

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Department Ökotoxikologie

Bachelorarbeit

Mit Steinen gegen die Klimakrise?
Eine Analyse der Auswirkungen von Enhanced Rock Weathering auf die
Bodenqualität und das CO₂ Reduktionspotential.

Vorgelegt von

Sarah Klingenberg

am 11.07.2024

1. Gutachterin: Prof. Dr. Knappe (HAW Hamburg)
2. Gutachterin: Adeline Schreiner (atmosfair gGmbH)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Abstract	1
Zusammenfassung.....	1
1 Einleitung.....	2
2 Theoretischer Hintergrund.....	4
2.1 Einführung in (Enhanced) Rock Weathering	4
2.1.1 Überblick über Gestein mit Verwitterungspotential	5
2.2 Chemische Prozesse der Verwitterung im Detail	9
2.3 Vergleich und Abgrenzung zu anderen CDR-Methoden.....	11
3 Methodik.....	15
3.1 Unsystematische Literaturrecherche.....	15
3.2 Expert:innen-Interviews	16
4 Resultate.....	18
4.1 Auswirkungen auf die Umwelt durch ERW	18
4.1.1 Wechselwirkung von Gesteinen und der Natur	20
4.2 Einflussfaktoren auf das CO ₂ -Sequestrierungspotential von ERW	25
4.2.1 Gesteinsspezifische Faktoren und ihre Rolle bei der CO ₂ - Sequestration	27
4.2.2 Einfluss von Kulturpflanzen auf die CO ₂ -Sequestration.....	31
4.2.3 Einfluss des Klimas auf das CO ₂ -Sequestrationspotential	32
4.2.4 Messmethoden von CO ₂ -Sequestrierung bei ERW	33
4.2.4.1 Unsicherheiten und Herausforderungen bei CDR-Schätzungen	35
5 Diskussion.....	38
5.1 Interpretation und Bewertung der Ergebnisse.....	38
5.2 Implikationen für die Praxis und Politik.....	42
6 Fazit	45
Literaturverzeichnis.....	46
Eidesstattliche Erklärung.....	52
Anhang 1	53
Anhang 2	60
Anhang 3	66
Anhang 4	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Bowen'sche Reaktionsreihe (Okrusch & Frimmel, 2022).....	7
Abbildung 2 Veränderung der KAK (Beerling et al., 2024)	21
Abbildung 3 Zusammengefasste Auswirkungen von Silikatgesteinspulvern auf Ertrag, Nährstoffversorgung und Bodeneigenschaften nach Swoboda et al.	24
Abbildung 4 Standorte des Ausgangsgesteins nach (Moosdorf et al., 2014).....	25
Abbildung 5 Verfügbares CO ₂ für die Sequestrierung in den Anwendungsgebieten. Die Emissionen durch den Transport sind zum Vergleich dargestellt. (Moosdorf et al., 2014).....	26
Abbildung 6 ERW senkt das atmosphärische CO ₂ im Zuge des prognostizierten Klimawandel des 21. Jahrhunderts (Taylor et al., 2016).....	29

Abstract

This bachelor thesis investigates the application of Enhanced Rock Weathering as a method to combat the climate crisis, by analysing its impact on soil quality and its CO₂ reduction potential. The aim of this thesis is to evaluate the potential of ERW to both sequester CO₂ from the atmosphere and improve soil fertility through the weathering of silicate rocks. Through extensive literature research and expert interviews, the interactions of ERW with natural systems such as soils, climate and crops were analysed, both in terms of their impact on the environment and on CO₂ sequestration. In addition, various measurement methods for quantifying the sequestered CO₂ were analysed and evaluated. The results show that ERW can not only sequester significant amounts of CO₂, but also has positive effects on soil quality, such as increasing pH and improving nutrient availability. This work provides valuable insights for the practical application of ERW as a sustainable agricultural practice and climate mitigation technology. The data obtained emphasises the potential of ERW to contribute to the reduction of atmospheric CO₂ concentrations and the improvement of agricultural soils.

Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wird die Anwendung von Enhanced Rock Weathering als eine Methode zur Bekämpfung der Klimakrise, insbesondere durch die Analyse ihrer Auswirkungen auf die Bodenqualität und das CO₂-Reduktionspotential, untersucht. Ziel der Arbeit ist es, das Potenzial von ERW zu bewerten, durch die Verwitterung von Silikatgesteinen sowohl CO₂ aus der Atmosphäre zu binden als auch die Bodenfruchtbarkeit zu verbessern. Durch eine umfangreiche Literaturrecherche und Expert:innen-Interviews wurden die Wechselwirkungen von ERW mit natürlichen Systemen wie Böden, Klima und Kulturpflanzen analysiert, sowohl in Bezug auf die Einflüsse auf die Umwelt als auch auf die CO₂-Sequestrierung. Zudem wurden verschiedene Messmethoden zur Quantifizierung des sequestrierten CO₂ untersucht und bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass ERW nicht nur signifikante Mengen an CO₂ sequestrieren kann, sondern auch positive Effekte auf die Bodenqualität hat, wie die Erhöhung des pH-Werts und die Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit. Diese Arbeit liefert wertvolle Erkenntnisse für die praktische Anwendung von ERW als nachhaltige landwirtschaftliche Praxis und klimawirksame Technologie. Die gewonnenen Daten unterstreichen das Potential von ERW, einen Beitrag zur Reduktion der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen und zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Böden zu leisten.

1 Einleitung

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit, verursacht durch den Anstieg von Treibhausgasemissionen wie CO₂. Diese Emissionen führen zu einer zunehmenden globalen Erwärmung und haben weitreichende Auswirkungen auf Ökosysteme, Wirtschaftssysteme und menschliche Gemeinschaften weltweit. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hat wiederholt betont, dass dringende Maßnahmen erforderlich sind, um die globale Erwärmung auf weniger als 2°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen (IPCC AR6 WGIII: CDR Factsheet, 2022). Internationale Abkommen, wie das Pariser Abkommen, setzen Ziele für die Reduktion von CO₂-Emissionen und die Umstellung auf nachhaltige Energiesysteme (Smith et al., 2023).

Um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen, sind nicht nur Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen erforderlich, sondern auch Technologien zur Entfernung von bereits vorhandenem CO₂ aus der Atmosphäre (Smith et al., 2023). Diese Technologien, bekannt als Carbon Dioxide Removal (CDR) spielen eine wesentliche Rolle im globalen Klimaschutzportfolio. Sie bieten die Möglichkeit CO₂ direkt aus der Atmosphäre zu entfernen und somit zur Stabilisierung des Klimas beizutragen. Zu den bedeutendsten CDR-Technologien gehören Bioenergie mit Carbon Capture and Storage (BECCS), Direct Air Capture (DAC) und Enhanced Rock Weathering (ERW) (Smith et al., 2023).

ERW ist eine vielversprechende Methode zur CO₂-Sequestrierung, also der dauerhaften Bindung von CO₂ in festen Materialien, die auf natürlichen Verwitterungsprozessen basiert, aber durch gezielte Maßnahmen beschleunigt wird (Beerling et al., 2020). ERW umfasst das Ausbringen von fein gemahlenem Gestein auf landwirtschaftliche oder andere Flächen. In diesen Umgebungen reagiert das Gestein mit CO₂ aus der Atmosphäre und bindet dieses dauerhaft in Form von Bikarbonaten. Im Vergleich zu anderen CDR-Methoden bietet ERW potenzielle Vorteile wie geringe Landnutzungskonkurrenz und vergleichsweise niedrige Kosten für die Implementierung und Skalierung.

Die Forschung zu ERW ist von entscheidender Bedeutung, da diese Technologie das Potential hat erhebliche Mengen CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen und gleichzeitig die Bodenqualität zu verbessern. Um die Effizienz von ERW zu maximieren und die Bedingungen für eine breite Anwendung zu optimieren, sind weitere Forschungsanstrengungen erforderlich. Insbesondere gilt es, die spezifischen Faktoren zu identifizieren, die die Effizienz von ERW negativ beeinflussen, und entsprechende Lösungsansätze zu entwickeln.

Bisherige Forschungsarbeiten haben wichtige Erkenntnisse über die Funktionsweise und potentiellen Vorteile von ERW geliefert. Dennoch bestehen bedeutende Lücken in der Literatur,

insbesondere hinsichtlich der Skalierung von ERW und der langfristigen Auswirkungen auf die Bodenqualität und Ökosysteme, sowie der Messmethoden des sequestrierten CO₂s. Diese Arbeit zielt darauf ab, diese Lücken zu identifizieren und durch neue Erkenntnisse zur Weiterentwicklung der ERW-Implementierung beizutragen.

Diese Arbeit widmet sich zwei zentralen Forschungsfragen:

1. Wie beeinflusst ERW die Bodenqualität von landwirtschaftlichen Flächen?
2. Welche Faktoren beeinflussen die Effizienz von ERW als Methode zur CO₂-Sequestrierung und wie können diese optimiert werden?

Diese Fragen sollen nicht nur theoretische Diskussionen anregen, sondern auch konkrete Handlungsansätze für die erfolgreiche Implementierung und Skalierung von ERW aufzeigen.

