

Artikel

Anwendung der mikrobiell induzierten Karbonatfällung für Zerfallskontrolle von Granitrestböden

Luo Xiaoyan ¹, Yingqi Feng ², Chunjun Li ¹ und Weiping Liu ^{2,*}

¹ Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China; luoxiaoyan2@126.com (XL); lichunjun2001@126.com (CL)

² Fakultät für Infrastrukturtechnik, Universität Nanchang, Nanchang 330031, China; sdtcfyq@163.com

* Korrespondenz: liuweiping@ncu.edu.cn

Zusammenfassung: Granitrestböden sind im Südosten Chinas weit verbreitet. Diese Böden weisen mechanische Eigenschaften wie Lockerheit, starke Risse und leichten Zerfall auf, was bei Regen zu schweren Bodenerosionen führen kann. Die mikrobiell induzierte Karbonatfällung (MICP) ist eine umweltfreundliche Alternative zur Bodenstabilisierung. Diese Studie schlägt eine neue Strategie zur Zerfallskontrolle von Granitrestböden unter Verwendung der MICP-Technologie vor. Die Auswirkungen der Konzentration der Bakterienlösung, der Konzentration der Zementierungslösung und des Behandlungszyklus werden durch einen Zerfallstest untersucht. Die optimalen Behandlungsparameter für Granitrestböden unter Verwendung der MICP-Technologie werden durch Analyse der Zerfallsprozesse und der Restqualitätsindikatoren des Zerfalls ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die behandelten Proben drei Arten des Zerfalls aufweisen: vollständige Zersetzung, unvollständige Zersetzung und Nicht-Zersetzung. Das ausgefällte Calciumcarbonat (CaCO_3) bindet die Bodenpartikel und füllt die Poren. Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit und Kosten sowie einer Bakterienlösungskonzentration von $\text{OD}_{600} = 0,75$ sind fünf Zyklen der MICP-Behandlung mit einer Zementierungslösungskonzentration von 1,2 mol/l optimal für die Zementierungswirkung von CaCO_3 wird durch Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit einem energiedispersiven Röntgenspektroskop (EDX) nachgewiesen. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass MICP ein vielversprechender Kandidat zur Kontrolle des Zerfalls von Granitrestböden ist.

Schlüsselwörter: Granitrestboden; mikrobiell induzierte Karbonatfällung; Zerfall; Konzentration bakterieller Lösung; Konzentration der Zementierungslösung; Behandlungszyklus



Zitat: Luo, X.; Feng, Y.; Li, C.; Liu, W. Anwendung mikrobiell induzierter Karbonatfällung zur Kontrolle der Zersetzung von Granitrestböden. Appl. Sci. **2024**, *14*, 6343. <https://doi.org/10.3390/app14146343>

Wissenschaftlicher Redakteur: Syed Minhaj Saleem Kazmi

Empfangen: 3. Mai 2024
Überarbeitet: 15. Juni 2024
Akzeptiert: 2. Juli 2024
Veröffentlicht: 20. Juli 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren.
Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz.
Dieser Artikel ist ein Open Access-Artikel vertrieben unter den Bedingungen und Bedingungen der Creative Commons Namensnennungslizenz (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Einleitung

Granitrestboden entsteht durch eine Reihe physikalischer und chemischer Verwitterungsprozesse des Muttergesteins Granit, das im Südosten Chinas weit verbreitet ist. Dieser Bodentyp ist locker, weist viele Risse auf und zerfällt leicht [1–3], was bei Regen zu schwerer Bodenerosion führt [4–6]. In Benggang gibt es 239.125 Standorte mit einer Fläche von 1.220,05 km² [7,8] und einer durchschnittlichen Erosionsrate von 590.000 t/(km² · Jahr) [9]. Benggang ist durch eine hohe Erosionsintensität und ein ausgedehntes Erosionsgebiet gekennzeichnet [10,11]. Der Kreis Yudu, einer der Kreise mit schwerer Bodenerosion in der chinesischen Provinz Jiangxi, macht 29,17 % des gesamten Kreises aus, der auf Benggang zurückzuführen ist.

Die traditionellen Methoden zum Schutz von Böschungen in den Benggang-Gebieten basieren hauptsächlich auf Pflanzen- und Ingenieurmaßnahmen, die Nachteile wie einen hohen Ingenieuraufwand, unbequeme Konstruktion, hohe Kosten und lange Zeit haben [12–14]. Daher ist es von großer technischer Bedeutung, eine neue Strategie zum Schutz von Böschungen zu finden, die energiesparend, umweltfreundlich und auf Granitrestböden einfach zu errichten ist. Die mikrobiell induzierte Karbonatfällung (MICP) ist eine der in den letzten Jahren aufkommenden geotechnischen Ingenieurtechnologien [15,16]. An ihrem Prozess sind drei typische Substanzen beteiligt: Bakterien, Substrat und Kalziumquelle, die in einer biologischen Reaktion Karbonatkristalle um die Bodenpartikel herum ausfällen und so die Bodenstruktur umgestalten [17,18]. Ba

Auf einem im Boden angereicherten, Urease produzierenden Bakterium namens *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859) verwendet es Harnstoff als Substrat, katalysiert die Hydrolyse von Harnstoff⁺ und CO_3^{2-} zur Erzeugung von NH_4 durch Stoffwechsel und zieht Ca^{2+} durch die negative Ladung an, die von Makromolekülen wie Proteinen innerhalb des Bakteriums erzeugt wird, und induziert so die Ausfällung von CaCO_3 .

Während des Bindevorgangs werden keine giftigen Substanzen erzeugt, was darauf hindeutet, dass es ein umweltfreundliches Bindematerial ist [19,20]. MICP weist außerdem eine hohe Anwendbarkeit und Wasserstabilität auf, wodurch verschiedene Bodenarten wie organischer Boden [21], Löss [22], Sand [23], Eisenabraum [24] und Wüste [25] **wirksam verbessert werden können**. Die Verbesserungen, die MICP bei geotechnischen Materialien erzielt, hängen auch von den Einflussfaktoren verschiedener Mineralisierungsprozesse ab, wie beispielsweise den Calciumquellen [26], der Konzentration der Bakterienlösung [27], der Konzentration der Zementierungslösung [28], dem Verhältnis der Zementlösung [29], dem Aushärtungsalter [30] und dem pH-Wert [24]. Die Bildung von Calciumcarbonatkristallen hat einen erheblichen Einfluss auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des behandelten Bodens. Der mit MICP behandelte Boden ist weiterhin für Pflanzenwachstum geeignet und sein Restharnstoff kann als Nährstoff dienen [19]. Es liegen jedoch nur begrenzte Studien zur MICP-Modifizierung von Granitrestböden im Benggang-Gebiet vor, um deren Widerstandsfähigkeit gegen Regenerosion

Ein wichtiger Weg zur Verhinderung von Boden- und Wasserverlusten im Erosionsbereich besteht darin, die Wasserstabilität des Oberflächenbodens zu verbessern und dadurch seine Erosionsbeständigkeit zu erhöhen. Der oberflächliche Granitrestboden im Benggang-Gebiet ist nach längerer Verwitterung im Allgemeinen locker. Die durch MICP erzeugten Kalziumkarbonatkristalle können Bodenporen füllen und ihre Zementierung verbessert die Verbindungsstärke zwischen Bodenpartikeln [28].

Es ist von entscheidender Bedeutung, die geeigneten Parameter von MICP zu bestimmen, wie z. B. die Konzentration der Bakterienlösung und die Konzentration der Instrumentenlösung [23]. Daher ist für die praktische technische Anwendung von MICP bei der Verhinderung und Bekämpfung der Bodenerosion eine quantitative Analyse erforderlich.

Der Bodenzerfall bezeichnet die Haltbarkeit von Boden bei Kontakt mit stehendem Wasser und kann zur Bewertung seiner Wasserstabilität verwendet werden [31–33]. Liu et al. [34] untersuchten das Zerfallsverhalten von Granitrestböden entlang eines typischen Verwitterungsprofils aus der Stadt Xiamen in China. Sun et al. [35] untersuchten Zerfallsmenge und Zerfallsverhältnis von Bodenproben, die mit Zement, Branntkalk und Kaolinit behandelt wurden. Zhang et al. [36] zeigten, dass das effektive Porenverhältnis und die Bodenwasserkennlinien die wichtigsten Kontrollfaktoren sind, die die Zerfallsgeschwindigkeit beeinflussen. Liu et al. [1] erörterten die kombinierten Einflüsse von starkem Niederschlag und saurem Regen auf die Zerfallseigenschaften von Granitrestböden. Die Zerfallseigenschaften von Granitrestböden, die mit der MICP-Technologie behandelt wurden, haben jedoch nicht genügend Aufmerksamkeit erhalten. Es ist notwendig, die Auswirkungen verschiedener Mineralisierungsfaktoren auf die Zerfallsprozesse zu untersuchen. Die optimalen Parameter des MICP zur Zerfallskontrolle von Granitrestböden müssen ermittelt werden.

In diesem Artikel wird die MICP-Methode verwendet, um den Zerfall von Granitrestböden zu verhindern. Eine Reihe von Zerfallsexperimenten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Konzentrationen von Bakterienlösungen, Zementierungslösungen und Konzentrationsbehandlungszyklen wird durchgeführt, um die optimalen Parameter der MICP-Methode zu bestimmen. Der Einflussmechanismus von MICP auf den Zerfall von Granitrestböden wird dann anhand mikrostruktureller Merkmale aufgedeckt. Die Widerstandsfähigkeit gegen Erosion durch starke Regenfälle wird in Zukunft untersucht. Diese Studie bereitet die Anwendung der MICP-Technologie zur Kontrolle der Benggang-Erosion vor.

2. Materialien

2.1. Bedingungen für die

Probenentnahme Der Granitrestboden wurde aus einem Erosionsbereich in Benggang in einer Tiefe von 0,5 m in der Stadt Gongjiang (25°59'24" N, 115°26'32" O), Kreis Yudu, Provinz Jiangxi, in Südchina, entnommen. Die natürliche Trockendichte beträgt 1,50 g/cm³, die Fließgrenze beträgt 39,3 %, die Plastizitätsgrenze 27,5 %, der Durchlässigkeitskoeffizient beträgt $9,7 \times 10^{-7}$ cm/s und das spezifische Gewicht beträgt 2,56. Die Korngrößenverteilungskurve ist dargestellt

Bodenpartikelgröße (mm)	Prozent
10	100
5	100
2,5	100
1,25	100
0,63	100
0,315	100
0,15	100
0,075	100
0,063	0
0,05	0
0,04	0
0,035	0
0,03	0
0,025	0
0,02	0
0,015	0
0,0125	0
0,01	0
0,0075	0
0,0063	0
0,005	0
0,004	0
0,0035	0
0,003	0
0,0025	0
0,002	0
0,0015	0
0,00125	0
0,001	0

Abbildung 1: Korngrößenverteilungskurve.

Bakterienlösung und Zementierungslösung 2.2.

