikroorganismen beim Abbau von Schadstoffen - Visualisierung der biologischen Sanierung durch AR - Interpretation von Umweltdaten - Problemlösung und Systemdenken in ökologischen Kontexten - Entwurf einfacher AR-gestützter Sanierungsmodelle
Verwendete Ressourcen und didaktische Hilfsmittel	Wissenschaftliche Literatur (z. B. AEM, Frontiers), pädagogische AR-Tools (z. B. JigSpace, Merge Cube), Umweltfallstudien, virtuelle Exkursionen, Simulationsdaten
Bewertungskriterien und Beurteilung	Bewertung durch AR-basierte Aufgaben: Visualisierung von Verschmutzung, Simulation mikrobieller Aktivität, Quiz zu Abbaupwegen und reflektierendes Feedback zu virtuellen Labor-Feld-Szenarien



Einführung:

Jenseits der Petrischale – Testen der mikrobiellen Reinigung in der realen Welt



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

Wenn wir an Wissenschaft in Aktion denken, stellen wir uns oft weiße Laborkittel, Mikroskope und Petrischalen vor, saubere, kontrollierte Umgebungen, in denen unter perfekten Bedingungen Entdeckungen gemacht werden. Und obwohl dies ein wichtiger Teil des wissenschaftlichen Prozesses ist, erfordert die Lösung realer Probleme wie Umweltverschmutzung mehr als nur Erfolge im Labor. Hier kommen Feldversuche ins Spiel, bei denen man das, was im Labor funktioniert, in die Natur überträgt, um zu sehen, ob es dort überlebt und erfolgreich ist.

Eines der spannendsten Werkzeuge in der Umweltwissenschaft ist heute die biologische Sanierung, ein Verfahren, bei dem winzige Lebewesen wie Bakterien und Pilze zur Reinigung verschmutzter Umgebungen eingesetzt werden. Diese Mikroben können schädliche Substanzen wie Öl, Schwermetalle oder giftige Chemikalien „fressen“ und in harmlose Stoffe umwandeln. Im Labor haben Forscher Hunderte von Mikrobenarten entdeckt, die eine Vielzahl von Substanzen verdauen können, darunter Dieselmotorenkraftstoff, Chrom und Uranverbindungen (Lovley et al., 2022). Aber können dieselben Mikroben auch in einem verschmutzten Fluss, einem kontaminierten Wald oder einer Giftmülldeponie überleben? Das ist die große Frage.

Die Natur ist unvorhersehbar. Faktoren wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, Wasserströmung und die Anwesenheit anderer Organismen beeinflussen das Verhalten von Mikroben außerhalb





des Labors. Selbst wenn ein Mikroorganismus in einer Petrischale hervorragend Schadstoffe abbaut, funktioniert dies möglicherweise überhaupt nicht, wenn er in einen See oder in den Boden freigesetzt wird. Beispielsweise gedeiht *Alcanivorax borkumensis*, ein natürlich vorkommendes Meeresbakterium, in ölverseuchtem Meerwasser und hilft beim Abbau von Kohlenwasserstoffen, jedoch nur unter bestimmten Temperatur- und Nährstoffbedingungen (Yakimov et al., 2007). Aus diesem Grund müssen Wissenschaftler Strategien zur biologischen Sanierung in realen Ökosystemen testen, und zwar durch kleine Experimente, die als Pilotstudien oder Feldversuche bezeichnet werden.

Diese Versuche helfen den Forschern zu verstehen, ob die ausgewählten Mikroben wirksam und sicher sind und unter natürlichen Bedingungen überleben können. So haben Forscher beispielsweise in Rifle, Colorado, Feldversuche mit *Geobacter*-Arten durchgeführt, um die Uranverseuchung im Grundwasser zu reduzieren, indem sie ihnen einfache Nährstoffe wie Acetat injizierten (, Anderson et al., 2003). In einem anderen Projekt in Italien schufen Wissenschaftler eine „Biobarriere“ in einem Grundwasserleiter, um die Reduzierung von sechswertigem Chrom (Cr VI) im Grundwasser mit Hilfe natürlich vorkommender Mikroben zu testen (Beccari et al., 2010). Diese Experimente in der Praxis liefern wertvolle Erkenntnisse darüber, wie die biologische Sanierung sicher und effektiv in größerem Maßstab angewendet werden kann.

In dieser Einheit erfahren Sie, wie Wissenschaftler Mikroben aus dem Labor in die Praxis übertragen und wie sie mikrobielle Sanierungsmaßnahmen sorgfältig vorbereiten, testen und überwachen. Außerdem werden Sie reale Fallstudien kennenlernen, in denen die biologische Sanierung zur Wiederherstellung verschmutzter Gebiete beigetragen hat, und erfahren, welchen Herausforderungen Forscher bei der Arbeit in komplexen natürlichen Umgebungen gegenüberstehen. Vor allem aber werden Sie sehen, wie diese Arbeit eine sauberere, nachhaltigere Zukunft gestaltet und wie die Wissenschaft über das Labor hinausgeht, um den Bedürfnissen unseres Planeten gerecht zu werden (Singh et al., 2023).

2. Warum Feldversuche unerlässlich sind

Bevor Mikroben in großem Maßstab zur Beseitigung von Verschmutzungen eingesetzt werden können, müssen Wissenschaftler sie außerhalb des Labors unter realen Bedingungen testen. Dieser Prozess wird als Feldversuch bezeichnet und ist ein entscheidender Schritt, um sicherzustellen, dass die biologische Sanierung sowohl wirksam als auch sicher ist, wenn sie in natürlichen Umgebungen wie Flüssen, Seen, Böden oder sogar unterirdischen Wasserquellen angewendet wird. Feldversuche liefern Antworten auf wichtige Fragen: *Werden die Mikroben überleben? Werden sie sich im Feld genauso verhalten wie im Labor? Könnte es zu unerwarteten Folgen kommen?*

2.1. Labor vs. Feld: Kontrollierte vs. komplexe Umgebungen

Im Labor können Wissenschaftler fast alles kontrollieren: Temperatur, pH-Wert, Feuchtigkeit, Nährstoffe und die Art der Schadstoffe. In der Natur ist es jedoch viel chaotischer. Im Feld können Mikroben folgenden Bedingungen ausgesetzt sein:





- Temperaturschwankungen (die die Stoffwechselaktivität beeinflussen),
- Niedrige Nährstoffkonzentrationen (die das Wachstum von Mikroben verringern),
- Anwesenheit einheimischer Mikroorganismen (die konkurrieren oder stören können),
- schwankende Schadstoffkonzentrationen (die für den Abbau zu hoch oder zu niedrig sein können),
- physikalische Barrieren wie Bodenpartikel oder Sauerstoffmangel (insbesondere unterirdisch oder unter Wasser).

Beispielsweise baut *Pseudomonas putida*, ein Bakterium, das häufig in der Bioremediation-Forschung verwendet wird, Öl und Lösungsmittel in Laborkulturen effizient ab. In Feldeböden mit gemischten Schadstoffen kann seine Effizienz jedoch aufgrund der Konkurrenz mit lokalen Mikroorganismen-Gemeinschaften und einer unregelmäßigen Sauerstoffversorgung sinken (Cases & de Lorenzo, 2005).

2.2. Verständnis der Bioverfügbarkeit in der realen Welt

Im Labor liegen Schadstoffe oft in gelöster oder zugänglicher Form vor, aber in der Natur können sie in Bodenpartikeln eingeschlossen oder in Sedimentschichten verborgen sein. Dadurch sind sie für Mikroben schwerer zu „erreichen“ und abzubauen. Dieses Konzept wird als Bioverfügbarkeit bezeichnet und bezieht sich auf die Zugänglichkeit eines Schadstoffs für mikrobielle Prozesse.

Beispielsweise ist Öl, das nach einer Verschmutzung in feinen Sedimenten eingeschlossen ist, viel schwieriger zu reinigen als Öl, das auf dem Wasser schwimmt, da Mikroben nicht so leicht darauf zugreifen können (Prince et al., 2013). Bei Feldversuchen müssen Wissenschaftler nicht nur die Fähigkeit der Mikroben bewerten, sondern auch, ob die Verschmutzung physikalisch verfügbar ist, um abgebaut zu werden.

2.3. Überwachung der Sicherheit und der Auswirkungen auf die Umwelt

Ein wichtiger Grund für Feldversuche ist die Gewährleistung der Sicherheit. Selbst wenn ein Mikroorganismus Schadstoffe abbaut, kann er unbeabsichtigte Nebenwirkungen haben:

- Sie könnte einheimische Arten verdrängen.
- Sie könnte schädliche Nebenprodukte produzieren.
- Sie könnte sich über das vorgesehene Gebiet hinaus ausbreiten.

Feldversuche ermöglichen es Forschern, diese Ergebnisse zu überwachen und die Ausbreitung oder Auswirkungen der eingeführten Mikroben zu begrenzen. Beispielsweise testen Forscher gentechnisch veränderte Mikroben (GVO) nur an sicheren Feldstandorten unter strengen Auflagen, bevor sie einen breiteren Einsatz in Betracht ziehen (Ghosal et al., 2016).