Die vorliegende Bachelorarbeit ist in mehrere Hauptkapitel gegliedert. Der theoretische Hintergrund beginnt mit einer Einführung in Enhanced Rock Weathering, gefolgt von einem Überblick über Gesteine mit Verwitterungspotenzial und einer detaillierten Darstellung der chemischen Prozesse der Verwitterung. Ein Vergleich und die Abgrenzung zu anderen Methoden der CO₂-Entfernung schließen dieses Kapitel ab. Im Methodik-Abschnitt wird die durchgeführte Literaturrecherche sowie Interviews mit Expert:innen zur Schaffung der Datengrundlage für die Analyse beschrieben. Im Kapitel Resultate werden die Auswirkungen von ERW auf die Umwelt untersucht und die Interaktionen zwischen Gesteinen und natürlichen Systemen beschrieben. Zusätzlich werden Faktoren diskutiert, die das CO₂-Reduktionspotential von ERW beeinflussen, wie gesteinspezifische Eigenschaften, der Einfluss von Kulturpflanzen und klimatische Bedingungen. Verschiedene Messmethoden zur CO₂-Sequestrierung bei ERW in Böden, Flüssigkeiten und Gasen sowie die damit verbundenen Unsicherheiten und Herausforderungen werden ebenfalls behandelt. Die Diskussion umfasst die Interpretation und Bewertung der Ergebnisse sowie die Erörterung der Implikationen für die Praxis und Politik, um konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Im Fazit werden die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsbedarfe gegeben.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Einführung in (Enhanced) Rock Weathering

Die Gesteinsverwitterung ist ein natürlicher Prozess, der über Zeiträume von Hunderttausenden bis Millionen von Jahren schrittweise Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus der Atmosphäre entfernt. Als Teil der natürlichen Mechanismen zur Kohlenstoffentfernung hat die Gesteinsverwitterung die Temperatur der Erde im Laufe der Erdgeschichte in den letzten 4,6 Milliarden Jahren reguliert und die Bewohnbarkeit des Planeten aufrechterhalten (Beerling et al., 2020).

Dieser Prozess der Verwitterung beinhaltet das Aufbrechen von Gestein durch verschiedene Faktoren wie Wasser, Eis, Säuren, Salze, Pflanzen, Tiere und Temperaturänderungen (Price, 1995). Es gibt zwei Hauptarten der Verwitterung: Die mechanische und die chemische Verwitterung. Bei der mechanischen Verwitterung wird das Gestein durch physische Kräfte, wie z.B. durch das Eindringen und Gefrieren von Wasser aufgebrochen. Bei der chemischen Verwitterung werden die chemischen Verbindungen in den Gesteinen durch Reaktionen mit Wasser und anderen Stoffen in der Umgebung verändert. Biologische Verwitterung ist eine Form der Verwitterung, mechanisch oder chemisch, die durch Pflanzen, Pilze oder andere lebende Organismen beeinflusst wird (Price, 1995).

Die Verwitterung liefert außerdem Nährstoffe und Ionen aus dem Gestein, die das Leben an Land und in den Ozeanen ermöglichen. Durch diese Prozesse trägt die Gesteinsverwitterung zur Aufrechterhaltung des Lebens auf unserem Planeten bei und spielt eine entscheidende Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf (Beerling et al., 2020).

Enhanced Rock Weathering ist ein Prozess, der darauf abzielt, die natürliche Verwitterungsrate zu beschleunigen, indem fein zermahlene Gesteine, die die nötigen Mineralien enthält, wie zum Beispiel Basalt, auf Oberflächen ausgebracht wird. Dieser Prozess kann zur Kohlenstoffdioxidbindung beitragen und stellt somit eine unterstützende Methode zur Bekämpfung der Klimakrise dar. Darüber hinaus kann ERW unter anderem zur Remineralisierung der Böden beitragen, was die Bodenqualität verbessern, sowie die Ernteerträge steigern kann (Beerling et al., 2020).

ERW fördert die chemischen Reaktionen zwischen Gesteinen, Wasser und Luft. Durch die chemischen Reaktionen, die durch die Verwitterung ausgelöst werden, kann CO₂ für Zehntausende von Jahren aus der Atmosphäre entfernt werden (Beerling et al., 2020). Mineralien, wie zum Beispiel Magnesium, reagieren mit Wasser und CO₂ zu Karbonat-Ionen und Bikarbonaten.

Um zu verhindern, dass die Bikarbonate mit Säuren im Boden reagieren und so Kohlenstoffdioxid wieder freisetzen, ist es für die dauerhafte Kohlenstoffdioxidbindung wichtig, dass die Bikarbonate über das Grundwasser in Flüsse und Meere transportiert werden (Marklein et al., 2022).

ERW stellt somit einen chemischen Ansatz zur Bindung von Kohlenstoffdioxid dar, der auf land- oder ozeanbasierten Prozessen beruht. Die natürliche Gesteinsverwitterung, also der schrittweise Zerfall von Gestein in der Natur bindet derzeit weltweit etwa 0,87 Gigatonnen CO₂ pro Jahr, was etwa 3 % der jährlichen anthropogenen Kohlendioxidemissionen entspricht (Beerling et al., 2020). Durch die Anwendung von ERW könnte diese Menge potenziell auf 0,5-4 Gigatonnen erhöht werden, was je nach Pfad zur Reduzierung der Emissionen einen erheblichen Teil des globalen Bedarfs an Kohlenstoffdioxidentfernung bis zum Jahr 2050 ausmachen könnte (Beerling et al., 2020; Eufrazio et al., 2022).

2.1.1 Überblick über Gestein mit Verwitterungspotential

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die verschiedenen Gesteinsgruppen und Mineralien gegeben. Dieser ist relevant, um die Eignung und das Potential unterschiedlicher Gesteine für ERW zu verstehen. Zunächst werden die allgemeinen Eigenschaften und Klassifikationen der Hauptgesteinsgruppen, die magmatischen, metamorphen und sedimentären Gesteine, vorgestellt. Darauf folgt die Erläuterung der Bowen'schen Reaktionsreihe, um zu zeigen, wie die Abfolge der Mineralbildung bei der Kristallisation von Magmen, die mineralogische Zusammensetzung von Gesteinen bestimmt und somit ihre Eignung für ERW beeinflusst. Schließlich wird auf jene Gesteine und Minerale eingegangen, die besonders relevant für ERW sind.

Die Lithosphäre, die äußere feste Hülle oder Kruste der Erde, ist von entscheidender Bedeutung für die geologischen Prozesse und die Zusammensetzung unseres Planeten (Mostafa, 2024). Sie besteht hauptsächlich aus magmatischem und metamorphem Gestein, wobei ihre chemische Zusammensetzung zwischen intermediär und felsisch variiert. Etwa 95 % der Lithosphäre bestehen aus diesen Gesteinstypen, während die restlichen 5 % hauptsächlich aus Sedimentgestein, insbesondere aus Tonstein, bestehen (Mostafa, 2024).

Die Kruste der Erde, sei es kontinental oder ozeanisch, zeigt charakteristische Merkmale: Sie ist der äußerste feste Teil der Erde, typischerweise zwischen 8 und 40 km dick und von natürlicher Sprödigkeit. Hauptbestandteile der Erdkruste sind Siliziumdioxid (Si) und Aluminium (Al), weshalb sie oft als SIAL bezeichnet wird. Diese Eigenschaften der Lithosphäre und ihrer Kruste beeinflussen

maßgeblich die geologischen Prozesse und die Verteilung der Gesteinstypen auf der Erdoberfläche (Mostafa, 2024).

Magmatische Gesteine entstehen durch die Abkühlung und Verfestigung von Magma, das unter der Erdoberfläche oder im Erdmantel entsteht (Harley & Gilkes, 2000). Diese Gesteine, wie Granit und Basalt, werden basierend auf ihrer mineralogischen Zusammensetzung und Struktur klassifiziert. Magmatische Minerale sind die einzelnen Kristalle, aus denen magmatische Gesteine bestehen. Sie bilden sich durch die Kristallisation des Magmas während der Abkühlung und weisen spezifische chemische Zusammensetzungen und Kristallstrukturen auf, wie beispielsweise Quarz, Feldspat und Olivin. Diese Minerale sind die grundlegenden Bausteine der Gesteine und können einzeln identifiziert werden, während Gesteine die aggregierten Gesteinskörper sind, die aus einer Vielzahl von Mineralen bestehen und deren Gesamtkomposition ihre physikalischen Eigenschaften und ihr Verhalten in geologischen Prozessen bestimmt (Harley & Gilkes, 2000).

Sedimentgesteine entstehen durch die Ablagerung und Verfestigung von Sedimenten, die durch Verwitterung und Transport von bereits existierenden Gesteinen entstehen (Harley & Gilkes, 2000). Diese Gesteine wie Kalkstein und Sandstein werden basierend auf ihrer Entstehung und den darin enthaltenen Sedimenten klassifiziert. Sedimentäre Minerale sind die individuellen Mineralien oder Kristalle, aus denen sedimentäre Gesteine bestehen. Sie bilden sich durch die Ablagerung und Verfestigung von Sedimenten und weisen spezifische chemische Zusammensetzungen und Kristallstrukturen auf, wie beispielsweise Quarz, Calcit und Feldspat. Diese Minerale sind die fundamentalen Bausteine der sedimentären Gesteine und können einzelnen Schichten zugeordnet werden, während sedimentäre Gesteine die aggregierten Gesteinskörper sind, die aus einer Vielzahl von Sedimenten und mineralischen Bestandteilen bestehen. Die Zusammensetzung der Gesteine beeinflusst ihre physikalischen Eigenschaften und ihr Verhalten in geologischen Prozessen, wie zum Beispiel in der Diagenese, also der Umwandlung von Sedimenten in feste Gesteine (Harley & Gilkes, 2000).

Metamorphe Gesteine entstehen durch die Umwandlung bereits vorhandener Gesteine (sei es magmatisch, sedimentär oder bereits metamorph) unter hohen Temperaturen und Druck, was zu physikalischen und chemischen Veränderungen führt (Harley & Gilkes, 2000). Diese Gesteine wie Schiefer und Gneis werden basierend auf ihren mineralogischen und strukturellen Eigenschaften klassifiziert. Metamorphe Minerale sind die individuellen Kristalle oder Mineralien, aus denen metamorphe Gesteine bestehen. Sie entstehen durch die Neukristallisation von bereits vorhandenen Mineralen unter den extremen Bedingungen der metamorphen Prozesse und weisen

spezifische chemische Zusammensetzungen und Kristallstrukturen auf, wie beispielsweise Quarz, Glimmer und Amphibol. Diese Minerale sind die grundlegenden Bausteine der metamorphen Gesteine und können je nach Metamorphosegrad und Mineralneubildung variieren. Metamorphe Gesteine sind komplexe Gesteinskörper, die durch unterschiedliche Grade der Umwandlung von Ausgangsgesteinen entstehen und deren Zusammensetzung ihre physikalischen Eigenschaften und ihr Verhalten in geologischen Prozessen wie der Metamorphose und der Tektonik beeinflussen (Harley & Gilkes, 2000).