Indieses Studie wird das Pasteur-Institut (Paris) im Jahr 1890 als westkatives Bakterium betrachtet. In dieser Studie wird die Sicherheit der Pathogenität und hohen Ursubstanzaktivität. Die Bakterienkulturierung besteht aus drei Phasen, nämlich Nährlösungs-vorbereitung, Mediumvorbereitung und besteht aus drei Phasen, nämlich Nährlösungs-vorbereitung, Mediumvorbereitung und

bakterielle Inokulation und Kultivierung: (a) Insgesamt 25 g/L Luria-Bertani (LB)-Brühe sind bakterielle Inokulation und Kultivierung. (b) insgesamt 25 g/L Luria-Bertani (LB)-Brühe sind vorbereitet, 20 min bei 120 °C im Autoklaven dampfsterilisiert und dann unter UV abgekühlt vorbereitet, 20 min bei 120 °C im Autoklaven dampfsterilisiert und dann unter UV abgekühlt

Bestrahlung auf dem aseptischen Operationstisch: (a) Nach dem Abkühlen auf 40 °C wird Harnstoff bei einer Konzentration von 1 mol/L und der pH-Wert wird mit NaOH auf 9 eingestellt. Anschließend wird die Nährlösung-Konzentration von 1 mol/L und der pH-Wert wird mit NaOH auf 9 eingestellt. Anschließend wird die Nährlösung-tion wird in Petrischalen abgefüllt und unter aseptischen Bedingungen weiter gekühlt wird in Petrischalen abgefüllt und unter aseptischen Bedingungen weiter gekühlt, bis

bis zur Verfestigung: (c) *Sporosarcina pasteurii* wird vorsichtig auf die Oberfläche des so-Verfestigung. (c) *Sporosarcina pasteurii* wird vorsichtig auf die Oberfläche des erstarrten verflüssigten Medium und dann in eine konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit von 30 °C und Medium und dann in eine konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit von 30 °C und 60% für 24 h, um eine vollständige Kultivierung der Bakterien zu erreichen. Die Bakterien und das Wachstumsmedium werden in Zentrifugenröhrchen bei 4 °C gelagert. Das Wachstumsmedium wird durch Auflösen von 10 g Kasein in Caseintrypton, 10,0 g Natriumchlorid und 5,0 g Hefeextrakt in einem Liter deionisiertem Wasser.

isiertes Wasser.

Die Anfangsdichte (OD600) der gesammelten Bakterienkultur beträgt 1,5. Verschiedene Bakterien
Kochansaugenröhren, die gesammelten Bakterienkultur beträgt 1,5. Durch Zugabe von physiologischer
Lösung (0,25, 0,50, 0,75 und 1,0) wird die Bakterienkonzentration erreicht werden.
Natriumchloridlösung) erreicht werden. Die OD600-Werte der Bakterienlösung betragen 0,25, 0,50, 0,75 und 1,0. Die
Chloridlösung). Die OD600-Werte der Bakterienlösung betragen 0,25, 0,50, 0,75 und 1,0. Die Bakterienlösung
wird in Zentrifugenröhrchen bei 4 °C gelagert.
Die Bakterienlösung wird in Zentrifugenröhrchen bei 4 °C gelagert.

Die in dieser Studie verwendete Zementierungslösung besteht aus 1,0 mol/L äquimolarem Harnstoff und 1,0 mol/L Calciumchlorid. Vier Arten von Zementierungslosungskonzentrationen von 1,0 mol/L Calciumchlorid. Zur Behandlung des Granitrestbodens werden vier Arten von Zementierungslosungskonzentrationen von 0,4 mol/L, 0,8 mol/L, 1,2 mol/L und 1,6 mol/L verwendet. Zur Behandlung des Granitrestbodens werden 0,4 mol/L, 0,8 mol/L, 1,2 mol/L und 1,6 mol/L verwendet.

3. Methoden

3.1. Desintegrationsapparatur

3.1. Zerfallsapparatur Wie

in Abbildung 2 dargestellt wird der Zerfallsversuch mit einer selbstgebauten Zerfallsapparatur durchgeführt. Diese Zerfallsapparatur besteht aus vier Teilen: dem Trägerrahmen, dem Zählkreislängenrohr, dem Zählrohr und dem Stützfahnen, der

dem Trägersystemen
Zerkleinerungsapparat. Dieser Zerkleinerungsapparat besteht aus vier Teilen: dem Stützrahmen, der Spule, die sich drehen kann, der Wasserbox und des Wasserzirkulations- und des Wägetisches. Das Stützgestell ist ein kubischer Rahmen aus 2,5 cm dicken Vertikallinien mit einer Größe von 60 cm x 60 cm x 50 cm. Außerdem ist eine thermostatische Wasserbox und eine kleine Glasbox im Inneren mit Größen von 40 cm x 40 cm x 25 cm bzw. 30 cm x 30 cm x 25 cm. Der Zerfall

cm × 50 cm. Das Spülbecken enthält eine thermostatische Wasserbox und eine kleine Glasbox im Inneren mit den Abmessungen 40 cm × 40 cm × 25 cm bzw. 30 cm × 30 cm × 25 cm. Der Zerfallstest wird in einer statischen Wasserumgebung und bei konstanter Temperatur durchgeführt. Der Test wird in einer statischen Wasserumgebung und bei konstanter Temperatur durchgeführt. Die Halterung umfasst ein Metallgitter und eine dünne Schnur. Die Öffnungsgröße der Metallgittervorrichtung umfasst ein Metallgitter und eine dünne Schnur. Die Öffnungsgröße des Metallgitters, das für die zur Unterstützung der Bodenproben verwendete Dicke beträgt 0,9 cm. Die zur Unterstützung der Bodenproben verwendete Dicke beträgt 0,9 cm.

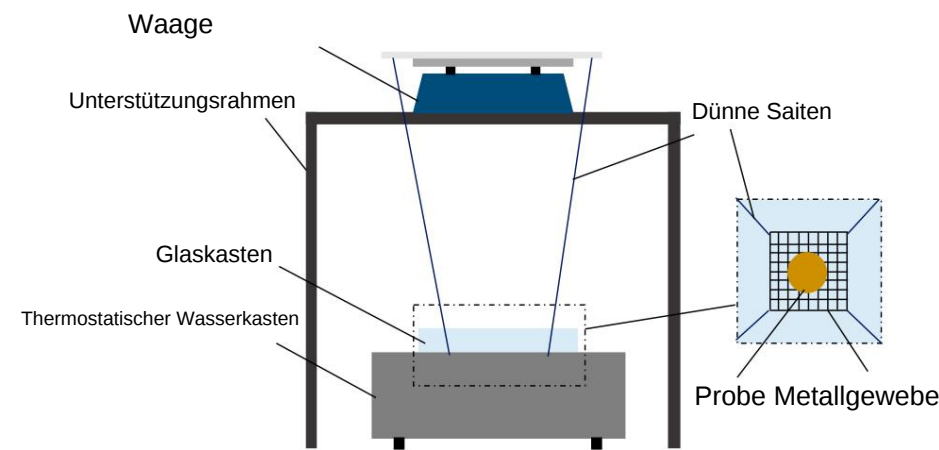


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsgeräts.

3.2. Verfahren des Zerfallstests 3.2. Verfahren

3.2.1. Probenvorbereitung 3.2.1.

Der Boden besteht aus einem 20-ml-Kleber. Anschließend wird er in einem Trocknen Ofen bei 105 °C in einen Ofen gegeben. Der anfängliche Feuchtigkeitsgehalt wird auf einen Wert von 15 % kontrolliert. Die Testproben werden erneut geformt. Der Probe eines Schneidrings von 60 cm³. Der Boden wird statisch auf den Zielwert Boden trocken verdichtet Probe eines Schneidrings Dichte von 1,5 g/cm³. Die umgeformte Probe wird in eine versiegelte Box mit konstanter Luftfeuchtigkeit für eine Dichte von 1,5 g/cm³ gelegt. 24 Stunden, um eine gleichmäßige Wasserverteilung zu gewährleisten. Die Sterilisationsmethode wird als MICP-Behandlung angewendet. 24 Stunden, um eine gleichmäßige Wasserverteilung zu gewährleisten. Die Sterilisationsmethode wird als MICP-Behandlung angewendet. ment auf der Oberfläche der Proben. Der Sprühvorgang umfasst zwei Schritte. Zunächst werden 10 mL Behandlung auf der Oberfläche der Proben. Der Sprühvorgang umfasst zwei Schritte. Zunächst werden 10 mL Behandlung auf der Oberfläche der Proben. Bakterienlösung wird gleichmäßig auf die Probenoberfläche gesprüht. Anschließend werden die Proben Bakterienlösung wird gleichmäßig auf die Probenoberfläche gesprüht. Anschließend werden die Proben ausgehärtet in der Box mit konstanter Temperatur und Feuchtigkeit (Raumtemperatur von 25 °C ± 2 °C, Luftfeuchtigkeit von 85 % ± 5 %) für 3 Stunden, um sicherzustellen, dass sich die Bakterien ausbreiten und vermehren. Zweitens 10 mL Zementierungslösung wird auf dieselbe Oberfläche gesprüht. Anschließend werden die Proben in einem 20-ml-Kleber aufgesprüht. Anschließend werden die Proben in einem 20-ml-Kleber aufgesprüht. 21 h in der Box mit konstanter Temperatur und Feuchtigkeit aufbewahrt, um eine vollständige Wirkung zu gewährleisten. 21 h in der Box mit konstanter Temperatur und Feuchtigkeit aufbewahrt, um eine vollständige Wirkung zu gewährleisten. zwischen Bakterienlösung und Zementierungslösung. Der Aushärtungsprozess ist in Abb. 3 dargestellt. Bakterienlösung und Zementierungslösung. Der Aushärtungsprozess ist in Abb. 3 dargestellt. ure 3. Das einmalige Absprühen einer Bakterienlösung und einer Zementierungslösung ist ein Zyklus. Diese Studie umfasst 1, 3, 5 und 7 Zyklen der MICP-Behandlung. Die Wirkung verschiedener Behandlungszyklen auf 3, 5 und 7 Zyklen der MICP-Behandlung zu untersuchen, um die Wirkung verschiedener Behandlungszyklen auf

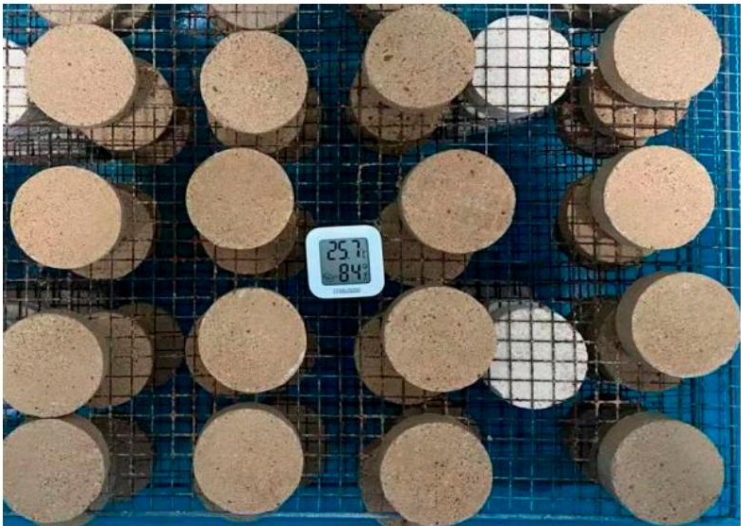


Abbildung 3: Der Aushärtungsprozess.

3.2.2. Testprozesse

Der Zerfallstest wird bei einer Wassertemperatur von 25 °C durchgeführt. Die Probe wird auf das Metallgitter gelegt. Während des Tests werden die Proben ins Wasser fallen gelassen. Das Gewicht wird gemäß der Intervallzeit von 5 s aufgezeichnet. In der Zwischenzeit wird der Zerfall

3.2.2. Testprozesse

Der Zerfallstest wird bei einer Wassertemperatur von 25 °C durchgeführt. Die Probe wird auf das Metallgitter gelegt. Während des Tests werden die Proben ins Wasser geworfen. Die Das Gewicht wird gemäß der Intervallzeit von 5 s aufgezeichnet. Währenddessen wird die Zerfallsmorphologie der Probe mit einer Kamera aufgezeichnet. Wenn die Probe vollständig zerfällt oder sich die Waageanzeige innerhalb von 10 Minuten um weniger als 1 g ändert, ist der Test beendet.