3. Vom Erfolg im Labor zur Strategie im Feld

Die Übertragung einer mikrobiellen Reinigungsmethode vom Labor auf einen verschmutzten Standort ist weit mehr als nur eine Skalierung. Sie erfordert sorgfältige Planung und Tests, um sicherzustellen, dass die Mikroben unter realen Bedingungen effektiv arbeiten. Feldversuche umfassen mehrere Phasen – von der Auswahl eines kontaminierten Standorts und der Vorbereitung der Mikroben über deren Einsatz und die Überwachung ihrer Aktivität im Laufe der





Zeit bis hin zur Auswertung der Ergebnisse. Diese Schritte helfen zu überprüfen, ob die Mikroben außerhalb kontrollierter Umgebungen gedeihen, richtig mit den einheimischen Gemeinschaften interagieren und tatsächlich die Verschmutzung in komplexen Umgebungen reduzieren können.

Mehrere aktuelle Studien unterstreichen die Bedeutung dieses Prozesses. Feldversuche in mit Uran verschmutzten Grundwasserleitern haben gezeigt, dass die Stimulierung einheimischer Geobacter-Arten den Gehalt an löslichem Uran auf ein unbedenkliches Maß reduzieren kann (turn0search0, turn0search6). In ähnlicher Weise zeigt ein Pilotprojekt zum Biopiling für mit PAHs kontaminierte Böden, dass die mikrobielle Sanierung sowohl effektiv als auch kosteneffizient sein kann, obwohl standortspezifische Barrieren wie Bodenstruktur und Klima die Ergebnisse erheblich beeinflussen (turn0search1, turn0search9). Diese Erkenntnisse bestätigen, dass Feldversuche für das Verständnis von Variabilität, Bioverfügbarkeit, mikrobieller Dynamik und ökologischer Sicherheit von entscheidender Bedeutung sind.

In den folgenden Abschnitten erfahren Sie, wie Wissenschaftler ein Feldversuchsprogramm entwerfen und durchführen, unterteilt in wesentliche Schritte. Die folgende Tabelle stellt diese Schritte übersichtlich dar, anschließend wird jeder Schritt anhand zusätzlicher Unterthemen näher erläutert, um das Lernen zu bereichern.

3.1. Schritte bei Feldversuchen: Übersichtstabelle

Schritt	Unterthemen	Zweck
A. Standortauswahl und Bewertung der Verschmutzung	• Geochemische Profilierung • Natürliche mikrobielle Basislinie • Bioverfügbarkeitsanalyse	Verständnis der Standortbedingungen und der Schadstoffbelastung
B. Auswahl oder Stimulierung von Mikroben	• Einheimische vs. eingeführte Arten • Stimulierte Konsortien • Genetische/technische Verbesserungen	Auswahl von Mikroben, die auf Schadstoffe und Ökosystem abgestimmt sind
C. Zufuhr und Konditionierung	• Nährstoffzusätze (z. B. Acetat) • Einrichtung einer Biobarriere • Nutzung von Biofilmen	Mikroben einsetzen und Überleben/Aktivität fördern
D. Überwachung und Nachverfolgung	• Chemische Probenahme • Molekulare Werkzeuge (DNA/RNA) • Veränderungen in der Gemeinschaft und PICT-Bewertung	Verfolgung des Rückgangs von Schadstoffen und des Verhaltens von Mikroorganismen
E. Bewertung der Ergebnisse und Skalierung	• Kennzahlen zur Schadstoffreduktion • Sicherheit/ökologische Auswirkungen • Planung der Skalierung	Erfolgsmessung und Leitlinien für die zukünftige Anwendung





3.2. Ausführliche Erläuterung und Unterthemen

A. Standortauswahl und Bewertung der Verschmutzung

Die Identifizierung eines Standorts für die biologische Sanierung erfordert eine gründliche Untersuchung. Wissenschaftler beginnen mit einer geochemischen Profilierung und untersuchen Boden- oder Grundwasserparameter wie pH-Wert, gelösten Sauerstoff, Redoxpotenzial und Nährstoffgehalt, die darüber entscheiden, ob Mikroben überleben und Schadstoffe abbauen können (Madison et al., 2022). Außerdem legen sie eine mikrobielle Basislinie fest, indem sie 16S-rRNA-Gene sequenzieren, um native Populationen zu identifizieren, darunter Bakterien, die chlorierte Lösungsmittel oder Erdölkohlenwasserstoffe abbauen können (Madison et al., 2022). Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Bewertung der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen, d. h. wie zugänglich ein Schadstoff für Mikroben ist. Stark sorbierte Substanzen in lehmreichen Böden oder in nichtwässrigen Flüssigkeiten eingeschlossene Substanzen müssen möglicherweise angereichert werden, bevor der biologische Abbau stattfinden kann (Semple et al., 2004).

Zusammen helfen diese Schritte dabei, einen Standort auszuwählen, an dem sowohl die Umweltbedingungen als auch das Vorhandensein von Mikroorganismen eine wirksame Sanierung unterstützen, wodurch Fehlversuche aufgrund einer schlechten Standorttauglichkeit vermieden werden.

B. Auswahl oder Stimulierung von Mikroben

Sobald der Standort charakterisiert ist, entscheiden die Forscher, ob sie bestimmte Mikroben einbringen (Bioaugmentation) oder die vorhandenen Mikroben aktivieren (Biostimulation). An Grundwasserstandorten, die mit chlorierten Lösungsmitteln wie TCE kontaminiert sind, führten Messungen von geringen, aber nachweisbaren Populationen von *Dehalococcoides* (10^1 – 10^2 Zellen/ml) während Pilotversuchen zur kombinierten Verwendung von Elektronendonatorzugabe und Bioaugmentation, wodurch eine schnelle und vollständige Entchlorung sichergestellt wurde (Madison et al., 2022) Frontiers. In anderen Umgebungen hat sich die Stimulierung einheimischer Organismen durch Nährstoffe wie Acetat als ausreichend erwiesen. Beispielsweise zeigten NGS-Daten und qPCR-Quantifizierungen, dass Gene, die an der anaeroben biologischen Abbaubarkeit beteiligt sind (z. B. Alkylsuccinat-Synthase), nach der Biostimulation 100- bis 1.000-mal häufiger vorkommen, was auf eine wirksame natürliche Kontaminationsminderung hindeutet (Madison et al., 2022), Frontiers.

Der Einsatz maßgeschneiderter mikrobieller Konsortien, unterstützt durch molekulare Daten, trägt dazu bei, dass mehrere Abbaupfade aktiv sind, insbesondere bei gemischten Schadstoffen – eine Strategie, die in Feldpilotprojekten zunehmend an Bedeutung gewinnt (Madison et al., 2022).

C. Zufuhr und Konditionierung

Die Zufuhr von Mikroben und die Sicherstellung ihrer Aktivität vor Ort hängen von robusten Zufuhrstrategien ab. In uranverseuchten Grundwasserleitern werden durch regelmäßige Acetatinjektionen Elektronendonatoren in Brunnen gepumpt, um die durch Geobacter angetriebene U(VI)-Reduktion über Monate hinweg anzutreiben (Anderson et al., 2003; Lovley et al., 2005). Reaktive Barrieren, bestehend aus durchlässigen Nährstoffzonen, werden ebenfalls eingesetzt, um den Grundwasserfluss durch mikrokenreiche Zonen zu leiten. In Böden





unterstützen Träger wie Biofilmgerüste, Kügelchen oder organischer Kompost die mikrobielle Besiedlung und den Kontakt mit Schadstoffen, was in komplexen Matrizen, in denen Nährstoffe und Mikroben ungleichmäßig verteilt sein können, von entscheidender Bedeutung ist (Semple et al., 2004). Bei der Konzeption von Zufuhrsystemen müssen Schwankungen in der Porosität, Durchlässigkeit und den saisonalen Bedingungen berücksichtigt werden, um eine gleichbleibende Sanierungsleistung zu gewährleisten.

D. Überwachung und Nachverfolgung

Eine Überwachung, die über die Schadstoffkonzentration hinausgeht, ist unerlässlich. Die Teams führen regelmäßig chemische Analysen (z. B. Schadstoffgehalt, gelöster Sauerstoff, pH-Wert, Stoffwechselnebenprodukte) in verschiedenen Tiefen und an verschiedenen Standorten durch. Daneben messen molekularbiologische Werkzeuge (MBTs) wie qPCR die Häufigkeit funktioneller Gene (z. B. Naphthalinsuccinatsynthase, *gltA* für Citratsynthase), während RNA-basierte Assays den aktiven mikrobiellen Stoffwechsel widerspiegeln (Madison et al., 2022). Besonders bemerkenswert ist, dass der Anstieg der Transkripte des *Geobacter*-Citrat-Synthase-Gens (*gltA*) während der Feldversuche eng mit der Acetatzufuhr und der Uranreduktionsaktivität korreliert (Methe et al., 2005; Holmes et al., 2007). Die Forscher überwachen auch oxidative Stressmarker, um sicherzustellen, dass anaerobe Bedingungen aufrechterhalten bleiben und der mikrobielle Abbau nicht durch Sauerstoffzufuhr gehemmt wird (Holmes et al., 2007).