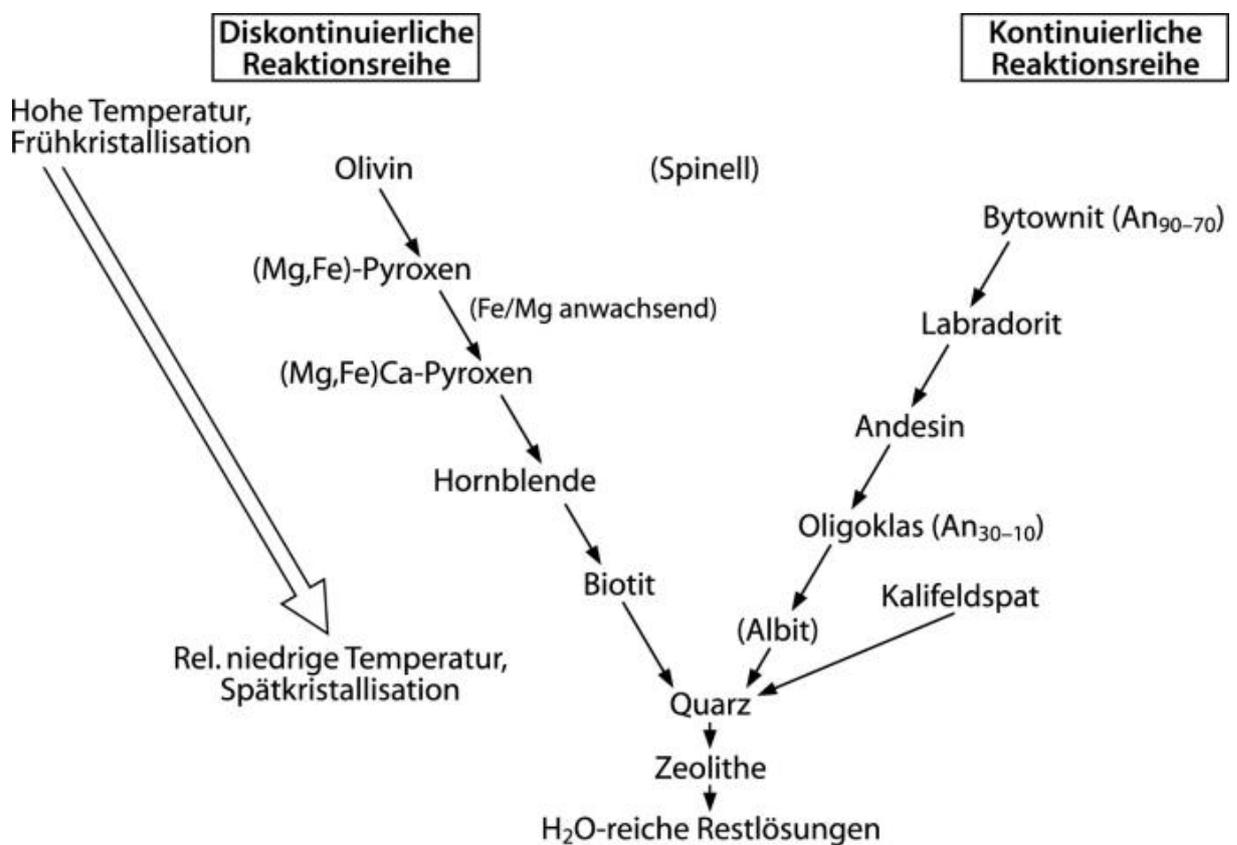


Abbildung 1 Bowen'sche Reaktionsreihe (Okrusch & Frimmel, 2022)

Wie in Abbildung 1 dargestellt, zeigt die Bowen'sche Reaktionsreihe die Abfolge der Mineralbildung während der Abkühlung von Magma und ist in zwei Hauptzweige unterteilt: Die diskontinuierliche und die kontinuierliche Reihe (Mostafa, 2024). In der diskontinuierlichen Reihe kristallisieren verschiedene Minerale bei unterschiedlichen Temperaturen und werden bei weiterer Abkühlung durch andere Minerale ersetzt. Die Minerale in dieser Reihe haben unterschiedliche Kristallstrukturen und chemische Zusammensetzungen. In der kontinuierlichen Reihe kristallisiert nur eine Mineralgruppe, die Plagioklas-Feldspäte, die eine Serie von festen Lösungen bilden. Hier

ändert sich die chemische Zusammensetzung kontinuierlich mit der Temperatur, während die Kristallstruktur weitgehend konstant bleibt. Am Ende der Abkühlung, wenn die Temperaturen weiter sinken, kristallisieren die verbleibenden Minerale aus dem Restmagma (Mostafa, 2024). Die Bowen'sche Reaktionsreihe zeigt also nicht nur die Reihenfolge der Kristallisation von Mineralen aus Magma, sondern auch ihre relative Verwitterungsanfälligkeit. Wie in der Abbildung 1 zu erkennen ist, haben Minerale, die bei höheren Temperaturen kristallisieren, einen höheren Anteil an Eisen und Magnesium und werden daher als mafisch bezeichnet. Aufgrund ihrer Zusammensetzung verwittern diese tendenziell schneller als jene, die bei niedrigeren Temperaturen kristallisieren.

Nach der Betrachtung von Gesteinen, Mineralen und der Bowen'schen Reaktionsreihe wird klar, dass Minerale mit passenden Zusammensetzungen für ERW eine wesentlich wichtigere Rolle spielen als die Gesteinsgruppen selbst. Dies liegt daran, dass die Mineralzusammensetzung die Geschwindigkeit der Verwitterung maßgeblich beeinflusst. Auf dieser Grundlage lässt sich die Eignung verschiedener Gesteine für ERW analysieren.

Magmatische Gesteine können von großem Interesse für ERW sein. Ihre Eignung hängt dabei aber stark von ihrer mineralogischen Zusammensetzung ab (Harley & Gilkes, 2000). Wie in der Abbildung 1 zu sehen ist, besteht Granit beispielsweise hauptsächlich aus Quarz, Feldspat und Glimmer. Aufgrund dieser Zusammensetzung verwittert Granit langsamer und bindet weniger CO_2 als Basalt. Basalt ist im Gegensatz dazu aufgrund seiner mineralogischen Zusammensetzung besonders gut für ERW geeignet. Basalt enthält häufig Pyroxene, die durch chemische Reaktionen mit CO_2 zu Magnesiumkarbonat und Silikaten verwittert, wodurch CO_2 dauerhaft gebunden wird (Harley & Gilkes, 2000).

Sedimentgesteine spielen ebenfalls eine bedeutende Rolle für ERW. Kalkstein ist dabei besonders hervorzuheben, da er durch seine chemische Reaktion mit CO_2 zu Calciumkarbonat (Kalk) und somit zur CO_2 -Bindung führt. Das dominierende Mineral im Kalkstein ist Calcit (CaCO_3).

Im Vergleich dazu ist Sandstein weniger effektiv für ERW. Dies liegt daran, dass Sandstein im Vergleich zu Kalkstein langsamer und in geringerem Maße mit CO_2 reagiert. Das Hauptmineral im Sandstein ist Quarz (Harley & Gilkes, 2000).

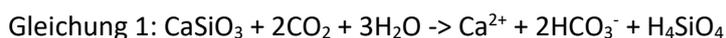
Metamorphe Gesteine bieten ebenfalls Potential für ERW, jedoch variiert ihre Eignung stark. Schiefer ist weniger effizient, da er langsamer verwittert und oft eine kompakte Struktur aufweist, die die Durchdringung von CO_2 erschwert. Typische Minerale im Schiefer sind Quarz (SiO_2) und Glimmer (Biotit und Muskovit). Gneis verhält sich ähnlich wie Granit und ist weniger effektiv für ERW im Vergleich zu Basalt oder Kalkstein. Auch hier sind die Hauptminerale Quarz, Feldspat (Orthoklas und Plagioklas) sowie Glimmer (Biotit und Muskovit) (Harley & Gilkes, 2000). Abschließend lässt sich festhalten, dass für ERW Gesteine aus jeder Gesteinsklasse relevant sein

können. Die Eignung für ERW hängt davon ab, wie hoch der Gehalt an frühkristallisierten Mineralien ist.

2.2 Chemische Prozesse der Verwitterung im Detail

Im folgenden Abschnitt wird der Fokus auf die chemischen Hauptreaktionen gelegt, die während der Verwitterung von Gesteinen auftreten. Wenn zerkleinertes Gestein auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht wird, kommt es zu einer Verwitterungsreaktion. Dieser natürliche Vorgang benötigt keine zusätzliche Energiezufuhr und ist thermodynamisch irreversibel. Die Verwitterung von Gestein ist ein komplexer Prozess, der von vielen Faktoren beeinflusst wird (Marklein et al., 2022). Wasser ist dabei einer der wichtigsten Faktoren. Es hat eine entscheidende Funktion bei der chemischen Verwitterung, da es als Lösungsmittel für verschiedene Mineralbestandteile dient. Weitere Faktoren, die die Verwitterung von Gestein beeinflussen, sind unter anderem das Klima, die Gesteinsart, die Zeit und biologische Aktivitäten. Diese Faktoren interagieren auf komplexe Weise miteinander und bestimmen die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Gesteinsverwitterung. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass die spezifischen Auswirkungen dieser Faktoren stark von den lokalen Umweltbedingungen abhängig sein können (Marklein et al., 2022).