3.3. Versuchsschema

Drei Faktoren, darunter die Konzentration der Bakterienlösung, die Zementierungslösung Konzentration und Behandlungszyklus werden im Versuchsschema konfiguriert. Anstelle der Bakterien und der Zementierung wird deionisiertes Wasser verwendet, um die Probe für die Kontrastgruppe ohne Behandlung (E1~E4). Die Zerfallsprozesse werden analysiert, um um die optimalen Parameter zu erhalten. Die Versuchsschemata sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Experimentelle Schemata.

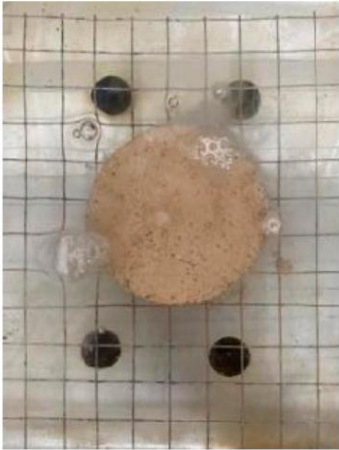
Probennummer	Bakterielle Lösung Konzentration (OD600)	Zementierungslösung Konzentration (mol/L)	Behandlungszyklus
A1 bis A4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A5 bis A8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A9 bis A12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A13 bis A16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
B1 bis B4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B5 bis B8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B9 bis B12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B13 bis B16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
C1 bis C4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
C5 bis C8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
C9 bis C12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
13. bis 16. Jahrhundert	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
D1 bis D4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
D5 bis D8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
D9 bis D12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
T13 bis T16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
E1 bis E4	0	0	1, 3, 5, 7

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Desintegrationsprozesse

Die morphologischen Merkmale der Bodenprobe E3 ohne MICP-Behandlung sind in Abbildung 4. Wenn die Bodenprobe in Wasser getaucht wird, erscheinen zahlreiche Blasen auf der Oberfläche der Bodenprobe, wie in Abbildung 4a dargestellt. In diesem Stadium zerfällt der Boden Rate ist niedriger als die Wasserabsorptionsrate, was zu einer kontinuierlichen Erhöhung der Waagenablesung. Durch die kontinuierliche Wasseraufnahme wird die Bodenprobe allmählich sättigt. Danach kommt es zu einem heftigen Zerfall und es bilden sich Risse auf der Oberfläche des die Bodenprobe, wie in Abbildung 4b dargestellt. Die Probe fällt von der Seite zur Mitte hin ein. Es bilden sich große Blasen und das Wasser wird trüb. Bei t = 300 s ist der Boden fast vollständig in den Boden der Kiste gefallen (vollständiger Zerfall). Wasser dringt in die Poren ein zwischen den Bodenpartikeln, was zu einer Erhöhung des Bodenfeuchtigkeitsgehalts und einer Verringerung der

Die Wasserabsorptionsrate sinkt, was zu einem kontinuierlichen Anstieg der Messwerte führt. Durch die kontinuierliche Wasserabsorption wird die Bodenprobe allmählich gesättigt. Anschließend kommt es zu einem heftigen Zerfall und es bilden sich Risse auf der Oberfläche der Bodenprobe, wie in Abbildung 4b dargestellt. Die Probe fällt von der Seite zur Mitte hin zusammen. Es bilden sich große Blasen und das Wasser wird trüb. Bei $t = 300$ s ist der Boden fast vollständig auf den Boden der Kiste gefallen (vollständiger Zerfall). Wasser dringt in die Poren zwischen den Bodenpartikeln ein, was zu einem Anstieg des Bodenfeuchtigkeitsgehalts und einer Verringerung der Saugkraft führt, was letztendlich zum Zerfall führt. Die Zerfallsprozesse können in drei Phasen unterteilt werden, die letztendlich zum Zerfall führen. Die Phasen sind: Wasserabsorption, Ausbläsung und Zerfall. in drei Prozesse:



(a) $t = 10$ s.



(b) $t = 60$ s.



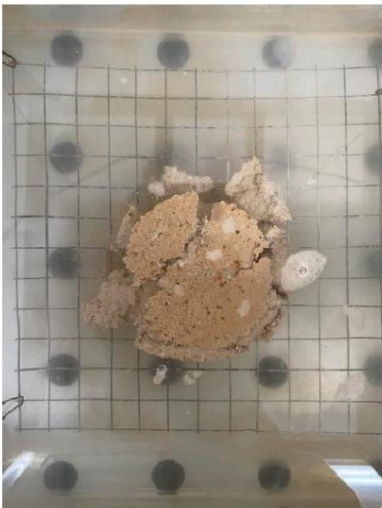
(c) $t = 300$ s.

Abbildung 4. Zerfallsprozess ohne Behandlung (vollständiger Zerfall).

Abbildung 5 zeigt den Zerfallsprozess von Boden mit der MICP-Technologie. Die Bodenprobe wird in eine Zementlösung getaucht, die mit Calciumhydroxid und Calciumchlorid versetzt ist. Die Bodenpartikel werden durch die Zementlösung gesättigt, was zu einer Verfestigung führt. Die Bodenprobe wird in eine Zementlösung getaucht, die mit Calciumhydroxid und Calciumchlorid versetzt ist. Die Bodenpartikel werden durch die Zementlösung gesättigt, was zu einer Verfestigung führt. Die Bodenprobe wird in eine Zementlösung getaucht, die mit Calciumhydroxid und Calciumchlorid versetzt ist. Die Bodenpartikel werden durch die Zementlösung gesättigt, was zu einer Verfestigung führt.



(a) $t = 10$ s.



(b) $t = 60$ s.



(c) $t = 300$ s.

Abbildung 5. Zerfallsprozess bei unvollständiger Zersetzung.

Bodenprobe D11 weist innerhalb von 300 s keine herkömmlichen Zerfallsprozesse auf. Nachdem das Wasser in die Bodenprobe eingedrungen ist, findet nur ein langsamer Wasserabsorptionsprozess statt. Dies liegt daran, dass die Oberflächenverstärkungsschicht der Bodenprobe die gesamte Bodenprobe vollständig umhüllen kann, um einen Zerfall nach mehreren Zyklen der MICP-Behandlung zu verhindern. Die krustenartigen Schichten bedecken die Bodenpartikel, was einen erheblichen Einfluss auf die Wechselwirkung zwischen Partikeln hat und die Erosion verringert [37]. Wasser kann jedoch immer noch langsam eindringen, was zu einer Erhöhung

(c) $t = 300$ s.

7 von 19

(c) $t = 300$ s.

Die Konzentration der Zementierungslösung beträgt 0,4, die Verstärkungseffekte, die durch die Die Konzentration der Bakterienlösung beträgt $0,75 > 0,5 > 1,0 > 0,25$. Wenn die Zementierungslösung Konzentrationen von 0,8 bzw. 1,2, die verstärkenden Effekte der Bakterienlösung Konzentration sind $0,75 > 1,0 > 0,5 > 0,25$. Wenn die Zementierungslösungskonzentration 1,6, der Verstärkungseffekt ist aufgrund der Zunahme der Bakterienlösung signifikanter Konzentration. Der Unterschied im Verstärkungseffekt zwischen 0,75 und 1,0 ist nicht signifikant. Dies deutet darauf hin, dass die Bakterienlösungskonzentration von 0,75 mehr geeignet zum Bilden einer Schicht bestimmter Dicke zur Verstärkung der Bodenproben.

Schicht nach einem Behandlungszyklus. Die Verstärkungsschicht ist jedoch zu klein und dünn und bringt daher keine signifikante Verbesserung.

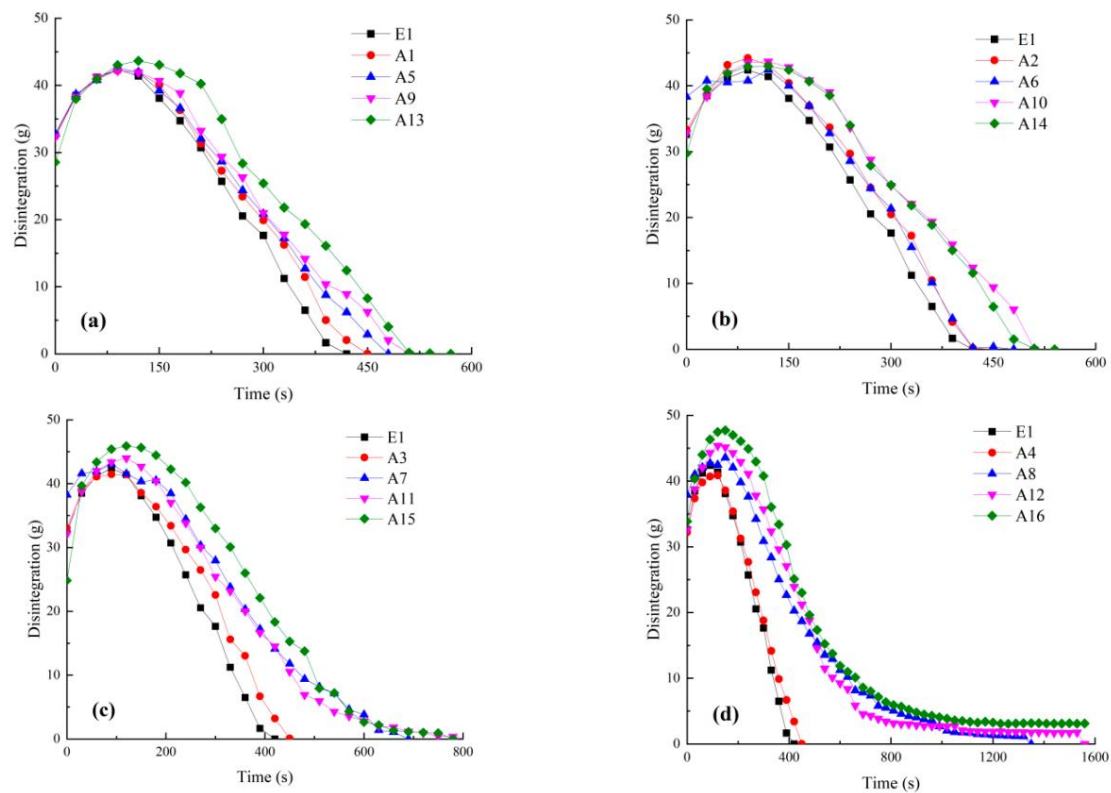


Abbildung 7. Zerfallskurve mit einem Behandlungszyklus unterschiedlicher Bakterienlösungskonzentrationen: (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 und (d) 1,6.