E. Ergebnisbewertung und Skalierung

Die Analyse von Kennzahlen zur Schadstoffreduktion, wie z. B. die Zeit bis zur Einhaltung der Vorschriften, hilft bei der Bewertung der Durchführbarkeit vor Ort. Beispielsweise sanken die Uranwerte innerhalb von ~40 Tagen nach der Acetatstimulation unter die Sicherheitsgrenzwerte (Lovley et al., 2005). Parallele ökologische Überwachungsmaßnahmen, darunter Veränderungen der mikrobiellen Vielfalt, der Widerstandsfähigkeit der einheimischen Lebensgemeinschaften und das Fehlen toxischer Nebenprodukte, bestätigen die Wiederherstellung des Ökosystems (Xiong et al., 2025). Sind die Feldversuche erfolgreich, werden bei der Planung der vollständigen Einführung saisonale Strömungsdynamiken, Nährstofflogistik, behördliche Genehmigungen und die Akzeptanz durch die Interessengruppen berücksichtigt. Die Ergebnisse aus dem Feld fließen in die Kosten-Nutzen-Analyse und die Anforderungen an die Langzeitüberwachung ein.

Um besser zu verstehen, wie die mikrobielle Bioremediation im Feldmaßstab geplant und optimiert wird, untersuchen Forscher häufig fortschrittliche und neue Konzepte, die die Präzision und Wirksamkeit von Sanierungsstrategien verbessern. Diese zusätzlichen Themen stellen innovative wissenschaftliche Ansätze dar und bieten einen breiteren Kontext für Studenten, die sich für Umweltinnovationen interessieren.





a. Mikrobieller Transport und Biokonvektion

An vielen kontaminierten Standorten, insbesondere in Böden und unterirdischen Grundwasserleitern, bleiben Mikroben nicht einfach dort, wo sie sich befinden. Sie bewegen sich, manchmal durch passive Strömung im Wasser, manchmal durch ihre eigene Motilität. Biokonvektion bezeichnet die Bewegung von Mikrobenpopulationen als Reaktion auf Sauerstoff- oder chemische Gradienten. Diese selbstorganisierten Strömungen können Mikroben dabei helfen, tiefer liegende oder schwerer zugängliche Schadstoffe zu erreichen.

Das Verständnis, wie sich Mikroben durch poröse Materialien wie Sand oder Ton bewegen, hilft Wissenschaftlern, bessere Injektionssysteme zu entwickeln oder Mikrobenstämme mit größerer Mobilität auszuwählen. Beispielsweise haben aktuelle Modellstudien untersucht, wie sich Bakterien in Grundwassersystemen verteilen, um den Abbau von Schadstoffen zu optimieren, und dabei die Bedeutung der Strömungsdynamik für die mikrobielle Sanierung hervorgehoben (Banerjee et al., 2024).

b. Biofilme als Feldstrategie

Mikroben heften sich häufig an Oberflächen und bilden Biofilme, dünne Schichten von Mikrobenkolonien, die von einer schützenden Matrix umgeben sind. Im Feld können Biofilme strategisch eingesetzt werden: Sie helfen Mikroben, an Ort und Stelle zu bleiben, Umweltbelastungen zu widerstehen und effektiver mit Schadstoffen zu interagieren. Biofilmbasierte Ansätze werden häufig in der Abwasserbehandlung eingesetzt und werden derzeit auch bei der Boden- und Sedimentreinigung getestet.

In Biobarrieresystemen beispielsweise bilden Mikroben Biofilme entlang durchlässiger Wände im Untergrund. Wenn kontaminiertes Grundwasser hindurchfließt, bauen die Mikroben im Biofilm Schadstoffe wie Schwermetalle oder Kohlenwasserstoffe ab. Dieser Ansatz ist besonders nützlich, wenn eine langfristige oder passive Sanierung in großen oder schwer zugänglichen Gebieten erforderlich ist.

c. Durch Verschmutzung induzierte Toleranz von Gemeinschaften (PICT)

Wissenschaftler verwenden auch eine Methode namens Pollution-Induced Community Tolerance (PICT), um zu bewerten, wie sich mikrobielle Gemeinschaften in verschmutzten Umgebungen im Laufe der Zeit anpassen. Dieses Konzept hilft Forschern, die Gesundheit und Widerstandsfähigkeit des Ökosystems zu beurteilen und festzustellen, ob in das Feld eingeführte Mikroben das natürliche mikrobielle Gleichgewicht auf unbeabsichtigte Weise verändern.

Wenn beispielsweise eine einheimische mikrobielle Gemeinschaft im Boden im Laufe der Zeit toleranter gegenüber einem Schadstoff wird, könnte dies entweder auf eine erfolgreiche Anpassung oder auf anhaltenden Umweltstress hindeuten. Die PICT-Analyse hilft Wissenschaftlern, die mikrobielle Evolution zu verfolgen und sicherzustellen, dass sich das Ökosystem wirklich erholt und nicht nur resistent wird.

d. Multi-Omics-Tools für die Feldanalyse

Die moderne Umweltwissenschaft stützt sich zunehmend auf Multi-Omics, eine Kombination aus Genomik, Transkriptomik, Proteomik und Metabolomik, um zu verstehen, welche Mikroben





vorhanden sind, wie aktiv sie sind und welche Chemikalien sie produzieren. Mit diesen Tools können Wissenschaftler nicht nur das Überleben von Mikroben im Feld verfolgen, sondern auch ihr Verhalten in Echtzeit.

In einer aktuellen Studie wurden beispielsweise Umwelt-DNA (eDNA) und RNA-Sequenzierung eingesetzt, um die mikrobielle Aktivität während der biologischen Sanierung von mit Erdöl kontaminierten Böden zu überwachen. Diese Techniken tragen dazu bei, sicherzustellen, dass die Mikroben nicht nur vorhanden sind, sondern auch aktiv Schadstoffe abbauen und dabei keine schädlichen Nebenprodukte produzieren.

e. Vorhersagemodelle und Simulationen

Vor einer groß angelegten Umsetzung verwenden Wissenschaftler Computersimulationen und Vorhersagemodelle, um zu prognostizieren, wie sich Mikroben unter verschiedenen Umweltbedingungen verhalten werden. Diese Modelle berücksichtigen Faktoren wie Wasserfluss, Nährstoffgehalt, Temperatur und Schadstoffkonzentration.

Solche Tools helfen dabei, bessere Pilotstudien zu konzipieren, indem sie die idealen Bedingungen für das Wachstum und die Aktivität von Mikroorganismen identifizieren. So können Simulationen beispielsweise vorhersagen, ob eine Strategie zur Nährstoffinjektion die kontaminierte Zone erreichen oder sich zu schnell verteilen wird. Durch die Kombination von Labordaten und Umweltmessungen reduzieren Vorhersagemodelle Unsicherheiten und verbessern die Erfolgsraten.

Der Übergang vom Labor zum Feld ist ein komplexer, aber wesentlicher Schritt in der biologischen Sanierung. Jeder Schritt, von der Auswahl des richtigen Standorts und der richtigen Mikroben bis hin zur Überwachung, Analyse der Ergebnisse und Planung der Skalierung, stellt sicher, dass der Sanierungsansatz wissenschaftlich fundiert, umweltverträglich und in unvorhersehbaren natürlichen Umgebungen praktisch wirksam ist. Die Einbeziehung von Unterthemen wie mikrobiellem Transport und Omics hilft zu zeigen, wie fortschrittliche Werkzeuge diesen Prozess noch weiter verfeinern.

4. Fallstudien aus der Praxis

Bevor wir uns mit konkreten Beispielen befassen, ist es wichtig, den Zweck der Untersuchung realer Projekte im Bereich der mikrobiellen biologischen Sanierung zu verstehen:

Fallstudien aus der Praxis liefern konkrete Belege dafür, wie Strategien zur biologischen Sanierung unter komplexen Umweltbedingungen konzipiert, umgesetzt und bewertet werden. Sie zeigen, was funktioniert, welche Herausforderungen sich ergeben und wie Wissenschaftler Methoden an lokale Ökosysteme anpassen.

Im Folgenden finden Sie zwei gut dokumentierte Feldprojekte, von denen sich das eine auf uranverseuchtes Grundwasser und das andere auf die Beseitigung von Ölverschmutzungen im Meer konzentriert. Beide zeigen, wie Mikroben erfolgreich zur Lösung realer Umweltprobleme eingesetzt wurden.