Während der Verwitterungsprozesse treten typischerweise Reaktionen über zwei Mechanismen auf (Beerling et al., 2020). Beim ersten Mechanismus erfolgt die Übertragung von verwitterten Basenkationen (wie z.B. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ und K^+) aus dem Drainagewasser des Bodens in Oberflächengewässer. Dabei wird die Ladung durch die Bildung von Bikarbonat-Ionen (HCO_3^- -Ionen) ausgeglichen, die in den Ozean transportiert werden. Eine generalisierte Darstellung der Auflösung von Calciumsilikatmineralen, die diesen Mechanismus repräsentiert, wird in Gleichung 1 dargestellt. Wenn ein Teil des entstehenden HCO_3^- als Calciumkarbonat ausgefällt wird, folgt der Kohlenstoffdioxidabbau dem zweiten Mechanismus (Gleichung 2) und dabei kommt es zur Bildung von bodenbildenden (pedogenen) Karbonaten.



In der ersten Gleichung findet eine Reaktion zwischen einem Calcium-Silikat (CaSiO_3), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) statt. Als Resultat dieser Reaktion entstehen Calcium-

Ionen (Ca^{2+}), Bikarbonat-Ionen (HCO_3^-) und Kieselsäure (H_4SiO_4). Die Calcium- und Bikarbonat-Ionen können in Lösung gehen und schließlich zu Calciumkarbonat (CaCO_3) mineralisieren. Dieser Prozess bindet CO_2 und führt daher zur dauerhaften Entfernung von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre. Die Kieselsäure kann weiter reagieren oder ausfallen, abhängig von den spezifischen Bedingungen in der Umgebung. Während dieser Reaktion werden durch die Auflösung von Mineralien sowohl einwertige als auch zweiwertige basische Kationen freigesetzt.

Der Prozess des Kohlenstoffdioxidabbaus (CDR) hat das Potential, 2 Mol CO_2 pro Mol zweiwertiges Kation aus der Atmosphäre zu binden. Allerdings verringert die Karbonatchemie des Ozeans die Effizienz der CO_2 -Bindung, abhängig von Faktoren wie Temperatur, Salzgehalt und der Konzentration des gelösten CO_2 an der Meeresoberfläche.

In der Studie von Beerling et al. (2020) wurde für die Berechnung eine durchschnittliche Ozeantemperatur von 17°C , ein Salzgehalt von 35 % und ein gelöster Kohlendioxidpartialdruck (p_{CO_2}) von $600 \mu\text{atm}$ unter der Annahme eines RCP8.5-Szenarios für das Jahr 2050 verwendet. Aus dieser Berechnung ergab sich, dass pro Mol einwertiges Kation, das dem Ozean zugeführt wird, $0,86$ Mol CO_2 und pro Mol zweiwertiges Kation $1,72$ Mol CO_2 entfernt werden (Beerling et al., 2020).

Die zweite chemische Gleichung (Gleichung 2) zeigt den zweiten Mechanismus, bei dem gelöstes anorganisches CO_2 als bodenbildendes Karbonat ausgefällt wird. Hierbei reagieren Calcium-Ionen (Ca^{2+}) mit Bikarbonat-Ionen (HCO_3^-), was zur Bildung von Calciumkarbonat (CaCO_3), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) führt. Im Gegensatz zum ersten Mechanismus, der $1,72$ Mol CO_2 pro Mol Ca^{2+} bindet, wird bei der Ausfällung von Calciumkarbonat aus Bikarbonat ein Teil des gebundenen Kohlenstoffdioxids wieder in die Atmosphäre freigesetzt. Daher bindet dieser Mechanismus nur 1 Mol CO_2 pro Mol Ca^{2+} . Deshalb ist der zweite Mechanismus im Vergleich zum ersten weniger effizient (Beerling et al., 2020). Insgesamt tragen beide Mechanismen zur Reduzierung von Kohlenstoffdioxid bei, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß und mit variierender Effizienz.

Da Verwitterung eine chemische Reaktion ist, hängt die Geschwindigkeit dieser stark von den Temperaturen und der Wasserverfügbarkeit ab. Diese Prozesse werden mit der Arrhenius-Beziehung und der Clausius-Clapeyron-Beziehung erklärt (Li et al., 2016).

Die Arrhenius-Beziehung spielt eine Rolle bei der Modellierung der Verwitterungsrate von Gesteinen, insbesondere bei der Temperaturabhängigkeit chemischer Reaktionen während dieses Prozesses. Höhere Temperaturen führen zu einer erhöhten kinetischen Energie der beteiligten Moleküle und erhöhen damit die Wahrscheinlichkeit, dass Verwitterungsreaktionen stattfinden. Dies bedeutet, dass die Geschwindigkeit mit der Minerale in Gesteinen durch chemische Reaktionen abgebaut werden, mit steigender Temperatur zunimmt. Die Aktivierungsenergie spielt hierbei eine

entscheidende Rolle, da sie angibt, wie viel Energie benötigt wird, damit eine Reaktion stattfinden kann. Die Arrhenius-Beziehung quantifiziert diesen Temperaturabhängigkeitseffekt und wird verwendet, um zu verstehen, wie Umweltbedingungen wie das Klima und geologische Prozesse die Verwitterungsraten von Gesteinen beeinflussen.

Die Clausius-Clapeyron-Beziehung beschreibt den Zusammenhang zwischen Temperatur, Dampfdruck und Phasenübergängen in einem System (Huh, 2003). Im Kontext der Verwitterung spielt sie eine Rolle bei der Modellierung der thermodynamischen Bedingungen, die die Verfügbarkeit von Wasser beeinflussen, das wiederum für chemische Verwitterungsprozesse von entscheidender Bedeutung ist. Höhere Temperaturen führen zu einer höheren Sättigung der Luft mit Wasserdampf, was die Häufigkeit und Intensität von Niederschlägen beeinflussen kann. Dies wiederum kann die Verwitterungsraten von Gesteinen erhöhen, da vermehrter Niederschlag mehr Wasser zur Verfügung stellt, das chemische Reaktionen beschleunigt. Die Clausius-Clapeyron-Beziehung liefert somit einen Rahmen, um zu verstehen, wie klimatische Variablen wie die Temperatur die hydrologischen Bedingungen und damit die Verwitterungsprozesse beeinflussen, die letztlich die Landschaftsentwicklung und den Kohlenstoffkreislauf beeinflussen können (Li et al., 2016).

2.3 Vergleich und Abgrenzung zu anderen CDR-Methoden

In diesem Kapitel werden verschiedene Methoden zur Kohlenstoffdioxid-Entnahme (CDR) aus der Atmosphäre vorgestellt. Dabei werden zwei Methoden im Detail beleuchtet, die wie ERW ein Potential für eine hohe Permanenz aufweisen. Zum einen wird Pflanzenkohle näher beleuchtet, die wie ERW eine hybride CDR-Methode ist und natürliche Prozesse durch technische Hilfsmittel und Eingriff des Menschen beschleunigt und DAC(CS), die eine rein technische CDR-Methode darstellt. Schließlich werden alle Methoden kurz mit ERW verglichen.

Eine der CDR-Methoden ist die Aufforstung und Wiederaufforstung (AR) und bei dieser Methode Speichern die Bäume längerfristig CO_2 (Terlouw et al., 2021). Die Aufforstung umfasst das Pflanzen von Bäumen auf Flächen, die kürzlich nicht bewaldet waren, während die Wiederaufforstung sich auf die Wiederbepflanzung von kürzlich entwaldeten Gebieten bezieht. Nachteilig an diesen Methoden ist, dass Wälder Jahrzehnte benötigen, um signifikante Mengen an Kohlenstoff zu speichern. Es besteht zudem das Risiko, dass die gespeicherte Kohlenstoffdioxid durch Waldbrände, Krankheiten oder Abholzung wieder freigesetzt wird. Die Permanenz der CO_2 Speicherung kann also

nicht garantiert werden (Terlouw et al., 2021). Ein Vorteil an dieser Methode sind die geringen Kosten, diese liegen bei etwa 24 USD pro Tonne CO₂ (Strefler et al., 2018).

Die Methode „Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung“ (BECCS) beinhaltet die Abscheidung und dauerhafte Speicherung von biogenem CO₂ während eines Energieumwandlungsprozesses aus Biomasse, wie zum Beispiel in einem Kraftwerk (Terlouw et al., 2021). Wie auch die bereits genannten Methoden hat auch BECCS ein großes CO₂-Sequestrierungspotential, jedoch kann BECCS bei schlechter Regulierung mehrere Nachteile haben. Dazu gehören die Konkurrenz um Land mit der Nahrungsmittelproduktion, hoher Wasserverbrauch, negative Umweltauswirkungen wie Bodenverschlechterung und Monokulturen, sowie hohe Kosten und technologische Unsicherheiten. Zudem gibt es logistische Herausforderungen beim Transport und der Lagerung von Biomasse und CO₂, sowie Unsicherheiten in der Kohlenstoffbilanz und der langfristigen Speicherung. (Terlouw et al., 2021) Die Kosten, die bei BECCS entstehen, variieren auf Grund unterschiedlicher Standorte und liegen momentan zwischen 60-135 USD pro Tonne CO₂ (Möllersten K, 2022).