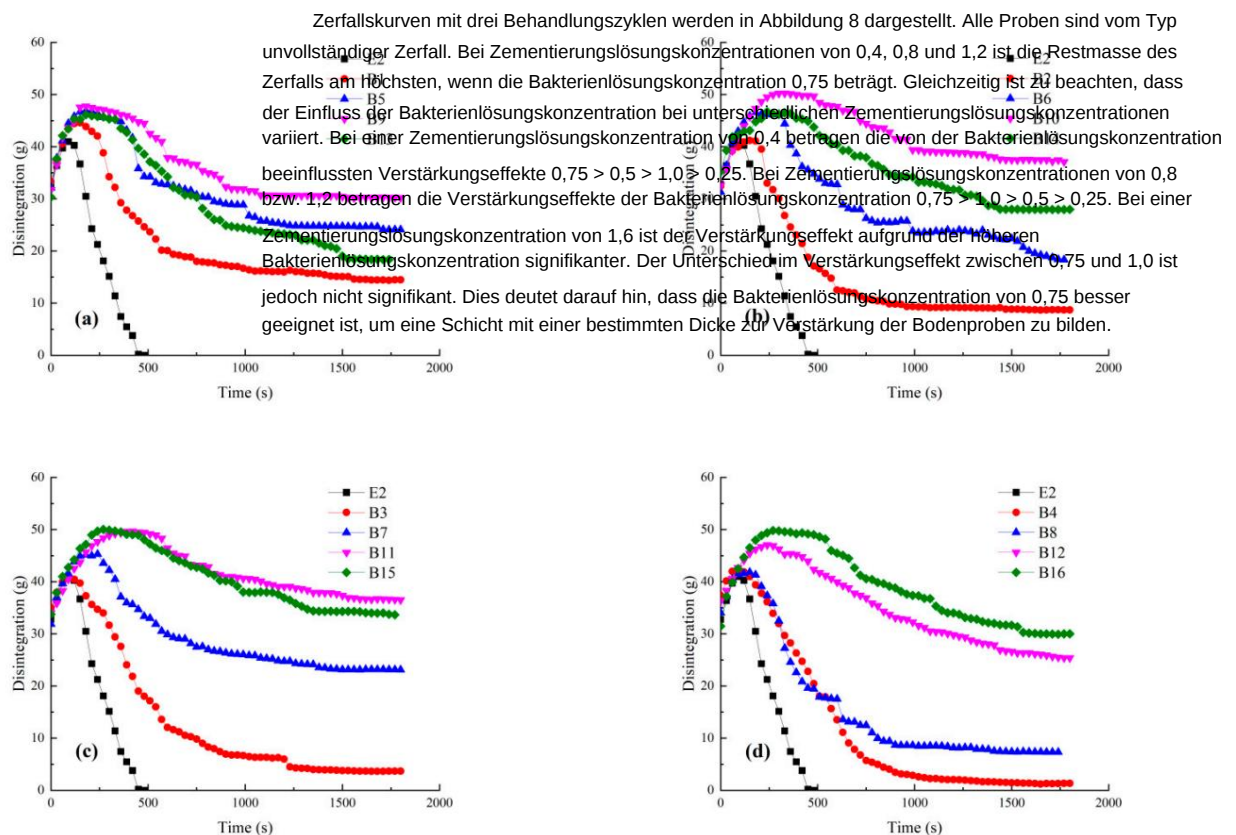


Abbildung 8. Zerfallskurven mit drei Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen: (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 und (d) 1,6.

Aufgrund der kurzen Behandlungszeit wird die MICP-Reaktion nicht vollständig in einem Behandlungszyklus durchgeführt. Bei einer niedrigeren Konzentration der Zementierungslösung, wenn die Konzentration der Bakterienlösung größer als 0,5 ist, kann die Reaktion vollständig durchgeführt werden. Dies führt zu einer schnellen Reaktion. Wenn die Konzentration der Bakterienlösung zu hoch ist, wird eine große Menge an Calciumcarbonatkristallen erzeugt, die die Oberflächenerze des Bodens füllen. Die Verstärkungsschicht bleibt nur auf der Oberfläche und macht es

Aufgrund der kurzen Behandlungszeit wird die MICP-Reaktion nicht vollständig in einem Zyklus durchgeführt. Bei einer niedrigeren Zementierungslösungskonzentration, wenn die Bakterienlösung Konzentration größer als 0,5 ist, kann die Reaktion vollständig durchgeführt werden. Dies führt zu einer schnellen Reaktion. Wenn die Konzentration der Bakterienlösung zu hoch ist, wird eine große Menge Kalziumkarbonatkristalle werden gebildet, um die Oberflächenporen des Bodens zu füllen. Die Verstärkung Schicht bleibt nur auf der Oberfläche, wodurch es für Bakterien und Zement schwierig wird, weiter zu Infiltration. Zerfallskurven mit fünf und sieben Behandlungszyklen sind in Abbildungen 9 und 10. Einige Proben zeigen Nichtzerfallsphänomene nach

Abbildung 9. Zerfallskurven mit fünf Behandlungszyklen unterschiedlicher Zementierungslösungszusammensetzung, fünf Konzentrationen der Bakterienlösung auf die behandelten Proben variiert je nach

zu verschiedenen Behandlungszyklen. Nach mehreren Behandlungszyklen ist die Wirkung des MICP durchgeführt. Die Reaktion ist begrenzt. Eine geeignete Kombination der Bakterienlösungskonzentration und der Reaktionsbedingungen erreicht werden, wenn die Konzentration der Bakterienlösung größer als 0,5 ist. Die Reaktion kann durchgeführt werden. Dies führt zu einer guten Reaktion. Wenn die Bedingungen erfüllt sind, ist eine Wenn die Konzentration der Bakterienlösung zu hoch ist, wird eine große Menge an Kalziumkarbonatkristallen gebildet, um die Oberflächenporen des Bodens zu füllen. Die Verstärkungsschicht bleibt nur auf der Oberfläche, so dass sie die am schwierigsten für Bakterien und Zement weiter zu infiltrieren. Zerfallskurven mit fünf und 1,6, die am besten geeignete sieben Behandlungszyklen sind in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt. Einige Proben weisen im Vergleich zur Integrationenphänomene nach fünf und sieben Behandlungszyklen. Unter Berücksichtigung der Behandlungswirkung und des wirtschaftlichen Nutzens ist die Konzentration der Bakterienlösung von 0,75 ist bei der MICP-Verstärkung von Granitrestböden wirksam.

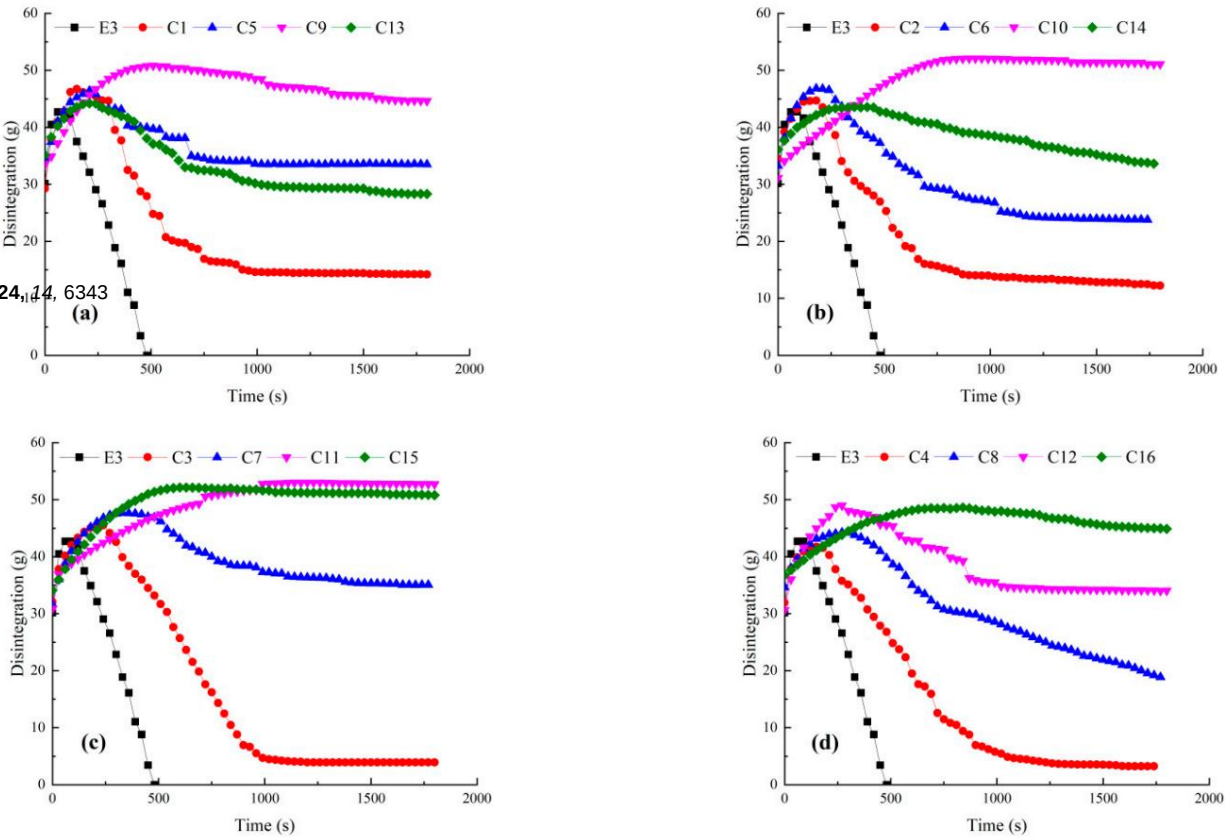


Abbildung 9. Zerfallskurve mit fünf Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen der Zementierungslösung. Abbildung 9. Zerfallskurve mit fünf Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen der Zementierungslösung : (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 und (d) 1,6.

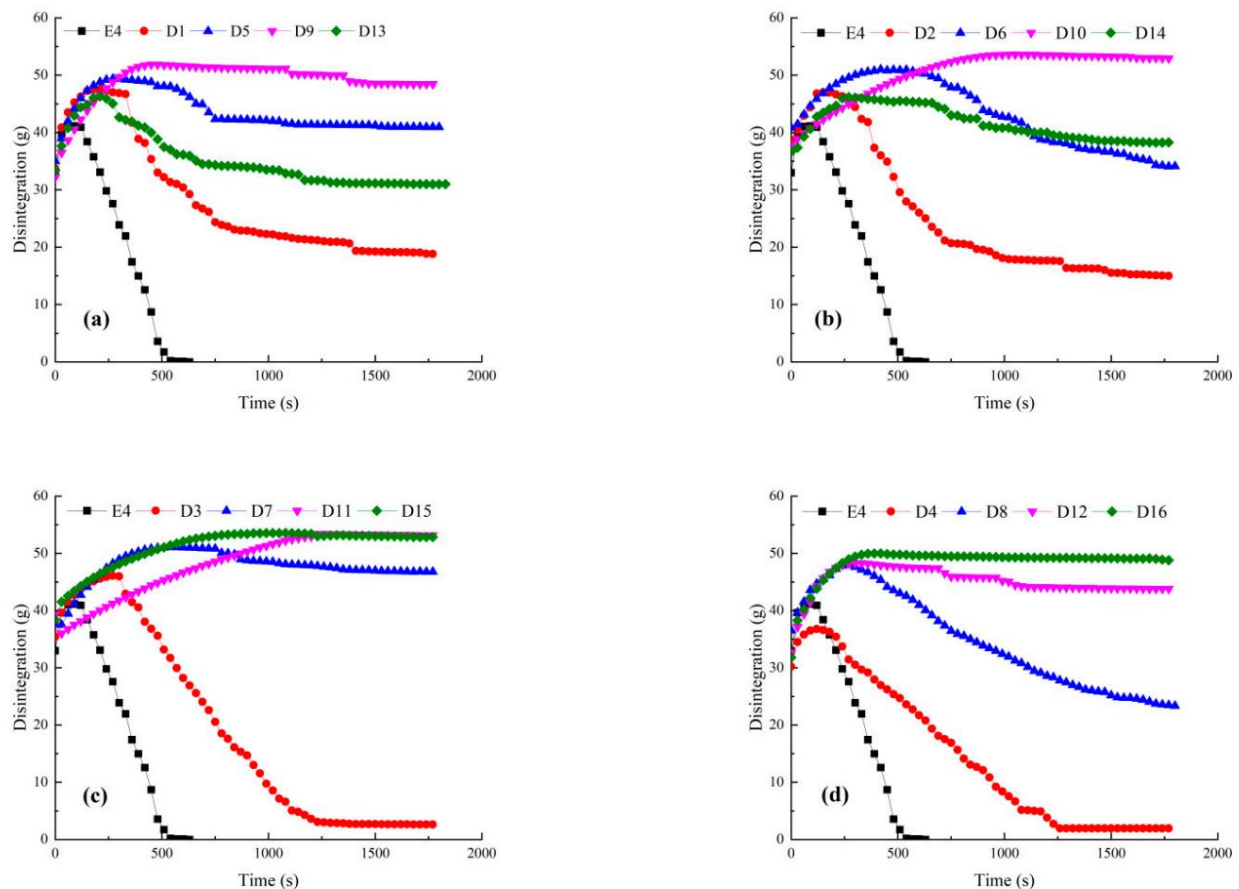


Abbildung 10. Zerfallskurve mit sieben Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen der Zementierungslösung: (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 und (d) 1,6. Konzentrationen: (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 und (d) 1,6.