Fallstudie 4.1: Mit Uran kontaminiertes Grundwasser in einem vom Bergbau betroffenen Grundwasserleiter

- **Problem & Standort:** Das zuvor durch Uranabbauaktivitäten beeinträchtigte Grundwasser enthielt gefährlich hohe Konzentrationen an löslichem Uran (U(VI)), was Risiken für die menschliche Gesundheit und die Ökosysteme mit sich brachte.
- **Ansatz:** Wissenschaftler stimulierten einheimische Geobacter-Arten, insbesondere *Geobacter metallireducens*, indem sie Acetat als Elektronendonator in den Grundwasserleiter injizierten (turn0search21). Dadurch wurde die mikrobielle Reduktion von U(VI) zu weniger löslichem U(IV) verstärkt, das aus dem Grundwasser ausfällt.
- **Ergebnisse:** Innerhalb von etwa 40 Tagen sank der Urangelalt in den stromabwärts gelegenen Brunnen unter die gesetzlich festgelegten Gesundheitsrisikogrenzwerte, während er in den stromaufwärts gelegenen Brunnen unverändert blieb, was die regionale Wirksamkeit unterstreicht (turn0search21). Biometrische und molekulare Überwachungen bestätigten eine erhöhte Aktivität von *Geobacter*, insbesondere die Expression von Stressreaktionsgenen wie *cydA* und *sodA* (turn0search6, turn0search14).
- **Bedeutung:** Dieser Pilotversuch bestätigte, dass die Stimulierung einheimischer Mikroorganismenpopulationen Uran sicher und effektiv vor Ort immobilisieren kann, wobei die ökologischen Störungen minimal sind.

Fallstudie 4.2: Biologische Sanierung einer Ölverschmutzung im Golf von Mexiko

- **Problem und Kontext:** Während der Ölkatastrophe der Deepwater Horizon bedrohte eine weitreichende Kohlenwasserstoffverschmutzung die Meeresfauna, die Küstenökosysteme und die lokale Fischerei.
- **Ansatz:** Nach der Ölkatastrophe zeigte die mikrobielle Überwachung einen Anstieg einheimischer ölabbauender Bakterien, insbesondere *Alcanivorax borkumensis* und *Oleispira antarctica*. Ihr Wachstum wurde durch die Zugabe von Nährstoffen (Stickstoff und Phosphor) zur Unterstützung biosurfactantproduzierender mikrobieller Gemeinschaften weiter gefördert (turn0search1, turn0search26, turn0search22).
- **Ergebnisse:** Diese einheimischen Populationen wurden schnell dominant in den betroffenen Gebieten und beschleunigten den Abbau der Kohlenwasserstoffe. Feldstudien bestätigten einen wirksamen Abbau der Schadstoffe ohne Einführung fremder Arten (turn0search1, turn0search7).
- **Bedeutung:** Dieses Projekt hat gezeigt, dass einheimische Meeresbakterien, wenn sie richtig stimuliert werden, eine wichtige Rolle bei der natürlichen und nachhaltigen Beseitigung von Ölverschmutzungen spielen können.

Diese beiden Beispiele aus der Praxis verdeutlichen, wie Strategien zur biologischen Sanierung auf bestimmte Schadstoffe und Ökosysteme zugeschnitten sind. In beiden Projekten arbeiteten Wissenschaftler mit einheimischen Mikroorganismen, stimulierten und überwachten deren natürliche Aktivitäten, um messbare Reinigungsergebnisse auf sichere und kostengünstige Weise zu erzielen. Feldstudien wie diese ermöglichen es Studierenden zu sehen, wie Biologie, Chemie und Umweltwissenschaften zusammenwirken, um Umweltverschmutzungsprobleme zu lösen.

In-situ-Stimulation von *Geobacter*-Arten zur Entfernung von Uran: Felddemonstration (2003) einschließlich Genexpression von *cydA* und *sodA* (Lovley et al.)



- Feldstudie zur Dominanz und Aktivität von *Alcanivorax borkumensis* in marinen Ölverschmutzungsgebieten (nach Deepwater Horizon)
- Überblick über Mechanismen der biologischen Sanierung von Kohlenwasserstoffen und mikrobielle Reaktionen bei tatsächlichen Ölverschmutzungen [Frontiers+15PMC+15PMC+15](#)
- Weitere Informationen zu *G. metallireducens*, das Uran und Vanadium in verschmutzten Grundwasserleitern reduziert (Zusammenfassung aus Wikipedia) [NRC Web+13Wikipedia+13ScienceDirect+13](#)

AR-Integration in Feldversuchen zur mikrobiellen biologischen Sanierung

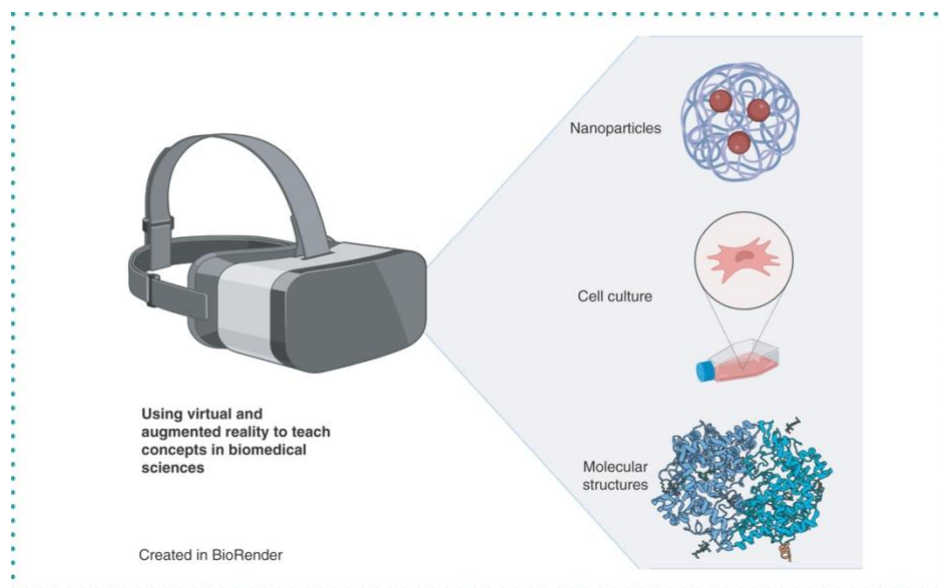


Abb. 1 – AR in der Biomedizin, Quelle: Hemme et al., 2023

Da mikrobielle Bioremediationsstrategien vom Laborumfeld in komplexe Feldumgebungen übergehen, stehen Wissenschaftler vor mehreren Herausforderungen: der Überwachung des mikrobiellen Verhaltens vor Ort, der Übermittlung räumlicher und zeitlicher Daten an die Interessengruppen und der Gewährleistung der Sicherheit des Ökosystems. Augmented Reality (AR) wird zunehmend als digitale Schnittstelle untersucht, die die Visualisierung, Echtzeitüberwachung und Dateninterpretation in den Umweltwissenschaften verbessern kann. Während AR in der Umweltbildung und industriellen Überwachung bereits weit verbreitet ist, kommt es nun auch zunehmend in der mikrobiellen Bioremediation zum Einsatz, unterstützt durch Fortschritte in der Integration von Geodaten, der Visualisierung von Omics-Daten und feldbasierten digitalen Schnittstellen.

1. AR zur Visualisierung mikrobieller Aktivität und Schadstoffabbau

AR kann Wissenschaftlern helfen, mikrobielle Wechselwirkungen mit Schadstoffen in 3D zu visualisieren, überlagert auf reale Umgebungen. In Feldversuchen ist es entscheidend zu





verstehen, wo und wie Mikroben wirken, insbesondere in unterirdischen oder aquatischen Systemen. Beispielsweise ist bei der biologischen Sanierung von Uran vor Ort das räumliche Verständnis der Zonen, in denen Geobacter-Arten aktiv sind, entscheidend für die Bewertung des Sanierungserfolgs.

Studien haben gezeigt, dass AR verwendet werden kann, um geospatiale Umweltdaten wie Schadstoffkonzentrationen, Grundwasserströmungen oder Nährstoffverteilungen mithilfe von Tablets oder AR-Brillen auf physische Standorte zu überlagern (Silva & Gültekin, 2021). Dies ermöglicht es Feldforschern, zu „sehen“, wo die mikrobielle Aktivität voraussichtlich ihren Höhepunkt erreichen wird, und hilft dabei, die Abbauleistung mit Umweltvariablen wie pH-Wert, Redoxpotenzial oder Bioverfügbarkeit zu korrelieren.

2. AR und Multi-Omics-Integration in der Feldüberwachung

Eine der größten Herausforderungen bei Feldversuchen ist die Interpretation von Multi-Omics-Daten (z. B. Metagenomik, Transkriptomik), die aus Probenahmegruben und Bodenproben gewonnen werden. Traditionell werden diese Datensätze in Labors analysiert und auf Computern visualisiert. AR ermöglicht jedoch eine standortbezogene Visualisierung der mikrobiellen Genexpression oder Populationsverschiebungen in Echtzeit.

Mithilfe einer AR-Schnittstelle könnten Forscher beispielsweise ein Gerät auf einen Überwachungsbrunnen richten und die relative Häufigkeit von Genen anzeigen, die mit der Uranreduktion (z. B. *cydA*, *sodA*) oder Kohlenwasserstoffabbauwegen in ölverseuchten Böden in Verbindung stehen (Guo et al., 2023). Dieser Ansatz unterstützt nicht nur die räumliche Interpretation komplexer mikrobieller Daten, sondern erleichtert auch die Zusammenarbeit zwischen Feldteams und Laboranalysten.