Ozeandüngung (OF) ist eine weitere CDR- Methode, bei der Nährstoffe in den Ozean eingebracht werden, um das Wachstum von Phytoplankton zu fördern, das CO₂ aus der Atmosphäre aufnimmt (Terlouw et al., 2021). Diese Methode soll die biologische Produktivität der Ozeane steigern und dadurch mehr CO₂ binden. Dies birgt allerdings ökologische Risiken, wie Algenblüten und Sauerstoffmangel, und hat unklare Langzeitwirkungen sowie regionale Unterschiede in der Effizienz. Zudem stehen rechtliche und politische Hürden sowie die potentielle Freisetzung von Treibhausgasen einer großflächigen Umsetzung im Weg. (Terlouw et al., 2021)

Bei der „Soil Carbon Sequestration“ (SCS) wird Kohlendioxid aus der Atmosphäre durch die Förderung der Kohlenstoffbindung im Boden entfernt (Terlouw et al., 2021). Dies geschieht durch verbesserte landwirtschaftliche Praktiken oder Änderungen in der Landnutzung, die die organische Bodensubstanz erhöhen und damit Kohlenstoff im Boden speichern. Jedoch gibt es Unsicherheiten über die Langzeitstabilität des gebundenen Kohlenstoffs und die mögliche Freisetzung bei Bodenstörungen oder Änderungen in der Landnutzung. Zudem kann die Methode durch Faktoren wie Bodenbeschaffenheit, Klima und landwirtschaftliche Praktiken in ihrer Effektivität begrenzt sein (Terlouw et al., 2021).

Pflanzenkohle, ein umweltbeständiges Material mit hohem Kohlenstoffgehalt, wird durch thermochemische Umwandlung von Biomasse in Pyrolyseprozessen unter Sauerstoffausschluss

hergestellt (Lehmann et al., 2021). Der Einsatz von Pflanzenkohle als CDR-Methode wird neben ERW ebenfalls für eine groß angelegte Implementierung als potentiell geeignet angesehen. Es handelt sich dabei um eine Methode, bei der Biomasse stark erhitzt wird, aber kein Sauerstoff vorhanden ist, um eine Verbrennung zu ermöglichen. Dabei entstehen neben Pflanzenkohle auch rückgewinnbare Wärme und Brennstoffe. Der Klimaeffekt von Pflanzenkohle hängt von ihren Materialeigenschaften und den Auswirkungen ihrer Herstellung und Verwendung auf die Treibhausgasemissionen während ihres gesamten Lebenszyklus ab. Unabhängig von der CO₂-Entnahme-Kapazität, verbessert Pflanzenkohle die Bodenstruktur, Wasserhaltekapazität und Nährstoffverfügbarkeit, was zu höheren Erträgen in der Landwirtschaft führen kann, wenn es auf Feldern ausgebracht wird. Pflanzenkohlesysteme können die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre beeinflussen. Die Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus umfassen auch Emissionen, die mit dem Transport, der Lagerung und der Einarbeitung von Pflanzenkohle verbunden sind. Indirekte Auswirkungen auf den Klimawandel können durch veränderte Flächennutzung, Bewirtschaftung der Biomasse, Bewässerungs- und Düngerbedarf oder Albedo (Maß für das Rückstrahlvermögen also die Reflexionsstrahlung, von diffus reflektierenden, also nicht selbst leuchtenden Oberflächen) verursacht werden. Diese indirekten Effekte variieren stark zwischen den einzelnen Pflanzenkohlesystemen. Eine Herausforderung bei Pflanzenkohle ist die begrenzte CO₂-Entnahmekapazität aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse und der Effizienz der Pyrolyseprozesse.

Pflanzenkohlesysteme tragen zur Netto-Kohlenstoffreduzierung bei, hauptsächlich aufgrund ihrer Persistenz. Im Vergleich zu nicht pyrolysierten Rückständen ist die mikrobielle Kohlenstoffmineralisierung von Pflanzenkohle deutlich reduziert, und Emissionen von Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄) werden bei Pyrolyse über 450 °C weitgehend vermieden. Um die Beständigkeit über lange Zeiträume vorherzusagen, müssen die schnell und langsam mineralisierenden Fraktionen der Pflanzenkohle getrennt quantifiziert werden. Die Unterschiede in der Stabilität von verschiedenen Pflanzenkohlen sind auf hundertjährigen Zeitskalen aber weniger bedeutend als die Unterschiede zwischen Pflanzenkohle und unpyrolysierte Biomasse. Die Verringerung der Emissionen über den Lebenszyklus ist gering, unabhängig davon, ob 80 oder 90 % des Pflanzenkohle-Kohlenstoffs nach 100 Jahren noch vorhanden sind. Bei der Verwendung in langlebigen Produkten wie Baumaterialien ist die Kohlenstoffsенke der Pflanzenkohle gesichert, solange das Produkt nicht verbrannt wird. Die Umverteilung und das Vergraben von Pflanzenkohle im Boden kann durch Erosion und Auswaschung ihre Mineralisierung verringern (Lehmann et al., 2021). Die Kosten der Implementierung von Pflanzenkohle variieren stark, denn Faktoren wie die Art der Rohstoffquelle und die damit verbundenen Ausgaben, die eingesetzte Produktionstechnologie, der Umfang des Projekts, der Wert der Nebenprodukte sowie die

agronomischen Vorteile der Einbringung von Pflanzenkohle in den Boden beeinflussen die Wirtschaftlichkeit erheblich. Daher liegen die Kosten zwischen 20 und 165 USD pro Tonne (Möllersten K, 2022).

Direct Air Capture (DAC), bzw. Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) ist eine Technologie zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre (McQueen et al., 2021). Dabei werden große Mengen an Luft in einer Anlage angesaugt und das darin vorhandene CO₂ gebunden. Bei DACCS wird das aus der Atmosphäre entfernte CO₂ in z.B. unterirdischen geologischen Formationen, wie z.B. salinen Aquiferen gespeichert, während bei DACCU (Direct Air Carbon Capture und Utilization) das CO₂ weiterverwendet wird, wie z.B. in der chemischen Industrie für synthetische Kraftstoffe oder der Lebensmittelindustrie. Aktuelle DAC-Methoden nutzen chemische Kontaktoren, die unterschiedliche Phasen in Kontakt bringen, um eine maximale Reaktionsfläche zu schaffen, um damit CO₂ zu binden und freizusetzen. Es gibt zwei Haupttypen von DAC-Verfahren, bei denen entweder feste Sorptionsmittel oder flüssige Lösungsmittel zur CO₂-Sequestrierung verwendet werden.

Feste Sorptionsmittel und flüssige Lösungsmittel unterscheiden sich in ihrer Materialzusammensetzung und der Art, wie sie CO₂ binden. Beide Methoden zielen darauf ab, die Wechselwirkungen zwischen dem CO₂ und der chemischen Base im Kontaktor zu maximieren. Feste Sorptionsmittel haben den Vorteil, dass sie eine höhere Beladung mit der Base ermöglichen, was zu mehr Bindungspunkten mit CO₂ führt.

Beide DAC-Ansätze benötigen etwa 80% thermische Energie und 20% Strom für den Betrieb. Der Bedarf an thermischer Energie resultiert aus der Regeneration des Sorptionsmittels und der Freisetzung des gebundenen CO₂. Der Strombedarf resultiert aus den Ventilatoren des Kontaktors und den Vakuumpumpen oder anderen Geräten, die zur Überwindung des Druckabfalls im System erforderlich sind. DAC – Anlagen verbrauchen laut McQueen et al. (2021) 2000 kWh pro Tonne entferntem CO₂. Laut McQueen et al. (2021) sind die Kosten, u.a. durch den hohen Energieverbrauch, pro Tonne entferntem CO₂ noch sehr hoch und liegen bei ca. 600 USD (McQueen et al., 2021).

ERW zeigt im Vergleich zu anderen CDR-Methoden wie Pflanzenkohle, DAC(CS), BECCS, OF, SCS und AR verschiedene Vor- und Nachteile. ERW bietet eine natürliche und skalierbare Möglichkeit zur CO₂-Entnahme, jedoch sind die Effekte langsamer im Vergleich zu technologischen Lösungen wie DAC(CS) und BECCS. Pflanzenkohle bietet wie ERW ein Bodenverbesserungspotential, hat aber begrenzte CO₂-Entnahme-Kapazitäten auf Grund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse und der Effizienz der Pyrolyseprozesse im Vergleich zu ERW. DAC(CS) und BECCS sind effizient in der

CO₂-Entnahme, erfordern aber hohe Energie- und Infrastrukturkosten. OF kann schnell CO₂ entfernen, birgt jedoch ökologische Risiken. SCS und AR tragen zur CO₂-Sequestrierung bei, haben aber begrenzte Skalierbarkeit und können durch Landnutzungsänderungen und begrenzte Speicherkapazitäten eingeschränkt sein im Vergleich zu ERW. Die Kosten der Methoden variieren stark, wobei ERW mit einer Spanne von 60-200 USD eine kostenintensive Option ist. Trotz der vergleichsweise hohen Kosten scheint ERW aufgrund seiner Fähigkeit zur langfristigen CO₂-Sequestrierung und der potentiellen Verbesserung der Bodenqualität wettbewerbsfähig zu sein (Strefler et al., 2018).

3 Methodik

3.1 Unsystematische Literaturrecherche

In dieser Arbeit wurde eine nicht-systematische Literaturrecherche durchgeführt, um eine umfassende Basis an Literatur zu diesem vergleichsweise neuem Forschungsfeld zu etablieren. Initiale Suchanfragen wurden in wissenschaftlichen Datenbanken und Suchmaschinen durchgeführt, um relevante Primärquellen zu identifizieren (Baumeister & Leary, 1997). Als Teil dieser Recherche wurde die Schneeball-Methode verwendet, um durch die Analyse von Referenzlisten und Zitationen der identifizierten Schlüsselquellen weitere relevante Studien zu finden. Diese kombinierte Methodik ermöglicht es, einen breiten Überblick über das Thema zu erhalten und verschiedene Perspektiven zu integrieren, die durch eine alleinige nicht-systematische Recherche möglicherweise nicht abgedeckt worden wären (Grant & Booth, 2009).

In der Literaturrecherche wurden die Suchmaschinen Google Scholar und ResearchGate verwendet. Dabei wurden unterschiedliche Schlüsselwörter genutzt, wobei der Fokus auf der Breite der Abdeckung lag, um potentiell relevante Informationen nicht auszuschließen. Beispiele für die Schlüsselbegriffe sind: 'Enhanced Rock Weathering', 'Enhanced Rock Weathering + Soil Quality', 'Enhanced Rock Weathering + CO₂ Sequestration', 'Enhanced Rock Weathering + Mining', 'Enhanced Rock Weathering + Climate' und 'Enhanced Rock Weathering + Environmental Impact'.