4.3. Einfluss der Konzentration der Zementierungslösung auf den Zerfall

Die Wirkung der Konzentration der Bakterienlösung auf die behandelten Proben variiert je nach Behandlungszyklen. Nach mehreren Behandlungszyklen ist die Wirkung der MICP-Integration, der Zerfallskurven unter verschiedenen Konzentrationen der Zementierungslösung, unterschiedlich.

Reaktion ist begrenzt. Für eine bestimmte Bakterienlösungskonzentration wird eine geeignete Kombination der Bakterienlösungskonzentration und der Werte 0,4, 0,8, 1,2 und 1,6 mol/l angegeben. Zementierungslösungskonzentration kann eine gute Verstärkung unter ausreichender Reaktion erreichen. Die Zerfallskurve mit einem Behandlungszyklus ist in Abbildung 11 dargestellt. Wenn ein Zyklus Eine geringere Konzentration der Bakterienlösung ist für niedrigere Konzentrationen geeignet. Bei einer Behandlung wird eine begrenzte Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen Zerfall erreicht. tionslösungskonzentrationen. In der Zwischenzeit ist die Zementierungslösungskonzentration unter Verwendung der MICP-Technologie in der Lage, und die Probe zerfällt vollständig.

Die am besten geeignete Bakterienkonzentration ist 0,75. Wenn die Konzentration der Zementierungslösung 1,2 ist, ist die am besten geeignete Bakterienkonzentration 1,0. Es gibt noch nicht viel von einem Alle Proben

weisen den Typ der unvollständigen Zersetzung auf. Wenn die Bakterienlösung Konzentration beträgt 0,25, die Verstärkung der Konzentration Lösungskonzentration ist

0,4 > 0,8 > 1,2 > 1,6. Wenn die Bakterienlösungskonzentration 0,5 beträgt, ist die Verstärkung

der Konzentration der Lösung beträgt 1,2 > 0,4 > 0,8 > 1,6. Wenn die Bakterien

Lösungskonzentration beträgt 0,75, die Verstärkung der Konzentration Lösungskonzentration

ist 1,2 > 0,8 > 0,4 > 1,6. Wenn die Bakterienlösungskonzentration 1,0 beträgt, ist die Verstärkung

der Konzentrationslösungskonzentration ist 1,2 > 1,6 > 0,8 > 0,4. Dies zeigt auch, dass

Die Zementierungslösungskonzentration muss mit der Bakterienlösung kombiniert werden

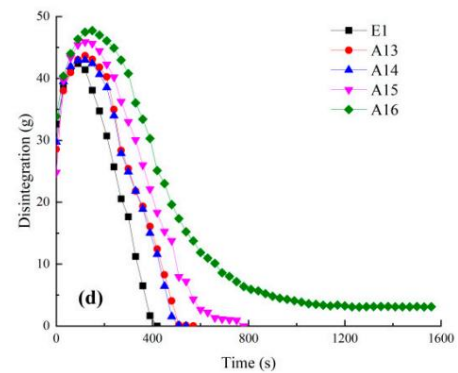
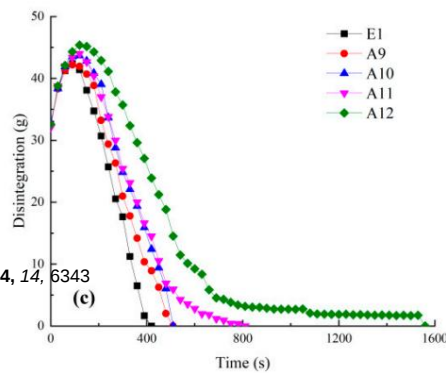
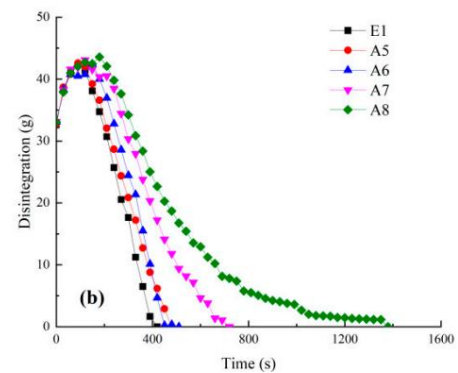
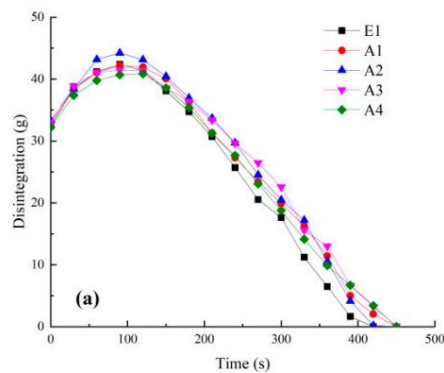
Konzentration, um eine gute Behandlungswirkung zu erzielen. Bei niedrigeren Bakterienlösungskonzentrationen

Die in der hochkonzentrierten Zementlösung enthaltenen Ionen hemmen die

Ureaseaktivität in der Bakterienlösung [38]. Unter diesen Umständen ist die MICP-Reaktion

Die Rate wird verringert und somit wird die Anzahl der endgültigen Reaktionsprodukte verringert.

Integration werden die Zerfallskurven unter verschiedenen Zementierungslösungskonzentrationen von 0,4, 0,8, 1,2 und 1,6 mol/l für eine bestimmte Bakterienlösungskonzentration dargestellt. Die Zerfallskurve mit einem Behandlungszyklus ist in Abbildung 11 dargestellt. Wenn ein Behandlungszyklus durchgeführt wird, gibt es eine begrenzte Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen Zerfall unter Verwendung der MICP-Technologie, und die Probe zerfällt vollständig.



Appl. Sci. 2024, 14, 6343

12 von 20

Abbildung 11. Zerfallskurve mit einem Behandlungszyklus und unterschiedlichen Konzentrationen der Zementierungslösung. (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 und (d) 1,0.

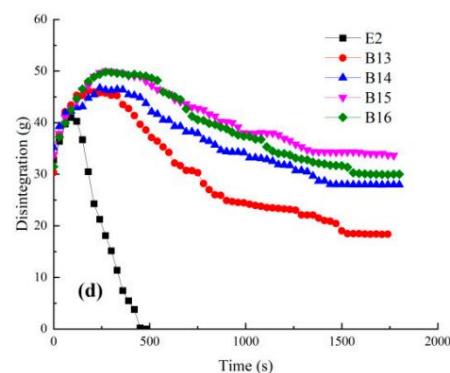
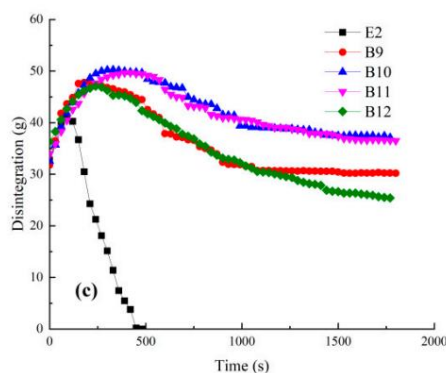
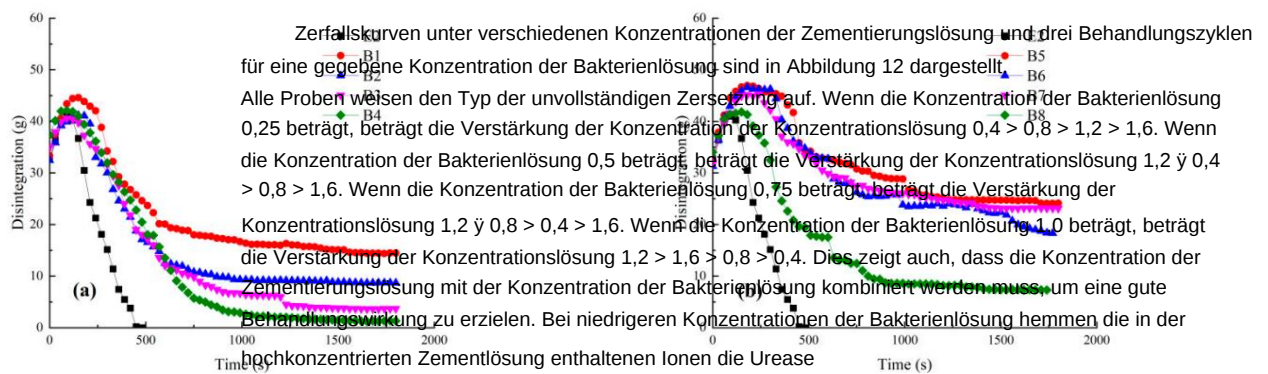


Abbildung 12. Zerfallskurve mit drei Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen der Bakterienlösung. (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 und (d) 1,0.

Nach fünf Zyklen der MICP-Behandlung entsteht eine große Menge an CaCO_3 -Kristallen. Die Zerfallskurven der Zementierungslösungskonzentration bei fünf und sieben Behandlungszyklen sind in den Abbildungen 13 bzw. 14 dargestellt. Wenn die Bakterienlösungskonzentration jedoch 0,25 beträgt, ist die Gesamtbindungswirkung schlecht, was sich deutlich von der Konzentration der Bakterienlösung über 0,5 unterscheidet.

Nach fünf Zyklen der MICP-Behandlung entsteht eine große Menge an CaCO₃-Kristallen. Die Zerfallskurven der Zementationslösungskonzentration mit fünf und sieben Behandlungszyklen sind in den Abbildungen 13 und 14 dargestellt. Wenn die Bakterienlösungskonzentration jedoch 0,25 beträgt, ist der Gesamtbindungseffekt schlecht, was deutlich anders ist als wenn die Bakterienlösungskonzentration größer als 0,5 ist. Daher Bei der Betrachtung der optimalen Konzentration der Instrumentierungslösung ist nur der Fall zu berücksichtigen, Die Bakterienlösungskonzentration $\gamma 0,5$ wird berücksichtigt. Die optimale Zementierungslösung Konzentrationen liegen bei einem Wert von 1,2, wenn die Bakterienlösungskonzentration $\gamma 0,5$ beträgt. Nach Bei der Behandlung lagert sich eine große Menge CaCO₃ an den umliegenden Partikeln an und füllt die Lücken in den Bodenpartikeln.