Jüngste Studien zur mikrobiellen Ökologie haben den Nutzen von AR bei der Darstellung metagenomischer Daten im Kontext, der Verbesserung der wissenschaftlichen Kommunikation und der Ermöglichung einer intuitiveren Entscheidungsfindung während der Standortüberwachung hervorgehoben (Wang et al., 2022).

3. AR für Risikobewertung und ökologische Sicherheit

Mikrobielle Tests im Feldmaßstab müssen ökologische und sicherheitsrelevante Aspekte berücksichtigen, insbesondere wenn genetisch veränderte Organismen (GVO) beteiligt sind. AR kann eine visuelle Risikokarte liefern, um Folgendes hervorzuheben:

- Bereiche mit potenzieller mikrobieller Überwucherung,
- Randzonen, in denen sich eingeführte Mikroben ausbreiten könnten,
- Hotspots der Degradation oder Zonen mit toxischen Nebenprodukten.

Dieser Ansatz spiegelt den Einsatz von AR im Gesundheitswesen und in der Biosicherheit wider, wo Echtzeit-Overlays zur Verfolgung von Kontaminationszonen verwendet werden (z. B. Clean-AR für die Kartierung von Risiken durch Luftübertragung in Krankenhäusern; Schmidt et al., 2021). Die Anpassung dieser Strategie an die biologische Sanierung der Umwelt könnte die Reaktion vor Ort und die Eindämmungsplanung verbessern.





4. AR-gestützte Kommunikation und Einbindung von Interessengruppen

An groß angelegten Bioremediation-Projekten sind oft mehrere Interessengruppen beteiligt: Wissenschaftler, Umweltbehörden, Landbesitzer und lokale Gemeinden. AR hat sich als wirksames Instrument der Wissenschaftskommunikation erwiesen, das es auch Nichtfachleuten ermöglicht, komplexe Sanierungsstrategien zu verstehen (Garzón et al., 2019).

In Pilotstudien wurde AR eingesetzt, um vorgeschlagene Feldinterventionskonzepte, wie z. B. Biobarrierezonen oder Nährstoffinjektionsbrunnen, auf physische Karten oder Live-Feldumgebungen zu übertragen. Dies ermöglicht es den Interessengruppen, potenzielle Ergebnisse zu visualisieren, Zeitpläne für die Standortsanierung zu bewerten und sich sinnvoll in den Forschungsprozess einzubringen.

Obwohl sie im Bereich der mikrobiellen Bioremediation noch in den Kinderschuhen stecken, sind AR-Technologien dazu geeignet, den Betrieb im Feldmaßstab erheblich zu verbessern, insbesondere wenn sie mit Omics-Daten, Geodatenanalyse und ökologischer Überwachung integriert werden. Diese Anwendungen passen gut zum Übergang „vom Labor zum Feld“, da sie unsichtbare biologische und chemische Prozesse in Echtzeit zugänglich, messbar, und verständlich machen. Da die Umweltforschung zunehmend digitalisiert und demokratisiert wird, zeichnet sich AR als vielversprechendes Instrument zur Unterstützung sowohl der wissenschaftlichen Genauigkeit als auch der öffentlichen Transparenz aus.

5. Beispiele für den Einsatz von AR in der Umwelt oder in biowissenschaftlichen Bereichen aus der Praxis

Augmented Reality (AR) hat sich rasch von einem Werkzeug für visuelle Interaktion zu einer funktionalen Schnittstelle für komplexe wissenschaftliche Überwachung und Entscheidungsfindung entwickelt. In den Umweltwissenschaften und der Biotechnologie beginnt AR, physische Landschaften mit Echtzeitdaten zu verbinden, sodass Forscher, Ingenieure und Entscheidungsträger mit unsichtbaren biologischen oder chemischen Prozessen am Ort des Geschehens interagieren können.

Während direkte Anwendungen von AR in der mikrobiellen Bioremediation noch in der Entwicklung sind, zeigen immer mehr Beispiele aus der Praxis in den Bereichen Umweltüberwachung, Umweltschutz, Datenvisualisierung und Risikobewertung das enorme Potenzial von AR für die Verbesserung von „Lab-to-Field“-Prozessen. Nachfolgend finden Sie wichtige Beispiele mit Auswirkungen auf die mikrobielle Sanierung in realen Ökosystemen.

5.1. AR für die Umweltüberwachung und Datenvisualisierung vor Ort

Überblick

Die Umweltüberwachung vor Ort umfasst in der Regel den Einsatz von Sensoren, die Entnahme von Proben und die Durchführung von Analysen außerhalb des Standorts – Methoden, die oft die Reaktionszeit verzögern und den räumlichen Kontext einschränken. Im Falle der mikrobiellen Bioremediation wird dies besonders problematisch, da mikrobielle Aktivitäten,



Redoxbedingungen oder Konzentrationsgradienten von Schadstoffen weitgehend unsichtbar und sehr dynamisch sind. Augmented Reality (AR) löst diese Probleme, indem sie eine räumlich verankerte Echtzeit-Visualisierung von Felddaten ermöglicht, sodass Wissenschaftler an genau dem Ort, an dem sie am relevantesten sind, mit Umweltinformationen interagieren können (Wang et al., 2022; Pokrić et al., 2012).

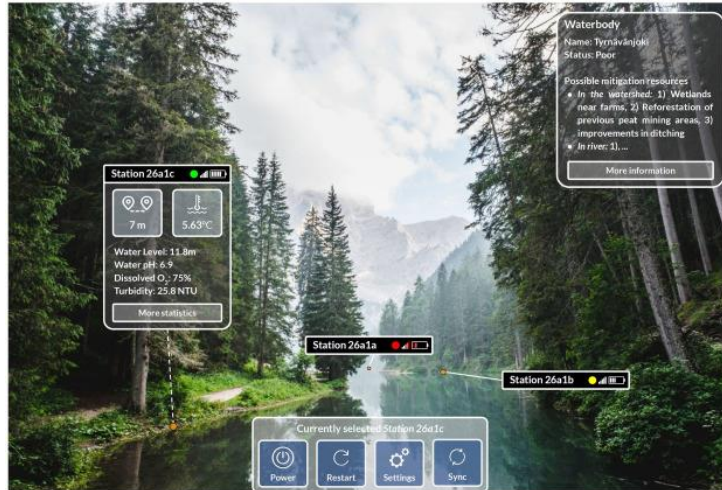


Abb. 2: Konzept einer HMD-basierten AR-Anwendung zur Visualisierung der Wasserqualität, Quelle: Cao et al., 2024

AR-Systeme können folgende Daten zusammenführen:

- Umweltsensordaten (z. B. pH-Wert, gelöster Sauerstoff, Temperatur),
- GIS-basierte Standortlayouts (z. B. Schadstoffquellenzonen),
- Vorhersagemodelle (z. B. COMSOL/MODFLOW),
- mikrobielle Aktivitätsmuster (z. B. eDNA-basierte Häufigkeits- oder Genexpressionsprofile).

Dadurch können Forscher, Umweltingenieure oder Standortmanager chemische und biologische Prozesse im tatsächlichen Feld „sehen“, was zeitnahe und evidenzbasierte Interventionen erleichtert (Zhang et al., 2023).

Wissenschaftliche Anwendungen in der mikrobiellen Bioremediation

In mikrobiellen Sanierungsprojekten kann AR:

- Echtzeitkonzentrationen von Schadstoffen wie Uran, Kohlenwasserstoffen oder Nitraten direkt auf einer Felsoberfläche anzeigen;
- mikrobielle Besiedlungszonen (basierend auf qPCR-, eDNA- oder Omics-Daten) auf physische Probenahmestellen überlagern;
- Bioverfügbarkeitszonen anzeigen, in denen Schadstoffe aufgrund der Bodenporosität oder des Bindungszustands für den mikrobiellen Abbau zugänglich oder unzugänglich sind (Guo et al., 2023);





- den Einfluss von Injektionsbohrungen visuell darstellen, z. B. indem gezeigt wird, wie sich Acetat unterirdisch ausbreitet, um Geobacter-Populationen zu stimulieren (Lovley et al., 2003; Zhang et al., 2023).

Diese Anwendungen verlagern die Überwachung der biologischen Sanierung von reaktiv zu proaktiv: Potenzielle Ausfälle können frühzeitig erkannt werden, und Wissenschaftler erhalten eine Echtzeitkarte der mikrobiellen Aktivität und des Verhaltens von Schadstoffen.

Beispiele für AR-Systeme in der Praxis

ekoNET: AR-fähige Plattform zur Umweltüberwachung

ekoNET wurde als IoT-basiertes System zur Verfolgung von Umweltverschmutzung entwickelt und integriert mobile AR mit Umweltsensoren, um die Luft- und Wasserqualität vor Ort in Echtzeit zu visualisieren (Pokrić et al., 2012). Benutzer scannen die Umgebung mit mobilen Geräten, um die Konzentrationen von Schadstoffen wie CO₂, NO₂ und Trübung anzuzeigen.

Auswirkungen auf die biologische Sanierung: In mikrobiellen Feldversuchen könnte eine ähnliche Konfiguration eingerichtet werden, um Karten anzuzeigen von:

- Kontaminationsfahnen unter der Oberfläche,
- Nährstoffdiffusionszonen,
- Reaktive Barrieren, die durch mikrobielle Konsortien verstärkt werden.