Die Auswahl der Quellen erfolgte aufgrund ihrer Relevanz für das Forschungsthema und die Qualität der bereitgestellten Informationen. Diese Vorgehensweise ermöglichte einen Einblick in das Forschungsfeld und die Identifizierung potenzieller Lücken oder inkonsistenter Ergebnisse in der bestehenden Literatur (Baumeister & Leary, 1997). Durch die unsystematische Literaturrecherche

kann flexibel auf neue Erkenntnisse und Perspektiven reagiert werden, was einen dynamischen Forschungsprozess unterstützt.

Diese Methodik ermöglichte einen informierten Rahmen für die Bachelorarbeit, indem eine breite Basis an Literatur zur Verfügung gestellt wurde, auf der die Analyse und Interpretation aufgebaut werden konnte (Baumeister & Leary, 1997). Durch die Anwendung der unsystematischen Literaturrecherche wurde sichergestellt, dass die Forschung auf einer soliden Grundlage aktueller und relevanter wissenschaftlicher Erkenntnisse beruhte.

Es sind mehrere Limitierungen anzumerken, die aus einer unsystematischen Literaturrecherche resultieren können. Es könnte ein Selektionsbias auftreten, da die Auswahl der Literaturquellen möglicherweise nicht alle relevanten Studien einschließt. Die Vollständigkeit der Daten könnte beeinträchtigt sein, da möglicherweise wichtige Studien oder Datenquellen übersehen wurden. Des Weiteren könnten sprachliche Einschränkungen dazu führen, dass Studien in anderen Sprachen nicht berücksichtigt wurden. Eine unvollständige oder nicht optimierte Suchstrategie sowie potentielle Publikations- und Interpretationsbias könnten zusätzlich die Ergebnisse beeinflussen (Grant & Booth, 2009).

3.2 Expert:innen-Interviews

Zusätzlich zu der Literaturrecherche wurden Expert:innen-Interviews durchgeführt. Ziel war es, qualitative Einsichten und Perspektiven von Fachleuten in diesem Bereich zu gewinnen, die durch Literaturrecherche möglicherweise nicht erfasst werden (Braun & Clarke, 2019). Die Auswahl der Expert:innen erfolgte auf Basis ihrer fachlichen Expertise und Relevanz für das Forschungsthema. Die Expert:innen wurden gezielt ausgewählt, um eine breite Perspektive zu ERW zu erhalten. Insgesamt wurden 4 Expert:innen interviewt. E1 ist eine Person mit Professur und einem Doktorgrad in den Bereichen Geologie und Biologie, die an mehreren Forschungsprojekten zu ERW beteiligt war. E2, mit einem Doktorgrad in Geologie und Erd-/Geowissenschaften, bringt Erfahrungen aus Projekten mit Pflanzenkohle und ERW ein. E3, mit einem Doktorgrad in Biogeochemie, forscht in mehreren Projekten zu ERW an einer Universität. E4, ebenfalls mit einem Doktorgrad in Geologie, hat sich ebenfalls in mehreren Forschungsprojekten zu ERW engagiert. Die Interviewfragen wurden auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche und theoretischen Überlegungen entwickelt. Es wurde ein halbstrukturierter Interviewleitfaden erstellt, um sicherzustellen, dass alle relevanten Themen abgedeckt werden und gleichzeitig Flexibilität für spontane Fragen und Antworten gegeben war.

Die Interviews wurden im Mai 2024 durchgeführt. Die Interviews fanden online über Microsoft Teams per Videoanruf statt und dauerten durchschnittlich 60 Minuten. Alle Interviews wurden mit Zustimmung der Teilnehmenden aufgezeichnet.

Die Datenanalyse erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse. Die Transkripte wurden mehrfach durchgelesen und kodiert, um zentrale Themen und Muster zu identifizieren. Die Kodierung erfolgte induktiv, basierend auf den in den Interviews aufgetretenen Themen.

Bei jedem Interview wurde eine mündliche Einverständniserklärung eingeholt. Die Anonymität und Vertraulichkeit der Teilnehmenden wird gewährleistet, indem persönliche Daten anonymisiert und die Aufzeichnungen sicher gespeichert werden.

Eine mögliche Einschränkung dieser Methode liegt in der subjektiven Natur der qualitativen Analyse, die durch den Forscherbias beeinflusst werden kann. Die Ergebnisse sind aufgrund der begrenzten Anzahl an Expert:innen-Interviews nicht generalisierbar. Diese Einschränkungen wurden bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt.

Die Interviews wurden mit Microsoft Teams aufgezeichnet und darüber automatisch transkribiert. Um die Lesbarkeit und Verständlichkeit der Interviews zu gewährleisten, wurden die Transkripte bearbeitet. Es wurden Wiederholungen und Füllwörter entfernt, die den Sinn des Gesagten nicht veränderten. Es gab Korrekturen von grammatikalischen Fehlern, um die Klarheit der Aussagen zu verbessern. Es wurden Sätze geglättet, um die Lesbarkeit zu verbessern. In den Interviews wurden persönliche Gespräche, die nicht zum wissenschaftlichen Inhalt beitragen und potentiell die Anonymität der Interviewpartner:innen gefährden könnten, entfernt. Dieser Schritt war notwendig, um die Vertraulichkeit der Teilnehmenden zu gewährleisten. Alle Änderungen wurden sorgfältig durchgeführt, um den Inhalt der Aussagen nicht zu verändern. Alle Anpassungen zielten darauf ab, die wesentlichen Informationen und Meinungen der Interviewten klar und präzise wiederzugeben (Braun & Clarke, 2019). Es steht ein separates Dokument mit den ursprünglichen Transkripten zur Verfügung, falls dies für die Beurteilung der wissenschaftlichen Integrität erforderlich ist.

4 Resultate

Das vorliegende Kapitel widmet sich der detaillierten Untersuchung der Resultate aus der Analyse der Umweltauswirkungen, sowie der Einflussfaktoren auf das CO₂-Reduktionspotential von ERW. In Abschnitt 4.1 werden die unterschiedlichen Auswirkungen von ERW auf die Umwelt beleuchtet, einschließlich potenzieller ökologischer Folgen und anderer Umweltaspekte. In Abschnitt 4.2 liegt der Fokus auf den Faktoren, die das Potential von ERW zur Reduzierung von CO₂-Emissionen beeinflussen können, und es werden die variablen Rahmenbedingungen, die hierbei eine Rolle spielen, untersucht.

4.1 Auswirkungen auf die Umwelt durch ERW

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Auswirkungen und Umweltbedingungen untersucht, die zum einen von ERW beeinflusst werden und zum anderen von Bedeutung für ERW sind. Anschließend werden die Einflüsse auf den Boden bei der Ausbringung des gemahlene Gesteins auf Feldern analysiert. Hierbei werden Aspekte wie die Veränderung des pH-Werts, die Zugabe von Mineralien und die damit verbundene potentielle Verbesserung der Bodenqualität sowie das potentiell erhöhte Pflanzenwachstum untersucht. Verschiedene Gesteinsarten werden in Relation zu unterschiedlichen Böden und Regionen betrachtet, um deren spezifische Wirkung zu verstehen. Zudem wird der Einfluss des Klimas auf das Potential von ERW thematisiert.

Für die Anwendung von ERW müssen zunächst Gesteine in Steinbrüchen abgebaut werden, was zu CO₂-Emissionen und Umweltbeeinträchtigungen führen kann, insbesondere bei großflächiger Implementierung (Beerling et al., 2020).

Die Implementierung von Bergwerken kann also eine bedeutende Umweltbelastung darstellen, die zur Abholzung von Bäumen in den Tropen beitragen könnte und häufig in, oder in der Nähe von Gebieten mit hoher Biodiversität stattfindet (Edwards et al., 2017). Die Entwicklung und Erweiterung der Verkehrsinfrastruktur wie Straßen und Schienen für den Bergbau kann den Zugang zu biodiversen und entlegenen Ökosystemen erhöhen. Dies kann durch die neuen Arbeitsmöglichkeiten und damit einhergehenden Zuwanderung von Bevölkerungsgruppen zur Rodung von Land für landwirtschaftliche Zwecke und zur Jagd anregen, wodurch die Ökosysteme Schaden nehmen könnten (Edwards et al., 2017).

In einer Untersuchung von Taylor et al. (2016) wurde berechnet, dass bei einer Ausbringung von 10 t ha⁻¹ auf einer Fläche von 670 Megahektar tropischer Anbauflächen jährlich 6,7 Petagramm (6,7

Millionen Tonnen) Gestein abgebaut werden müssten. Bei einer Ausbringung von 50 t ha^{-1} wären es sogar 33,5 Petagramm (33,5 Millionen Tonnen) jährlich (Taylor et al., 2016). Zum Vergleich: Die weltweite Zuschlagstoffproduktion, also die Gesamtmenge an Gestein und Mineralien, die jährlich abgebaut werden, liegt bei etwa 40 Petagramm pro Jahr (Edwards et al., 2017). Dies unterstreicht die Herausforderungen, die mit der Skalierung von ERW verbunden sind, insbesondere wenn sie in großem Maßstab umgesetzt werden.