Appl. Sci. 2024, 14, 6343

Appl. Sci. 2024, 14, 6343

13 von 20

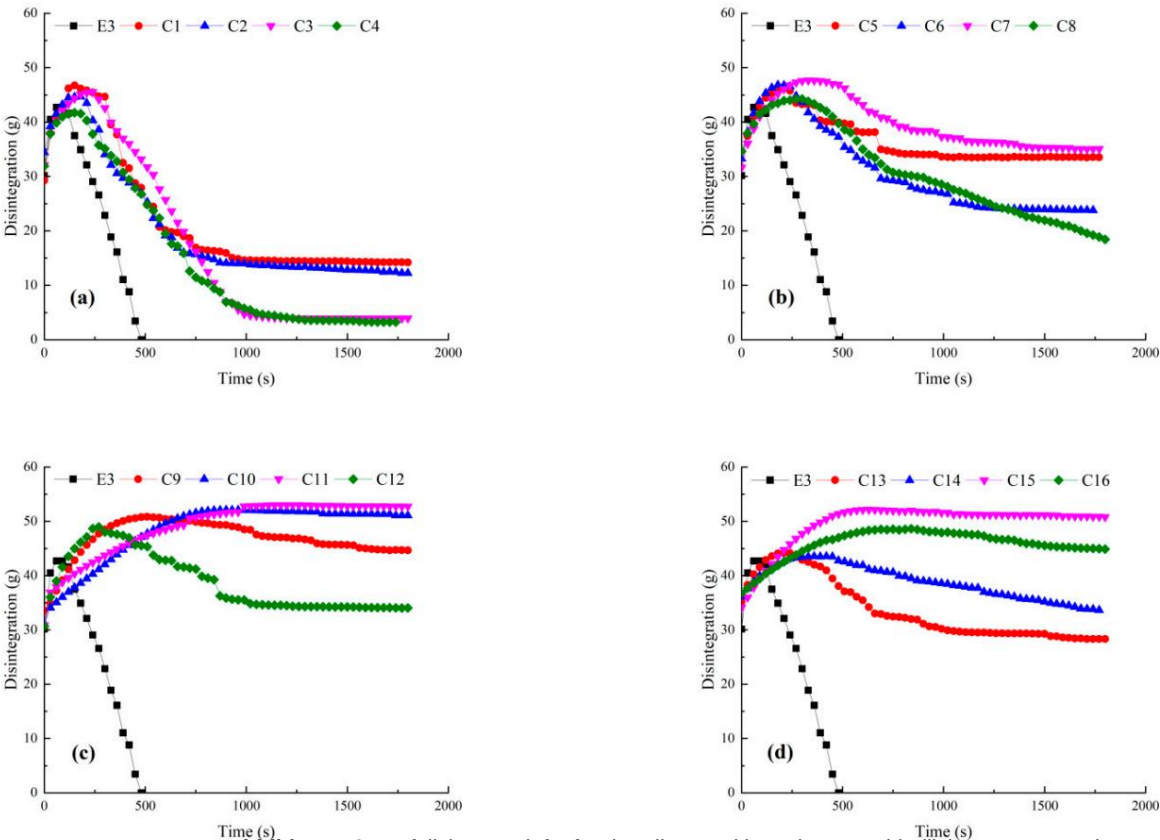


Abbildung 13. Zerfallskurve mit fünf Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen der Bakterienlösung: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 und (d) 1,0. Abbildung 13. Zerfallskurve mit fünf Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen der Bakterienlösung: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 und (d) 1,0.

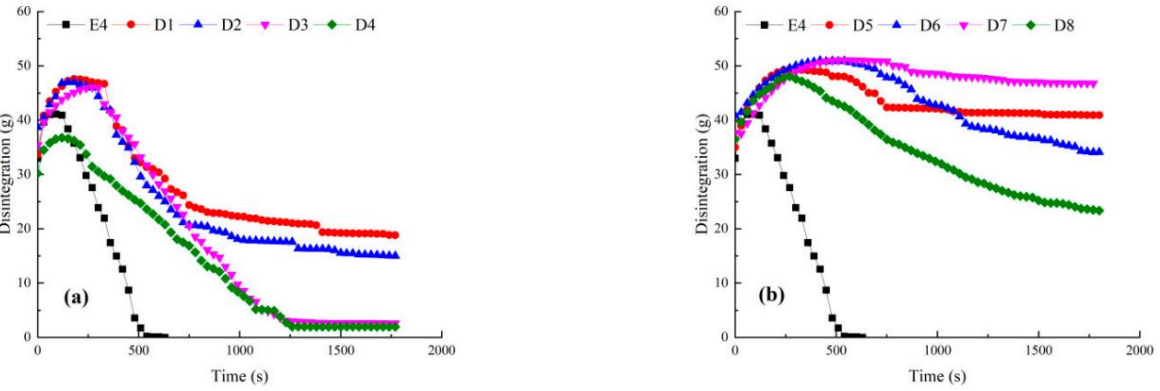


Abbildung 14. Fortsetzung

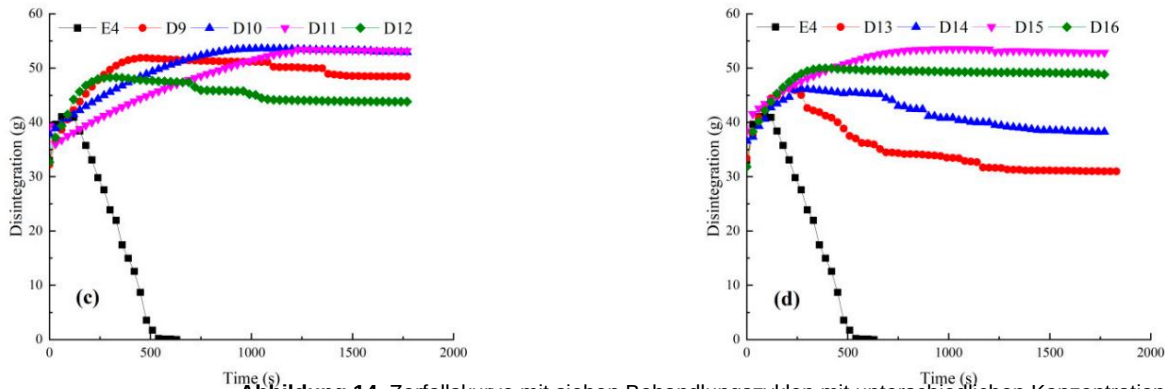


Abbildung 14. Zersetzungskurve mit sieben Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen der Bakterienlösung: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 und (d) 1,0.

Abbildung 14. Zersetzungskurve mit sieben Behandlungszyklen mit unterschiedlichen Konzentrationen der Bakterienlösung: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 und (d) 1,0.

trationen: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 und (d) 1,0.

4.4. Einfluss des Behandlungszyklus auf den Zerfall

4.4. Einfluss des Behandlungszyklus auf den Zerfall. Um die Wirkung des Behandlungszyklus auf den Zersetzungsprozess zu analysieren, werden die Zersetzungskurven von Bodenproben, die mit unterschiedlichen Konzentrationen der Bakterienlösung (BS) und der Konzentration der Zementierungslösung (CS) behandelt wurden, dargestellt. Die Zersetzungskurven von Bodenproben, die mit unterschiedlichen Konzentrationen der Bakterienlösung (BS) und der Konzentration der Zementierungslösung (CS) behandelt wurden, sind in Abbildung 15 dargestellt. Bei der gegebenen Konzentration der Bakterienlösung (BS) und der Konzentration der Zementierungslösung (CS) wird der Zerfallsgrad von 1 bis 5 und 7 Behandlungszyklen analysiert. In Abbildung 15, Serie A und Serie B entsprechen den Behandlungszyklen 1, 3, 5 und 7. Serie C und Serie D entsprechen den Behandlungszyklen 1, 3, 5 und 7 in Abbildung 15.

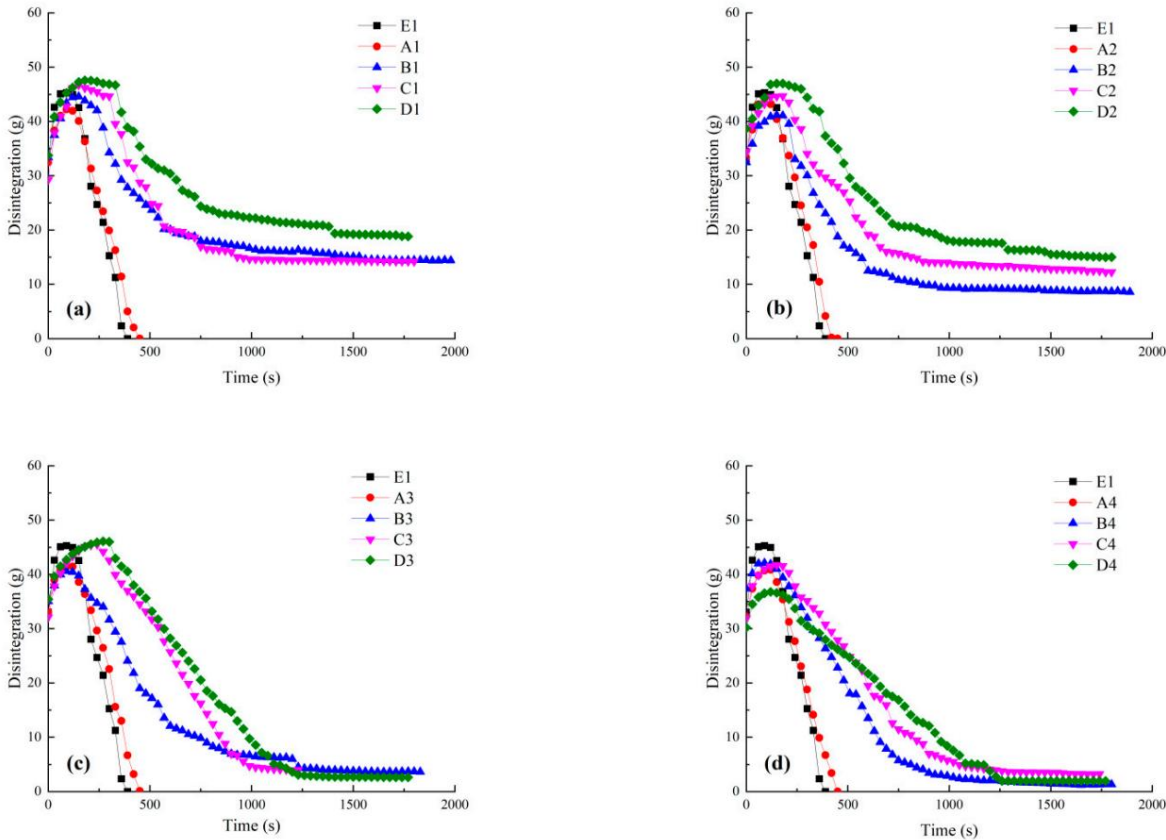


Abbildung 15. Fortsetzung

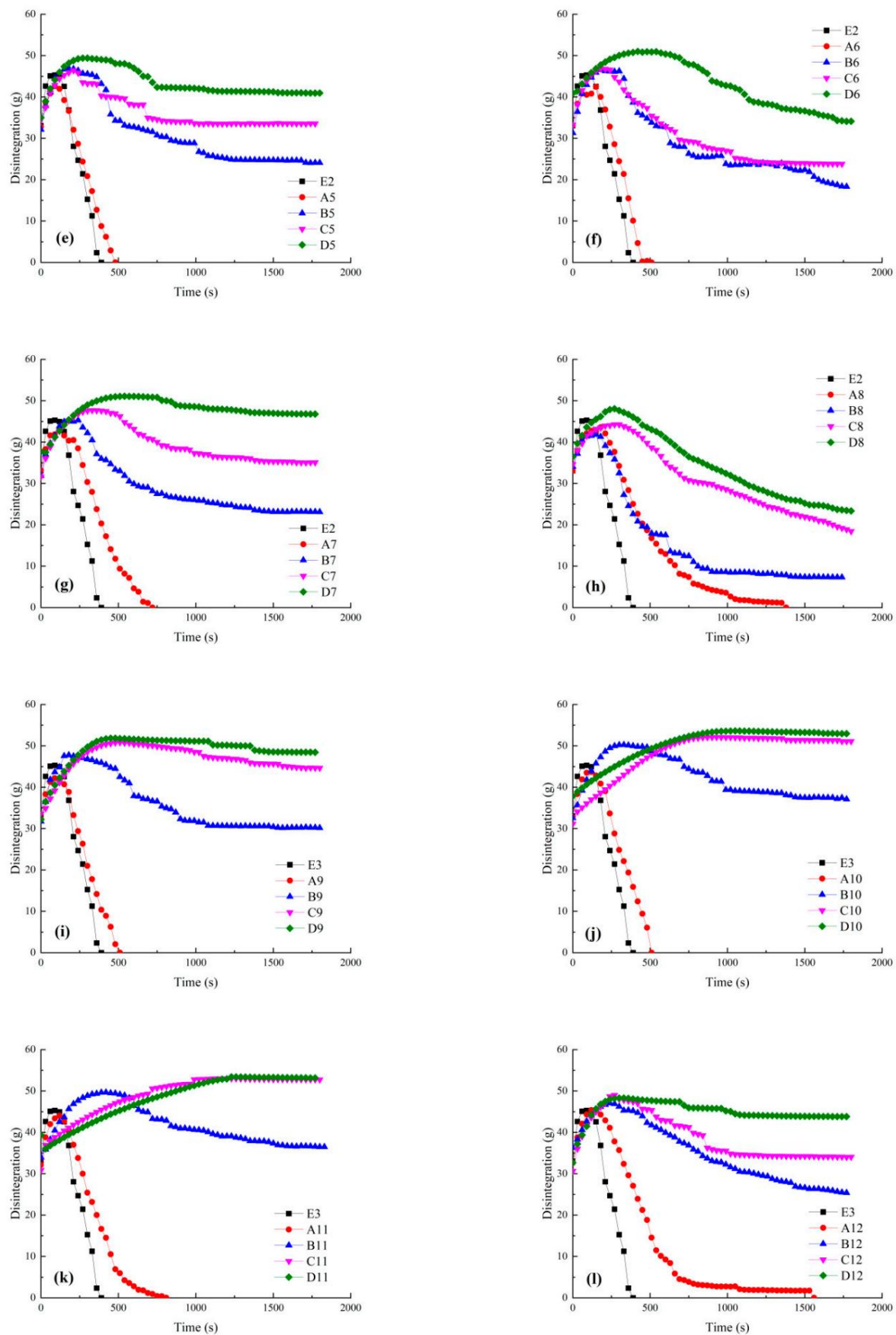
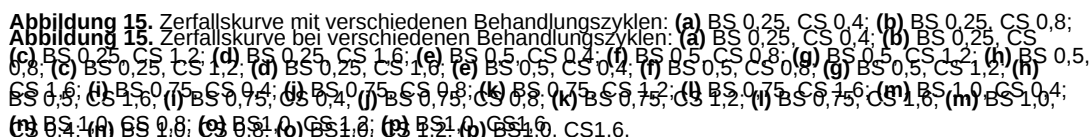