Visualisierung des Grundwassers mithilfe von AR

Zhang et al. (2023) entwickelten ein AR-Tool zur Visualisierung des Grundwasserflusses, der Schadstoffausbreitung und der Sanierungseinrichtungen unter Verwendung georeferenzierter 3D-Modelle. Dieses System ermöglichte es den Anwendern, die räumlichen Beziehungen zwischen Schadstoffquellen, sauberen Zonen und mikrobiellen Aktivitätszonen in realen Industriestandorten zu verstehen.

Anwendung bei Feldversuchen: AR könnte bei Pilotstandorten für mikrobielle Sanierung helfen, indem es direkt vor Ort zeigt, wie sich die Schadstoffkonzentrationen nach der mikrobiellen Inokulation oder Nährstoffinjektion räumlich verändern, ohne dass GIS-Plattformen konsultiert oder Laborergebnisse abgewartet werden müssen.

Integration mit Omics- und Simulationsmodellen

AR hat ein wachsendes Potenzial zur Unterstützung der Multi-Omics-basierten Feldinterpretation. Wang et al. (2022) demonstrierten die Integration von AR mit Metagenomik, wodurch Benutzer die funktionelle Genexpression (z. B. *cydA*, *alkB*, *narG*) auf bestimmte GPS-markierte Standorte überlagern und so räumliche Ansichten mikrobieller Funktionen erstellen können.

Relevanz für mikrobielle Feldversuche:

- Feldteams könnten die mit dem Abbau von Schadstoffen verbundene mikrobielle Aktivität in Echtzeit visualisieren.





- Omics-Daten könnten verwendet werden, um zu überprüfen, ob Mikroben aktiv Schadstoffe reduzieren oder lediglich überleben.

Simulationstools wie COMSOL oder MODFLOW können zur Vorhersage der Nährstoffausbreitung oder des mikrobiellen Transports verwendet werden. In Kombination mit AR können diese Modelle die erwarteten Ergebnisse direkt auf den Standort projizieren und so die Planung von Injektionsschemata und Überwachungsstationen unterstützen (Silva & Gültekin, 2021).

Vorteile in der Praxis der biologischen Sanierung

1. Entscheidungsfindung in Echtzeit
Durch die Kombination von Visualisierungen vor Ort mit Live-Daten können die Teams vor Ort ihre Strategien zur biologischen Sanierung schnell anpassen (z. B. Nährstoffinjektion verschieben, Probenahmepläne ändern).
2. Verbessertes räumliches Bewusstsein
Die Visualisierung chemischer Gradienten oder Zonen mit hoher Mikrobekonzentration direkt vor Ort hilft dabei, die Sanierung genauer auszurichten.
3. Verbesserte Kommunikation
Interessengruppen (z. B. Landbesitzer, Aufsichtsbehörden) können unsichtbare Prozesse besser verstehen, was Vertrauen schafft und eine klarere Risikokommunikation ermöglicht.
4. Überwachung von Sicherheit und Eindämmung
AR kann Zonen markieren, in denen es zu einer übermäßigen Vermehrung von Mikroorganismen oder zum Auftreten sekundärer Schadstoffe kommen kann, und unterstützt so die biologische Sicherheit in Fällen, in denen gentechnisch veränderte Organismen zum Einsatz kommen (Schmidt et al., 2021).

5.2. Affluent Effluent: AR-Modellierung der mikrobiellen und chemischen Dynamik

Affluent Effluent wurde von Silva & Gültekin (2021) entwickelt und ist eine AR-App, die Umweltwechselwirkungen zwischen Schadstoffen und mikrobiellen Populationen simuliert. Das Modell umfasst:

- Nährstoffdynamik,
- Mikrobielle Wachstumsphasen,
- Abbauwerte von Schadstoffen.

1. Nährstoffdynamik

Definition:

Die Nährstoffdynamik bezieht sich auf die Bewegung, Umwandlung, Verfügbarkeit und Aufnahme essenzieller Nährstoffe (z. B. Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Sauerstoff oder Elektronendonatoren wie Acetat), die das Leben von Mikroorganismen unterstützen und deren Aktivität in verschmutzten Umgebungen beeinflussen.

Im Zusammenhang mit der biologischen Sanierung:





- Mikroorganismen, die bei der Sanierung von Feldern eingesetzt werden, sind auf verfügbare Nährstoffe angewiesen, um zu wachsen und Schadstoffe zu verstoffwechseln.
- Manchmal sind Nährstoffe natürlich vorhanden, aber in vielen Fällen müssen sie künstlich hinzugefügt werden (Biostimulation), um den mikrobiellen Abbau zu fördern.
- Beispielsweise wird in mit Uran kontaminierten Grundwasserleitern Acetat injiziert, um Geobacter-Arten zu stimulieren, die es als Elektronendonator verwenden, um lösliches U(VI) in unlösliches U(IV) umzuwandeln (Lovley et al., 2003).

In der AR-Modellierung:

- Die Nährstoffdynamik wird als sich ausbreitende Zonen oder Konzentrationsgradienten dargestellt, die sich im Laufe der Zeit verändern.
- Studierende oder Forscher können sehen, wie nährstoffreiche Gebiete ein stärkeres Wachstum von Mikroorganismen und einen intensiveren Abbau von Schadstoffen ermöglichen.
- Die Simulation kann auch den Wettbewerb um Nährstoffe zeigen, der Einfluss darauf hat, welche Mikroben dominieren.

2. Phasen des mikrobiellen Wachstums

Definition:

Mikrobielle Wachstumsphasen beschreiben den vierstufigen Zyklus, den mikrobielle Populationen typischerweise durchlaufen, wenn sie in eine neue Umgebung oder ein neues Substrat eingeführt werden:

1. Lag-Phase – Anpassungsphase, in der sich Mikroben an neue Bedingungen anpassen (kein Wachstum).
2. Log-Phase (exponentielle Phase) – Schnelle Vermehrung aufgrund reichlich vorhandener Nährstoffe.
3. Stationäre Phase – Das Wachstum verlangsamt sich, da die Nährstoffe aufgebraucht werden und sich Abfallstoffe ansammeln.
4. Absterbephase – Mikroben sterben aufgrund von Ressourcenmangel oder der Ansammlung toxischer Nebenprodukte ab.

Im Zusammenhang mit der biologischen Sanierung:

- Das Verständnis der Wachstumsphasen ist entscheidend für die zeitliche Planung von Maßnahmen vor Ort, wie z. B. erneute Impfung oder erneute Nährstoffzugabe.
- Befindet sich eine Mikrobenpopulation beispielsweise in der stationären Phase, kommt der Abbau von Schadstoffen ohne weitere Maßnahmen zum Stillstand.

In der AR-Modellierung:

- Diese Phasen werden visuell dargestellt, beispielsweise durch Blasen mikrobieller Kolonien, die sich ausdehnen und stabilisieren oder ihre Farbe ändern, wenn sie in verschiedene Phasen eintreten.
- Benutzer können die Bedingungen (z. B. Temperatur, Nährstoffzufuhr) anpassen und beobachten, wie sich die Wachstumsphase verschiebt, was ihnen hilft, das empfindliche





Gleichgewicht zu verstehen, das für eine erfolgreiche biologische Sanierung im Feldmaßstab erforderlich ist.

3. Schadstoffabbau-Raten

Definition:

Die Schadstoffabbau-Rate ist die Geschwindigkeit, mit der ein bestimmter Schadstoff durch mikrobielle oder chemische Prozesse abgebaut oder in weniger schädliche Substanzen umgewandelt wird.

Im Zusammenhang mit der biologischen Sanierung:

- Mikroben können Schadstoffe abbauen durch:
 - Aerobe Zersetzung (mit Sauerstoff) – z. B. Kohlenwasserstoffe durch *Pseudomonas* spp.
 - Anaerober Abbau (ohne Sauerstoff) – z. B. Uran oder Nitrat durch *Geobacter* spp.
- Faktoren, die die Abbaurate beeinflussen, sind unter anderem:
 - Effizienz des Mikrobenstamms,
 - Temperatur und pH-Wert,
 - Konzentration und chemische Form der Schadstoffe,
 - Verfügbarkeit von Nährstoffen und Redoxbedingungen.

In der AR-Modellierung:

- Die Abbaurate wird durch visuelle Zerfallskurven, Farbveränderungen in der Schadstoffwolke oder zeitgesteuerte Animationen dargestellt, die zeigen, wie viel Schadstoff im Laufe der Zeit übrig bleibt.
- Benutzer können beobachten, wie sich verändernde Umweltbedingungen (z. B. die Zufuhr weiterer Nährstoffe oder eine Verschiebung des pH-Werts) den Zeitplan für den Abbau beeinflussen.