Angesichts der enormen Menge an Gestein, die für ERW benötigt würde, ist es sinnvoll, gezielt Agrarflächen auszuwählen, die besonders geeignet für diesen Prozess sind, um ein möglichst großes Sequestrierungs-Potential, bei gleichzeitig geringen Umweltauswirkungen zu erzielen (Edwards et al., 2017). Beerling et al. (2020) haben sich ebenfalls mit den Herausforderungen des Gesteinsabbaus befasst und einige Lösungsansätze vorgeschlagen (Beerling et al., 2020). Um die Ausweitung des Bergbaus zu vermeiden oder zu verringern, wird vorgeschlagen, Nebenprodukte wie ungenutztes silikatisches Gestein aus Kiesgruben zu verwenden. Zudem produziert der Bergbau silikatisches Gesteinsmehl, das normalerweise entsorgt wird, jedoch optimal für ERW geeignet wäre, da dadurch keine zusätzlichen Emissionen durch den Abbau entstehen würden. Ein weiterer Lösungsansatz wäre, den Bedarf an Bergbau durch die Nutzung von Silikat-Nebenprodukten aus industriellen Prozessen zu reduzieren, wie beispielsweise calciumreiche Schlacken aus der Eisen- und Stahlherstellung, die oft als geringwertiges Aggregat recycelt oder entsorgt werden. Nach der Trennung und Reinigung von anderen Materialien, wie Metallen und Kunststoffen, könnten die calciumreichen Silikate aus recyceltem Zement als wertvolle Ressourcen für die CO_2 -Entfernung dienen, wobei Feldversuche erforderlich wären, um ihre Eignung für die Anwendung auf Böden zu bewerten (Beerling et al., 2020).

In diesem Zusammenhang ist auch die Analyse von Eufrazio et al. (2022) relevant, die verschiedene Faktoren wie Ressourcenverknappung, Verlust von Ökosystemen und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit in Bezug auf das Potential zur Implementierung von ERW in Ländern wie Polen, Deutschland, Indien, China, Brasilien, Frankreich, Kanada, den USA, Indonesien, Mexiko, Italien und Spanien untersucht hat (Eufrazio et al., 2022). In dieser Studie wurde eine Ausbringungsrate von 40 t ha^{-1} pro Jahr festgelegt. In dieser Untersuchung wurde die Ressourcenverknappung (RE) betrachtet, also der Grad der Erschöpfung abiotischer Ressourcen durch erhöhte Metall- und Mineralienextraktion sowie den Verbrauch von Primärenergieträgern und Wasser in der ERW-Lieferkette. Dabei stellte sich heraus, dass Polen, Deutschland, Indien und China das höchste Risiko der Ressourcenverknappung aufweisen, während diese in Brasilien, Frankreich, Kanada und Spanien weniger ausgeprägt ist. Es zeigte sich zudem, dass die Ressourcenverknappung in Bezug auf Metall- und Mineralverknappung sinkt, wenn in einem Land mehr erneuerbare Energien verwendet werden. Obwohl China einen erhöhten RE-Wert aufweist,

wird dem Land aufgrund seiner verfügbaren Ackerflächen und Stromkapazitäten ein hohes Potential für die CO₂-Sequestration zugesprochen (Eufrazio et al., 2022).

4.1.1 Wechselwirkung von Gesteinen und der Natur

Mineralien in Böden spielen eine entscheidende Rolle für das Pflanzenwachstum und die Nährstoffaufnahme. Die von Beerling et al. (2024) untersuchten Studien haben gezeigt, dass die Anwendung von ERW, insbesondere durch die Zugabe von Gesteinen wie Basalt, zu erhöhten Gehalten an Kalium, Phosphor und Nitrat in Pflanzensamen führt (Beerling et al., 2024). Diese Anwendung könnte dazu führen, dass erhebliche Einsparungen bei der Verwendung herkömmlicher Düngemittel erzielt werden, mit Berichten über Einsparungen von bis zu 30 % bei Phosphor und bis zu 40 % bei Kalium (Beerling et al., 2024). Darüber hinaus kann die Substitution von Düngemitteln durch ERW dazu beitragen, Überdüngung zu vermeiden, was besonders wichtig ist, um die Belastung von Aquatischen Ökosystemen durch erhöhten Phosphateintrag zu reduzieren (Beman et al., 2005).

Nährstofflieferungen durch Gesteine variieren stark je nach Mineralogie und den spezifischen Bedingungen der Versuche. Kalium, das in verschiedenen Mineralen vorkommt, ist ein Hauptaugenmerk vieler Studien (Swoboda et al., 2022). Es ergaben sich unerwartete Nährstoffvorteile, insbesondere bei Feldspat-Versuchen in Ägypten, wo trotz niedriger Auflösungsraten und alkalischer pH-Werte im Boden positive Effekte beobachtet wurden. Auf sauren Böden zeigten mafische und ultramafische Gesteine die auffälligsten Mehrnährstoffversorgungen, während eine übermäßige Anwendung von fein gemahlenem Gneis und Feldspat zu einem Ungleichgewicht bei Calcium, Magnesium, Zink und Phosphor führte (Priyono & Gilkes, 2008).

In den durchgeführten Expert:innen-Interviews wurde die Auswahl geeigneter Gesteinsmehle für ERW intensiv diskutiert. Die befragten Expert:innen weisen in Bezug auf den Einfluss von ERW auf Böden auf die Bedeutung der richtigen Anwendung von Gesteinsmehlen hin, um die Bodengesundheit und -qualität zu fördern. Um Umweltbelastungen zu minimieren, wird eine sorgfältige Dosierung und Auswahl der Gesteinsmehle empfohlen, um Überdosierungen und eine ungewollte Anreicherung von Schwermetallen im Boden zu vermeiden (E3, Anhang 3, E4, Anhang 4). Besondere Aufmerksamkeit erfordert die Implementierung von ERW mit Gestein, das reich an Olivin ist, wie beispielsweise Dunite, aufgrund des hohen Gehalts an Nickel und Chrom. Diese Elemente stellen je nach Boden-pH und Mobilität besondere Herausforderungen dar (E3, Anhang 3,

E4, Anhang 4). Die Freisetzung von Nickel und Chrom in landwirtschaftlich genutzten Böden stellt ein globales Umweltproblem dar, insbesondere aufgrund der potenziellen Aufnahme dieser Metalle in die Nahrungskette, wodurch die Gesundheit von Menschen und Tieren beeinträchtigt werden könnte (Haque et al., 2020).

Ein fruchtbarer und gesunder Boden zeichnet sich u.a. durch eine hohe Kationenaustauschkapazität (KAK) aus, die wesentlich zur Verbesserung der Bodenstruktur, -fruchtbarkeit und Nährstoffhaltekraft beiträgt, was wiederum das Pflanzenwachstum fördert. Diese sorgt für eine höhere Bodenqualität und langfristige Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion (Ross & Ketterings, 1995). Durch ERW kann die KAK gesteigert werden, indem fein gemahlenes Gestein auf den Boden aufgebracht wird, wodurch zusätzliche Kationen freigesetzt werden. Ein hoher KAK wiederum verbessert die Effizienz von ERW, indem er die Nährstoffspeicherung erhöht und die Verfügbarkeit essenzieller Elemente für Pflanzen verbessert. In einer Studie von Beerling et al. zeigten die behandelten Böden eine deutliche Erhöhung der Sättigung mit basischen Kationen, als Prozentsatz der KAK, im Vergleich zu den Kontrollböden. Dies geschieht, indem freigesetzte Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen aus der Verwitterung von Basalt im Laufe der Zeit die austauschbare Säure ersetzen (Beerling et al., 2024).

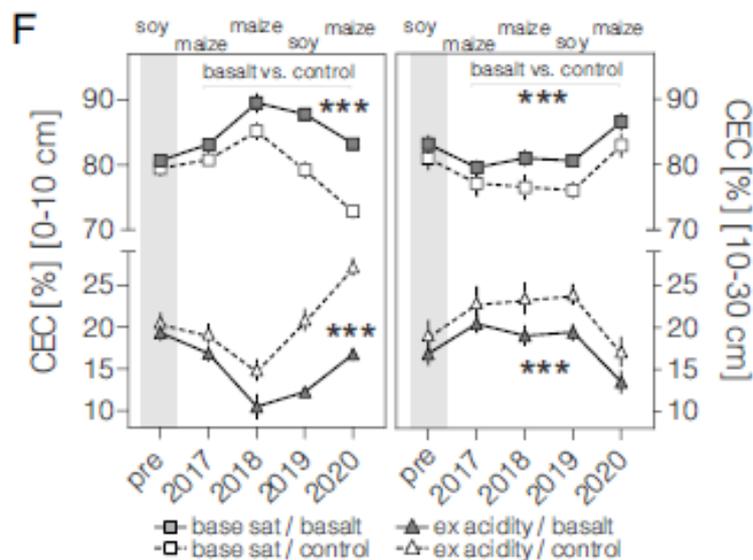


Abbildung 2 Veränderung der KAK (Beerling et al., 2024)

Die Abbildung 2 illustriert die Veränderungen der Kationenaustauschkapazität (KAK, bzw. CEC) über einen Zeitraum von vier Jahren (Beerling et al., 2024). Die Daten zeigen die Werte sowohl für die oberen 10 cm als auch für den Bereich von 10-30 cm Bodentiefe. Es ist deutlich erkennbar, dass die KAK im Verlauf der Basaltanwendung im Vergleich zur Kontrollgruppe angestiegen ist, dies lässt sich

auf der linken Seite der Abbildung 2 ablesen. Es zeigt sich außerdem ein Rückgang der KAK in den oberen 10 cm des Bodens ab dem dritten Jahr. In einer Tiefe von 10-30 cm, wie aus der rechten Seite der Abbildung 2 hervorgeht, zeigt die KAK geringere Schwankungen. Es ist jedoch erkennbar, dass die KAK im vierten Jahr ansteigt.