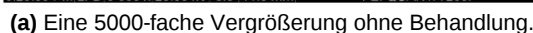
Abbildung 15. Fortsetzung



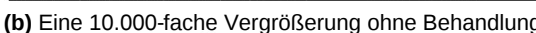
5. Mikrostruktur von Bodenproben

Die MIPF-Technologie erzeugt Kalziumkarbonat durch Bakterienstoffwechsel zwischen CO_2 und Bodenpartikeln. Durch die Bildung von Mikroporen durch Bakterien und die Wirkung von Bodenpartikeln, um die Bodenpartikel zu einem einheitlichen Bodengerüst zu verbinden, wird die Bodenstruktur verbessert. Die Bodenstruktur ist ein wichtiger Faktor für die Bodenfruchtbarkeit und die Bodenphysik. Durch die MIPF-Technologie kann die Bodenstruktur verbessert werden, indem die Bodenpartikel zu einem einheitlichen Bodengerüst verbunden werden. Dies führt zu einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und der Bodenphysik. Die MIPF-Technologie ist eine innovative Methode zur Verbesserung der Bodenstruktur und kann in der Landwirtschaft und im Gartenbau eingesetzt werden.

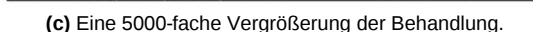
Abbildung 16 zeigt die SEM-Bilder der MGP-Behandlungsproben und unbehandelten Behandlungsproben. Es zeigt vergrößerte Bilder von den Proben bei 5000x und 10.000x. Die unbehandelten Proben sind relativ kleiner, vergleicht man sie mit weiteren Vergrößerungen. Die unbehandelten Radikeln haben andere Oberflächen der Radikel wie in Abbildung 15. In der Abbildung sieht man die Zeichen und keine Nachdem MGP Oberfläche auf der Oberfläche der Radikel eine glatte Struktur geschaffen wurde. Gefülltem CaCO₃. Nach dem MGP-Behandlung wird das Abbildung klarer, es dargestellt. Wenn mikroskopisch viel mikro-Replicates wird. Man sieht das CaCO₃ gesammelt die Bodenpartikel zusammen. Die Bodenpartikel werden zusammengehalten um die CO₂-Radikeln. Die Radikel unter die Wurzelscheitel wachsen. Das CO₂ von den CO₂-Bläsen und zusammen Radikel tragen und Partikel. Bodenstruktur stabil. Bodenwasserstabilität. Der Zustand wird durch umgebende CaCO₃-Ausfällungen deutlich unterdrückt. Der Zerfall wird durch umgebende



(a) Eine 5000-fache Vergrößerung ohne Behandlung.



(b) Eine 10.000-fache Vergrößerung ohne Behandlung



(c) Eine 5000-fache Vergrößerung der Behandlung.



(d) Eine 10.000-fache Vergrößerung der Behandlung.

Abbildung 16: SEM-Bilder der behandelten Probe und der unbehandelten Probe.

Nach der Zusammensetzung der Partikel zu untersuchen, die an der Oberfläche von Behandlungsproben. Bei der EDX-Analyse wurde eine Elementanalyse durchgeführt, die die Abbildung 17 zeigt. Es wurde festgestellt, dass O, C und Ca vorhanden sind und C etwa 13,18 % einnimmt, was eine reichliche Menge an Kohlenstoff darstellt. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Partikel nach der MICP-Behandlung in Proben nach MICP-Behandlung [22]. Das Bindemittel unter der Partikeloberfläche sind Ca^{2+} und CO_3^{2-} Ionen, die durch den MICP-Prozess auf der

und bildet die Bodenpartikel des Binzen. Die Bildungseffekte durch die Zementierungseffekt die Bodenpartikel Zersetzung.

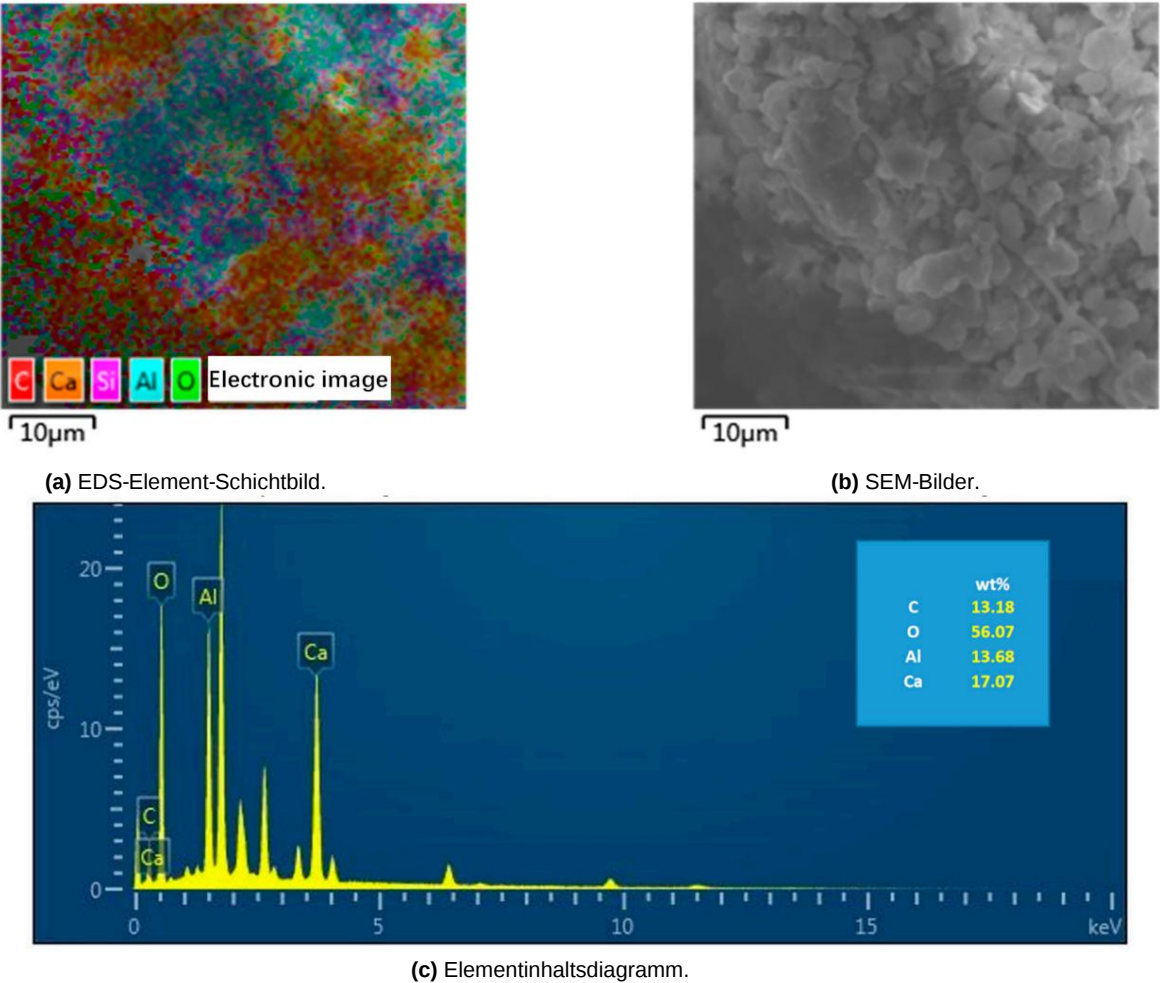


Abbildung 17. Diagramm der EDS-Energiespektumanalyse.

6. Schlussfolgerungen

Im dieser Studie wird eine neue Strategie der MICP-Technologie verwendet, um dem Zerfall zu widerstehen. Granitfelsen zur Erosionsprävention in Bergbau. Die Auswirkungen der Bakterienlösung, der Zementierungslösungskonzentration und des Behandlungszyklus auf den Zerfall werden wie folgt gezogen werden:

- Die MICP-Technologie ist eine wirksame Methode zur Behandlung von Granitfelsen. (1) Kalziumcarbonat (CaCO₃) wird von den Bodenpartikeln gebildet. Auf diese Weise kann eine Kruste auf der Oberfläche bilden, die den Zerfall des Felsens verhindert. Auf der (2) Die Konzentration der Bakterienlösung bei einem Wert von 0,75 und die Zementierungslösung Konzentration bei einem Wert von 2 sind optimal für den Widerstand gegen den Zerfall. Eine zu hohe Konzentration der Bakterienlösung und eine niedrige Bakterienlösung erzeugt, die die Konzentration der Bakterienlösung kann zur vorzeitigen Bildung einer dichten Schicht auf der Bodenoberfläche führen, was die Bildung von Bakterien und die Bildung von Calciumcarbonat hemmt. Eine zu hohe Konzentration der Zementierungslösung hemmt die Aktivität von Bakterien. (3) Aufgrund der Bildung einer ausreichend dicken Schutzschicht können fünf MICP-Zyklen Behandlung unterdrücken den Zerfall. Die Dicke der Verstärkungsschicht

Die durch ein oder drei Verstärkungszyklen erzeugte Schicht reicht nicht aus, um die Oberfläche vollständig zu umhüllen.

- (4) Weitere Forschungen werden durchgeführt, um die mechanische Stabilität und die Widerstandsfähigkeit gegen Erosion durch starke Regenfälle zu untersuchen. Die Langzeitbeständigkeit von zementiertem Granitrestboden muss ebenfalls berücksichtigt werden, um eine effektive Regulierung der Effizienz der Mineralisierungsreaktion zu erreichen.

Beiträge der Autoren: Konzeptualisierung, XL und WL; Schreiben – Vorbereitung des Originalentwurfs, XL; Untersuchung, YF; Datenkuratierung, CL; Schreiben – Überprüfung und Bearbeitung, WL. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und stimmen ihr zu.