Warum diese drei Faktoren miteinander verbunden sind

Diese drei Prozesse – Nährstoffverfügbarkeit, mikrobielles Wachstum und Schadstoffabbau – bilden eine dynamische Rückkopplungsschleife in der biologischen Sanierung:

1. Die Nährstoffverfügbarkeit beeinflusst...
2. Mikrobielles Wachstum, das...
3. den Abbau von Schadstoffen, der Nährstoffe verbrauchen und Nebenprodukte erzeugen kann, die sich auf die Gesundheit der Mikroorganismen auswirken.

Die Modellierung dieses Systems in AR ermöglicht es Benutzern, diese Wechselwirkungen in Aktion zu sehen, und bietet Umweltwissenschaftlern, Studenten oder Feldtechnikern ein tieferes Verständnis.

Wichtigste Funktionen:

- Visualisiert Veränderungen der chemischen Konzentration im Zeitverlauf;





- Simuliert mikrobielle Reaktionen unter verschiedenen Umweltstressoren;
- Läuft auf mobilen AR-Plattformen (z. B. Smartphones, Tablets).

Relevanz für die biologische Sanierung:

Diese App stellt einen frühen, aber praktischen Ansatz für modellbasierte AR zur Simulation von Sanierungsprozessen dar und hilft Forschern oder Studenten, Ergebnisse unter Feldbedingungen vorherzusagen. In realen Sanierungsprojekten können solche Tools die Planung von Injektionsschemata oder Nährstoffzusätzen unterstützen, indem sie das erwartete mikrobielle Verhalten über Zeit und Raum hinweg aufzeigen.

5.3. AR für das Bewusstsein für städtische und industrielle Umweltverschmutzung

Forscher in Italien haben ein AR-System implementiert, um das öffentliche Bewusstsein für Luftverschmutzung zu schärfen. Das System überlagert mithilfe von GIS und mobiler AR Luftqualitätsindex-Messwerte (AQI) und Schadstoffquellen auf physische Standorte.

Fallstudie:

- Region Marken, Italien (Sanità et al., 2024): Das System integrierte Satellitendaten, städtische Sensoren und AQI-Modelle, sodass Benutzer durch verschmutzte Gebiete „spazieren“ und die NO₂-PM_{2,5}- und Ozonwerte in Echtzeit visualisieren konnten.

Relevanz für die biologische Sanierung: Obwohl dieser Anwendungsfall für die Luftverschmutzung in Städten entwickelt wurde, veranschaulicht er die visuelle Leistungsfähigkeit von AR bei der Darstellung unsichtbarer Umweltgefahren. In ähnlicher Weise kann AR an mikrobiellen Feldstandorten angepasst werden, um unterirdische Schwermetall- oder Ölwolken, Hotspots mikrobieller Aktivität oder sich entwickelnde Redoxzonen anzuzeigen, die die Bioverfügbarkeit von Schadstoffen beeinflussen.

5.4. AR für die interaktive Feldplanung in Wasser- und Bodenprojekten

Bei der industriellen Sanierung ist die Verwaltung mehrerer Inputs, Probenahmegruben, Injektionspunkte und Zonen mit einheimischen Arten logistisch komplex. AR kann dabei helfen:

- Überlagerung von Infrastrukturelementen vor Ort;
- Verfolgung des Fortschritts (z. B. gereinigte Zonen, mikrobielle Häufigkeit);
- Simulation von Injektionsfahnen und der Bewegung der Abbaufont.

Beispiel:

- Mobile Augmented Reality für die Umweltüberwachung (Stojanovic et al., 2012): Demonstration der Verwendung mobiler AR-Plattformen zur Visualisierung von Umweltsimulationen in Verbindung mit georeferenzierten Daten.

Relevanz für die biologische Sanierung: Dieses Modell kann die Feldlogistik und Kommunikation bei der mikrobiellen Sanierung direkt verbessern, da es eine Echtzeit-Überprüfung ermöglicht, welche Bereiche eine erneute





mikrobielle Beimpfung benötigen, wo die Schadstoffkonzentrationen zurückgehen oder wie sich mikrobielle Gemeinschaften nach der Behandlung verändern.

5.5. Clean-AR: AR für Risikokartierung und Kontaminationskontrolle

Clean-AR wurde ursprünglich für Krankenhäuser entwickelt, um Risiken durch luftübertragene Krankheiten zu managen. Es nutzt AR-Brillen und 3D-Modellierung, um:

- Kontaminationswege zu identifizieren.
- Risikoreiche Oberflächen hervorzuheben.
- Verfolgung der Ausbreitung von Krankheitserregern in Echtzeit (Schmidt et al., 2021).

Relevanz für die biologische Sanierung:
Bei mikrobiellen Anwendungen im Feldmaßstab, insbesondere mit genetisch veränderten Mikroben, ist die Verfolgung ökologischer Eindämmungszonen von entscheidender Bedeutung. AR könnte in ähnlicher Weise verwendet werden, um:

- Markierung von Grenzen, innerhalb derer sich eingeführte Mikroben nicht ausbreiten sollten.
- Zonen mit übermäßigem Biofilmwachstum zu identifizieren.
- Warnung von Forschern vor unbeabsichtigter mikrobieller Migration außerhalb der Behandlungszonen.

Dies gewährleistet die Einhaltung der Biosicherheitsvorschriften und eine transparente Dokumentation, insbesondere in regulatorisch sensiblen Kontexten.

5.6. Neue Forschungsergebnisse: AR + Multi-Omics für die Bioinformatik im Feld

Jüngste Arbeiten deuten darauf hin, dass AR mit Omics-Plattformen (Metagenomik, Metabolomik, Transkriptomik) integriert werden kann, um mikrobielle Funktionsdaten räumlich darzustellen.

Beispiel:

- Wang et al. (2022) entwickelten eine AR-Visualisierungs-Engine, die Umwelt-DNA-Daten (eDNA) mit GPS-Koordinaten integriert, um räumlich genaue Überlagerungen der mikrobiellen Vielfalt und funktionellen Merkmale in realen Landschaften zu erzeugen.

Relevanz für die biologische Sanierung:
Dies ist von direktem Nutzen für Feldstudien, in denen Forscher beurteilen müssen, ob Mikroben aktiv Schadstoffe abbauen, bestimmte Gene (z. B. *alkB*, *pahR*, *cydA*) exprimieren oder Konsortien bilden. Mit AR könnten solche Daten vor Ort visualisiert und sofort ökologisch interpretiert werden.

Diese Beispiele aus der Praxis zeigen, wie AR in verschiedenen Umweltbereichen eingesetzt wird, um Kontaminationen zu visualisieren, Sanierungsdynamiken zu simulieren, ökologische Risiken zu überwachen und mikrobiologische Daten zu interpretieren. Jedes Beispiel bietet eine übertragbare Methode für mikrobielle Sanierungsmaßnahmen, insbesondere bei





Feldversuchen, bei denen räumliches Bewusstsein, Echtzeitüberwachung und Sicherheit von entscheidender Bedeutung sind.

Phase	Beschreibung
Erkunden	- Wissenschaftliche Entdeckung: Führen Sie die Schüler in die reale Anwendung von Mikroben in der Umweltsanierung ein.
	- Fallbasierte Forschung: Analyse realer Fallstudien (z. B. Ölverschmutzungs-beseitigung mit <i>Alcanivorax</i> oder Uranbeseitigung mit <i>Geobacter</i>).
	- Bedarfsanalyse: Identifizieren Sie Fehlvorstellungen oder Wissenslücken hinsichtlich der Wirkung von Mikroben und ökologischer Herausforderungen.
Durchführung	- Interaktive Lektionen: Führen Sie die Schüler mithilfe von mikrobiellen Animationen und Videos aus dem realen Leben durch den Übergang vom Labor zum Feld.
	- AR-Erkundung: Verwenden Sie Tools wie CoSpaces oder Assemblr EDU, um Feldstandorte zu simulieren und den Abbau von Schadstoffen im Laufe der Zeit zu visualisieren.
	- Gruppenaufgaben: Die Schüler erstellen mithilfe von AR Modelle zur mikrobiellen Sanierung oder Storyboards, um den mikrobiellen Abbau darzustellen.
Verbessern	- AR-Integration: Die Schüler erkunden mikrobielle Hotspots, Nährstoffzonen und Verschmutzungsgradienten mithilfe von Overlays in AR.
	- Interaktives Lernen: Erstellen Sie virtuelle Sanierungszonen (z. B. AR-Karte eines Ölfundortes und Strategie zur Anwendung von Mikroben).
	Gamifizierte Inhalte: Punkte für die korrekte Identifizierung mikrobieller Phasen oder AR-Interaktionen • Quests zur Beseitigung verschiedener Schadstoffe (z. B. Erdöl vs. Schwermetalle) • Kollaborative „Mikroben vs. Schadstoffe“-Kämpfe zur Simulation konkurrierender Wachstumsdynamiken
	AR-basierte Bewertungen: - AR-integrierte Bewertungen, bei denen die Schüler: • den Abbau von Schadstoffen simulieren • Mikroben den Schadstoffen zuordnen • reale Datensätze interpretieren (z. B. Rückgang der Schadstoffkonzentration) - Formative Peer-Review von AR-Szenarien - Abschlussaufgabe: Die Schüler entwerfen und präsentieren einen mikrobiellen AR-Sanierungsplan für ein verschmutztes Ökosystem





Referenzen

Anderson, R. T., Vrionis, H. A., Ortiz-Bernad, I., Resch, C. T., Long, P. E., Dayvault, R., ... & Lovley, D. R. (2003). *Stimulation der In-situ-Aktivität von Geobacter-Arten zur Entfernung von Uran aus dem Grundwasser eines mit Uran kontaminierten Grundwasserleiters*. Angewandte und Umweltmikrobiologie, 69(10), 5884–5891.