Finanzierung: Diese Forschung wurde von der National Natural Science Foundation of China (Zuschuss-Nr. 41962015) und der Natural Foundation der Provinz Jiangxi (Zuschuss-Nr. 20161BAB203078) finanziert.

Erklärung des Institutional Review Board: Nicht zutreffend.

Einverständniserklärung: Nicht zutreffend.

Datenverfügbarkeitserklärung: Die in der Studie vorgestellten Originalbeiträge sind im Artikel enthalten, weitere Anfragen können an den entsprechenden Autor gerichtet werden.

Interessenkonflikte: Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Verweise

- Liu, W.; Song, X.; Huang, F. Experimentelle Studie über den Zerfall von Granitrestböden unter dem kombinierten Einfluss von Benetzungs-Trocknungs-Zyklen und saurem Regen. *Geomat. Nat. Hazards Risk* **2019**, *10*, 1912–1927. [\[CrossRef\]](#)
- Liu, X.; Qiu, J.; Zhang, D. Eigenschaften von Hangabfluss und Bodenwassergehalt im Benggang-Kolluvium unter simuliertem Niederschlag. *J. Soils Sediments* **2018**, *18*, 39–48. [\[CrossRef\]](#)
- Deng, Y.; Shen, X.; Xia, D. Bodenerosionsneigung und physikochemischen Eigenschaften einstürzender Gully-Schwemmfächer in Südchina. *Pedosphere* **2019**, *29*, 102–113. [\[CrossRef\]](#)
- Tang, Q.; Duan, X.; He, L. Variabilität und treibende Faktoren der bodengesättigten hydraulischen Leitfähigkeit entlang der horizontalen und vertikalen Richtung im oberen Einzugsgebiet des Benggang. *CATENA* **2023**, *222*, 106810. [\[CrossRef\]](#)
- Xu, J. Benggang-Erosion: Die Einflussfaktoren. *CATENA* **1996**, *27*, 249–263.
- Liang, Y.; Zhang, B.; Pan, X. Aktueller Status und umfassende Kontrollstrategien der Bodenerosion für hügelige Regionen im südlichen China. *Wissenschaft. Bodenwasserschutz* **2008**, *6*, 22–27.
- Wei, Y.; Liu, Z.; Wu, X. Kann Benggang als Gully-Erosion angesehen werden? *CATENA* **2021**, *207*, 105648. [\[CrossRef\]](#)
- Liang, Y.; Ning, D.; Pan, X. Merkmale und Management der Benggang-Erosion in der südlichen Roterde-Region. *Bodenwasserschutz. China* **2009**, *1*, 31–34.
- Liao, Y.; Zheng, M.; Li, D. Beziehung zwischen Benggang-Anzahl, Fläche und hypsometrischen Integralwerten bei verschiedenen Landformen Entwicklungsstadien. *Land Degrad. Dev.* **2020**, *31*, 2319–2328. [\[CrossRef\]](#)
- Liu, W.; Ouyang, G.; Luo, X. Feuchtigkeitsgehalt, Porenwasserdruck und Benetzungsfront in Granitrestböden während des Einsturzes Erosion mit unterschiedlichem Hangwinkel. *Geomorphology* **2020**, *362*, 107210. [\[CrossRef\]](#)
- Liu, W.; Cui, Y.; Ouyang, G. Eine experimentelle Studie über den Einfluss der Korngrößenzusammensetzung auf die Kollapserosion von Granit Restboden. *CATENA* **2023**, *223*, 106949. [\[CrossRef\]](#)
- Liao, Y.; Changyuan, T.; Zaijian, Y. Forschungsfortschritt zur Benggang-Erosion und ihren Präventionsmaßnahmen in der Roterde-Region Südchinas. *Acta Pedol. Sin.* **2018**, *55*, 1297–1312.
- Zhu, X.; Liang, Y.; Qu, L. Eigenschaften von Abfluss und Sedimentausbeute für zwei typische erodierbare Böden in Südchina. *Int. J. Sediment Res.* **2022**, *37*, 653–661. [\[CrossRef\]](#)
- Bullock, A.; King, B. Bewertung des chinesischen Hanglandumwandlungsprogramms als nachhaltiges Management in den Landkreisen Tianquan und Wuqi. *J. Environ. Manag.* **2011**, *92*, 1916–1922. [\[CrossRef\]](#)
- van Paassen Leon, A.; Ghose, R.; van der Linden Thomas, JM Quantifizierung der biovermittelten Bodenverbesserung durch Ureolyse: Groß angelegtes Biogrout-Experiment. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **2010**, *136*, 1721–1728. [\[CrossRef\]](#)
- Portugal, CRMe; Fonyo, C.; Machado, CC Mikrobiologisch induzierte Kalzitfällung Biozementierung, grüne Alternative für Straßen – Ist das der Durchbruch? Eine kritische Übersicht. *J. Clean. Prod.* **2020**, *262*, 121372. [\[CrossRef\]](#)
- Phillips, AJ; Gerlach, R.; Lauchnor, E. Technische Anwendungen der ureolytischen Biomineralisierung: Eine Übersicht. *Biofouling* **2013**, *29*, 715–733. [\[CrossRef\]](#)
- Tang, CS; Zhu, C.; Cheng, Q. Trockenrissbildung im Boden: Ein Überblick über Untersuchungsansätze, zugrundeliegende Mechanismen und Einflussfaktoren. *Earth-Sci. Rev.* **2021**, *216*, 103586. [\[CrossRef\]](#)
- Li, S.; Li, C.; Yao, D. Machbarkeit von mikrobiell induzierter Karbonatfällung und Strohschachbrettbarrieren auf die Wüstenbildung Kontrolle und ökologische Wiederherstellung. *Ecol. Eng.* **2020**, *152*, 105883. [\[CrossRef\]](#)

20. Liu, S.; Wang, R.; Yu, J. Wirksamkeit des Erosionsschutzes einer MICP-Beschichtung auf den Oberflächen antiker Tondachziegel. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *243*, 118202. [\[CrossRef\]](#) 21.
- Çanakçı, H.; Sidik, W.; Kiliç, İH Wirkung bakterieller Calciumcarbonatfällung auf Kompressibilität und Scherfestigkeit von organischem Boden. *Soils Found.* **2015**, *55*, 1211–1221. [\[CrossRef\]](#)
22. Cheng, YJ; Tang, CS; Pan, XH Anwendung mikrobiell induzierter Karbonatfällung zur Kontrolle der Oberflächenerosion von Löss. *Eng. Geol.* **2021**, *294*, 106387. [\[CrossRef\]](#)
23. Jiang, NJ; Tang, CS; Yin, LY Anwendbarkeit der mikrobiellen Kalzifizierungsmethode zur Kontrolle der Oberflächenerosion sandiger Hänge. *J. Mater. Zivil. Ing.* **2019**, *31*, 04019250. [\[CrossRef\]](#)
24. Lai, Y.; Yu, J.; Liu, S. Experimentelle Studie zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Eisenrückstandssand durch Verwendung von MICP bei niedrigem pH-Wert. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *273*, 121729. [\[CrossRef\]](#)
25. Meng, H.; Gao, Y.; He, J. Mikrobiell induzierte Karbonatfällung zur Winderosionskontrolle von Wüstenböden: Feldversuche. *Geoderma* **2021**, *383*, 114723. [\[CrossRef\]](#)
26. Wang, L.; Ren, Z.; Wang, H. Mikrostruktur-Eigenschaftsbeziehungen in Zementmörtel mit Oberflächenbehandlung von mikrobiell induzierten Karbonatfällung. *Compos. Part B Eng.* **2022**, *239*, 109986. [\[CrossRef\]](#)
27. Cheng, L.; Cord-Ruwisch, R.; Shahin, MA Zementierung von Sandböden durch mikrobiell induzierte Kalzitfällung bei verschiedenen Sättigungsgrade. *Can. Geotech. J.* **2013**, *50*, 81–90. [\[CrossRef\]](#)
28. Zhao, Q.; Li, L.; Li, C. Faktoren, die die Verbesserung der technischen Eigenschaften von MICP-behandeltem Boden beeinflussen, katalysiert durch Bakterien und Urease. *J. Mater. Civ. Eng.* **2014**, *26*, 04014094. [\[CrossRef\]](#)
29. Tang, CS; Yin, LY; Jiang, NJ Faktoren, die die Leistung von mit mikrobiell induzierter Karbonatfällung (MICP) behandeltem Boden beeinflussen: Eine Übersicht. *Environ. Earth Sci.* **2020**, *79*, 94. [\[CrossRef\]](#)
30. Choi, SG; Chang, I.; Lee, M. Übersicht über die geotechnischen Eigenschaften von Sanden, die mit mikrobiell induziertem Calciumcarbonat behandelt wurden. *Karbonatfällung (MICP) und Biopolymere. Constr. Build. Mater.* **2020**, *246*, 118415. [\[CrossRef\]](#)
31. Fajardo, M.; McBratney, AB; Field, DJ Bodentroknungsbewertung mittels Bilderkennung. *Soil Tillage Res.* **2016**, *163*, 119–129. [\[Querverweis\]](#)
32. Ze, Z.; Vadim, P.; Svetlana, N. Zerfallseigenschaften eines kryolithogenen Tonlehms mit unterschiedlichem Wassergehalt: Moskau Decklehm (prQIII), Fallstudie. *Eng. Geol.* **2019**, *258*, 105159. [\[CrossRef\]](#)
33. Kasmerchak, CS; Mason, JA; Liang, M. Laserbeugungsanalyse der Aggregatstabilität und des Zerfalls in Wald und Grünland Böden im Norden von Minnesota, USA. *Geoderma* **2019**, *338*, 430–444. [\[CrossRef\]](#)
34. Liu, X.; Zhang, X.; Kong, L. Zerfall von Granitrestböden bei unterschiedlich starker Verwitterung. *Eng. Geol.* **2022**, *305*, 106723. [\[CrossRef\]](#)
35. Sun, Y.; Liu, Q.; Xu, HS Einflüsse verschiedener Modifikatoren auf die Zersetzung von verbessertem Granitrestboden unter nassen und Trockenzyklen. *Int. J. Min. Sci. Technol.* **2022**, *32*, 831–845. [\[CrossRef\]](#)
36. Zhang, S.; Tang, HM Experimentelle Untersuchung des Zerfallsmechanismus für ungesättigten Granitrestboden. *Rock Soil Mech.* **2013**, *34*, 1668–1674.
37. Meyer, F.; Bang, S.; Min, S.; Stetler, L.; Bang, S. Mikrobiologisch induzierte Bodenstabilisierung: Anwendung von *Sporosarcina pasturii* zur Kontrolle flüchtiger Staubpartikel. In *Geo-Frontiers 2011: Fortschritte in der Geotechnik*; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2011; S. 4002–4011.
38. Wang, R.; Tang, CS; Pan, X.; Shen, Z.; Liu, Y.; Lu, X. Ein biotechnologischer Ansatz zur Entfernung von Schwebstoffen in Biogasschlamm durch mikrobiell induzierte Kalzitfällung (MICP). *J. Clean. Prod.* **2024**, *459*, 142537. [\[CrossRef\]](#)
39. Katebi, H.; Fahmi, A.; Ouria, A.; Babaeian Amini, A.; Kafil, HS Mikrobielle Oberflächenbehandlung von Sand mit *Sporosarcina pasturii* zur Verbesserung der Winderosionsresistenz im Urmia-See. *Appl. Umwelt. Bodenkunde.* **2021**, *8893115*. [\[CrossRef\]](#)
40. Bruce Donald, A. Glossar der Fugenterminologie. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **2005**, *131*, 1534–1542. [\[CrossRef\]](#)

Haftungsausschluss/Anmerkung des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die der einzelnen Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder den Herausgebern. MDPI und/oder die Herausgeber lehnen jegliche Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die aus den im Inhalt erwähnten Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten resultieren.