Banerjee, R., Singh, J., & Sarkar, A. (2024). *Biokonvektion und Bakterientransport durch poröse Medien: Auswirkungen auf die In-situ-Bioremediation*. Umweltfluidmechanik, 24(2), 167–185.

Biofilm-Anwendungen in der Umweltsanierung. [Wikipedia](#)

Biokonvektion und mikrobielle Motilität in porösen Medien. [arXiv](#)

Beccari, M., Di Palma, L., Lombardi, F. und Majone, M. (2010). *Pilotstudien zur Sanierung chromverseuchter Grundwasserleiter unter Verwendung von Biobarriere- und Reaktionszonentechnologien*. Journal of Hazardous Materials, 178(1-3), 875–882.

Blanck, H. (2002). *Eine kritische Überprüfung der durch Verschmutzung induzierten Toleranz von Gemeinschaften (PICT) und ihrer Verwendung zur Bewertung von Umweltrisiken*. Environmental Toxicology and Chemistry, 21(3), 503–511.

Cao, J., Liu, X., Su, X., Hædahl, J. E., Berg Fjellestad, T., Haziri, D., Hoang, A. N. V., Koskiah, J., Karjalainen, S. M., Ronkanen, A. K., Tarkoma, S., Hui, P., 2024, Head-mounted display-based augmented reality for water quality visualisation, <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.12.002>

Cases, I., & de Lorenzo, V. (2005). *Genetisch veränderte Organismen für die Umwelt: Geschichten über Erfolge und Misserfolge und was wir daraus gelernt haben*. International Microbiology, 8(3), 213–222.

Umfassende Übersicht: *Bioremediation von PAH-kontaminierten Standorten in einem Biopiling in Originalgröße* (2024). [ScienceDirect](#)

Flemming, H.-C., & Wuertz, S. (2019). *Bakterien und Archaeen auf der Erde und ihre Häufigkeit in Biofilmen*. Nature Reviews Microbiology, 17(4), 247–260

Garzón, J., Pavón, J., & Baldiris, S. (2019). *Systematische Überprüfung und Metaanalyse von Augmented Reality in Bildungsumgebungen*. Educational Research Review, 27, 244–260.

Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K. und Ahn, Y. (2016). *Aktueller Wissensstand zum mikrobiellen Abbau polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK): Eine Übersicht*. Frontiers in Microbiology, 7, 1369.

Guo, J., Lin, X., Zhao, M., et al. (2023). *Integrierte Omics für die mikrobielle Überwachung während der biologischen Sanierung von mit Erdöl kontaminierten Böden im Feldmaßstab*. Science of the Total Environment, 869, 161649.





Hemme.C.L, Careley.R, Norton.A, Ghumman.M, Nguyen.H, Ivone.R, U menon.J, Shen.J, Bertin.M, King.R, Leibovitz.E, Bergstrom.R, Cho.B, 2023, Entwicklung von Virtual- und Augmented-Reality-Anwendungen für die Ausbildung in Naturwissenschaften, Technik, Ingenieurwesen und Mathematik, BioTechniques 75: 11–20, 10.2144/btn-2023-0029

Holmes, D. E., Utturkar, S. M., D'haeseleer, P., et al. (2007). *Transkriptom von Geobacter uraniireducens, das in uranverseuchten Sedimenten unter der Erdoberfläche wächst*. ISME Journal.

Lovley, D. R. et al. (2003). *Stimulierung der In-situ-Aktivität von Geobacter-Arten zur Entfernung von Uran aus dem Grundwasser eines mit Uran kontaminierten Grundwasserleiters*. Angewandte und Umweltmikrobiologie, 69(10), 5884–5891.

Keller, A. A., & Yang, R. T. (2021). *Vorhersagemodelle in der biologischen Sanierung: Von der Theorie zur praktischen Anwendung*. Environmental Science & Technology, 55(8), 5082–5094.

Lovley, D. R., et al. (2022). *Umweltbiotechnologie: Bioremediation unter Verwendung mikrobieller Systeme*. Annual Review of Microbiology, 76, 145–165.

Madison, A. S., Sorsby, S. J., Wang, Y., & Key, T. A. (2022). *Steigerung der Wirksamkeit der In-situ-Bioremediation durch den Einsatz molekularbiologischer Werkzeuge im Feldmaßstab*. Frontiers in Microbiology.

Multi-Omics-Ansätze in der mikrobiellen Ökologie für die Wassertechnik. [arXiv](#)

Übersicht über die Methode der durch Verschmutzung induzierten Toleranz von Gemeinschaften. [Wikipedia](#)

Pokrić, B., et al. (2012). *ekoNET: Umweltüberwachungssystem mit AR und Sensorfusion*. Journal of Wireless and Mobile Networks.

Prince, R. C., McFarlin, K. M., Butler, J. D. und Febbo, E. J. (2013). *Der primäre biologische Abbau von dispergiertem Rohöl im Meer*. Chemosphere, 90(2), 521–526.

Aktuelle Feldstudie zu Grundwasserleitern: *Auswirkungen von Bioremediationsmechanismen auf die Reduzierung von Uran im Grundwasser* (2024). [ScienceDirect](#)

Überblick über nachhaltige Strategien zur biologischen Sanierung (2024). [ScienceDirect](#)

Sanità, M., et al. (2024). *Augmented Reality für die Überwachung der Luftqualität in der Region Marken, Italien*. WJARR, 22(1), 120–128.

Schmidt, A., Barz, M., & Wittstock, A. (2021). *Clean-AR: Einsatz von Augmented Reality zur Verringerung des Risikos einer Kontamination von Oberflächen durch Krankheitserreger in der Luft*. Aktuelle Richtungen in der Biomedizintechnik, 7(1), 159–162.





Semple, K. T., Doick, K. J., Jones, K. C. et al. (2004). *Die Definition der Bioverfügbarkeit und Biozugänglichkeit von kontaminierten Böden und Sedimenten ist kompliziert*. Umweltwissenschaft und Technologie.

Silva, E. R., & Gültekin, A. (2021). *AR-gestütztes naturwissenschaftliches Lernen für Schüler der Mittelstufe: Lernende für Umweltverschmutzung und Nachhaltigkeit begeistern*. Journal of STEM Education, 22(3), 45–53.

Singh, J. S., Abhilash, P. C., & Singh, H. B. (2023). *Mikrobielle Bioremediation: Strategien für Umweltsanierung und Nachhaltigkeit*. Wissenschaft der Gesamtumwelt, 892, 164503.

Stojanovic, J., et al. (2012). *Mobile Augmented Reality für die Umweltüberwachung*. Personal and Ubiquitous Computing, 16(8), 1027–1039.

Studie zur Cr(VI)-Sanierung durch Geobacter-Arten: *Bioremediation von Cr(VI)-kontaminiertem Grundwasser* (2019). [Wikipedia+3ScienceDirect+3Wikipedia+3](#)

Thomsen, P. F., & Willerslev, E. (2015). *Umwelt-DNA – Ein neues Instrument im Naturschutz zur Überwachung der vergangenen und gegenwärtigen Artenvielfalt*. Biologische Erhaltung, 183, 4–18.

Wang, X., Gao, Y., & Liu, J. (2022). *Augmented-Reality-basierte Visualisierung von Metagenomikdaten in der Umweltüberwachung*. Frontiers in Computer Science, 4, 934694.

Wu-Juan Sun et al. (2024). *Pilot-Feldstudien zur aktivierten mikrobiellen Sanierung von mit Erdöl kontaminierten Böden* (Environ Geochem Health). [ResearchGate+1PubMed+1](#)

Xiong, W., Chen, L., Gao, H., et al. (2025). *Schwermetallverschmutzung und -umwandlung im Boden: eine umfassende Übersicht über natürliche biologische Sanierungsstrategien*. Journal der Umm Al-Qura University for Applied Sciences.

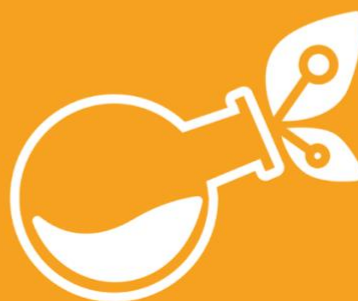
Yakimov, M. M., Timmis, K. N. und Golyshin, P. N. (2007). *Obligat ölabbauende Meeresbakterien: Schlüsselakteure bei der Beseitigung von Ölverschmutzungen*. Nature Reviews Microbiology, 5(10), 803–812.

Zhang, Y., Karpf, A. und Brovelli, M. A. (2023). *Augmented Reality für die Visualisierung von Grundwasser in der industriellen Überwachung und Standortsanierung*. Computers & Geosciences, 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.