Auch die Auswahl und Nutzung der passenden Böden für ERW ist essentiell. Die befragten Expert:innen empfehlen Organik-arme, sandige und saure Böden für die Anwendung von Gesteinsmehl (E1, Anhang 1; E2, Anhang 2; E3, Anhang 3). E2, E3 und E4 sind sich außerdem einig, dass Böden, die stark alkalisch sind, ungeeignet für ERW sind (E2, Anhang 2; E3, Anhang 3; E4, Anhang 4). Die Böden sollten einen sauren pH-Wert haben und wenig organischen Kohlenstoff enthalten (E1, Anhang 1; E2, Anhang 2; E3, Anhang 3; E4, Anhang 4). Dies ist darauf zurückzuführen, dass ERW den pH-Wert im Boden erhöht, wie auch in der Studie von Beerling et al., (2024) beobachtet wurde. Über einen Zeitraum von vier Jahren wurden Agrarböden unter Zugabe von Gesteinsmehl untersucht, wobei in den obersten 10 cm bei der Anwendung von ERW der pH-Wert von knapp über 6 auf knapp unter 7 anstieg, während er in der Kontrollgruppe von knapp über 6 auf knapp unter 6 abnahm. In Tiefen zwischen 10 und 30 cm zeigte sich ein geringerer Unterschied, wobei der pH-Wert unter der Anwendung von ERW etwa 6,5 und unter Kontrollbedingungen etwa 6,25 betrug (Beerling et al., 2024).

Laut E3 verlangsamt ein hoher pH-Wert um 7 den Verwitterungsprozess, während niedrige pH-Werte unter 4,5 die Stabilität organischer Substanzen beeinträchtigen und die Kohlenstoffbindung behindern (E3, Anhang 3). Daher wird ein Boden-pH-Wert von mindestens 5,2 empfohlen, um signifikante Mengen an Bikarbonat zu produzieren. Idealerweise sollte der pH-Wert zwischen 5 und 6 liegen, wobei weitere Bodenfaktoren ebenfalls berücksichtigt werden müssen (E3, Anhang 3).

Auch andere Studien haben einen signifikanten Anstieg des Boden-pH-Werts dokumentiert (Swoboda et al., 2022). Dieser Anstieg wird als vorteilhaft angesehen, da ein initial niedriger Boden-pH das Pflanzenwachstum einschränken kann. Unterschiedliche Studien berichten von pH-Erhöhungen, die von moderaten 0,2 bis 0,4 pH-Einheiten bis zu signifikanten Anstiegen von fast 2 pH-Einheiten reichen (Dias et al., 2018; Silva et al., 2013). Diese Effekte wurden teilweise mit Kalk verglichen, wobei Kalkzusätze oft stärkere pH-Veränderungen hervorriefen.

Ein Experiment von Haque et al. (2019) konzentrierte sich ebenfalls auf die Auswirkungen von Wollastonit auf den pH-Wert des Bodens. Dabei wurde festgestellt, dass die Zugabe von Wollastonit zu einem Anstieg des pH-Werts führt. Bereits am 15. Tag nach Zugabe von Wollastonit betrug der pH-Wert unter Mineralbodenmodifikation (MSA) $7,06 \pm 0,04$ im Vergleich zu $4,97 \pm 0,02$ im

unbehandelten Boden. Dies verdeutlicht, dass Wollastonit die Bodenversauerung neutralisieren kann (Haque et al., 2019).

Das Pflanzenwachstum und die Ertragserhöhung sind zwei Schlüsselbereiche, in denen die Anwendung von Gesteinsmehl positive Effekte zeigt. Untersuchungen haben gezeigt, dass behandelte Pflanzen höhere Nährstoffkonzentrationen aufweisen, was zu einem verbesserten Wachstum führt (Anda et al., 2013). Zum Beispiel wiesen Kakaopflanzen, die mit Basalt behandelt wurden (5 - 10 t ha⁻¹), nach 24 Monaten höhere Konzentrationen an K (+140%), Mg (+900%) und Ca (+70%) auf. Die Pflanzen wuchsen außerdem sowohl höher, als auch dicker im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollpflanzen (Anda et al., 2013).

In verschiedenen agronomischen Studien auf Mauritius wurde festgestellt, dass die Zugabe von Basaltgestein in Kombination mit Düngemitteln oder Gülle ebenfalls zu signifikanten Ertragssteigerungen führt (d'Hotman, 1961). Die Zugabe von 60-250 Tonnen Basalt ha⁻¹ in Kombination mit einer Standarddüngung erhöhte den Ertrag über mehrere Kulturen hinweg, im Vergleich zu rein gedüngten Parzellen ohne Basaltzugabe. Diese Ergebnisse deuten auf eine positive Interaktion zwischen Basalt und konventionellem Dünger hin, was zu einer langfristigen Ertragserhöhung führt (d'Hotman, 1961).

Swoboda et al. (2022) haben eine Metaanalyse über die Effekte von Gesteinsmehlen auf Ertrag, Nährstoffversorgung und Bodeneigenschaften aus 40 Feldversuchen durchgeführt (Swoboda et al., 2022). In der Abbildung 3 ist eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse zu sehen. 'Signifikant positiv' und 'signifikant negativ' beziehen sich in dieser Tabelle auf statistisch signifikante Unterschiede zur unbehandelten Kontrollgruppe in der jeweiligen Studie. Die Anzahl der Ergebnisse übersteigt die Anzahl von 40 Feldversuchen, da in verschiedenen Studien mehr als ein Silikatgesteinsmehl und/oder Bodentyp und/oder Pflanzenart getestet wurden, die alle individuell betrachtet wurden. In Abbildung 3 zeigt sich deutlich, dass positive Effekte insbesondere in Bezug auf die Ertragserhöhung nachgewiesen wurden. Die Metaanalyse ergab zudem, dass in vielen Versuchen eine gesteigerte Verfügbarkeit verschiedener Mineralien im Boden gemessen wurde, darunter Kalium, Magnesium und Calcium. Ebenso wurde in 18 Feldversuchen eine Erhöhung des pH-Werts festgestellt.

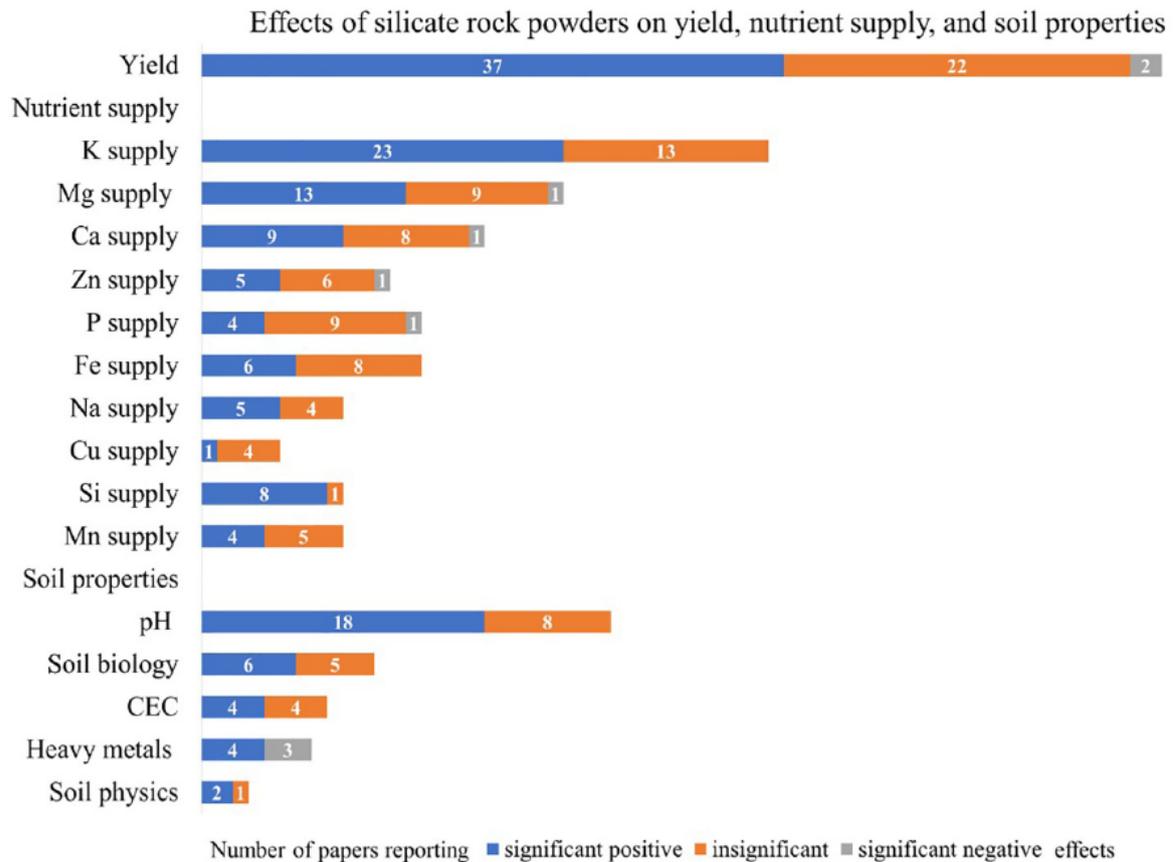


Abbildung 3 Zusammengefasste Auswirkungen von Silikatgesteinspulvern auf Ertrag, Nährstoffversorgung und Bodeneigenschaften nach Swoboda et al. (2022).

Die Analyse der Ertragseffekte zeigt, dass die meisten positiven Ertragssteigerungen auf sauren Böden, insbesondere Oxisolen, also stark verwitterten, meist tropischen Böden, erzielt wurden, während Ergebnisse auf gemäßigten Böden oft nicht signifikant waren (Swoboda et al., 2022). Mafische und ultramafische Gesteine erwiesen sich als besonders wirksam bei der Verbesserung der agronomischen Leistung von Gesteinsmehlen, oft vergleichbar mit handelsüblichen Düngemitteln. Gemäß Abbildung 3 zeigen zwei Studien negative Ertragseffekte, deren Ursachen bislang nicht bekannt sind (Swoboda et al., 2022).

4.2 Einflussfaktoren auf das CO₂-Sequestrierungspotential von ERW

Im folgenden Kapitel wird das Potential der CO₂-Sequestrierung durch ERW mit den damit einhergehenden Einflussfaktoren beleuchtet. Zu diesen Einflussfaktoren gehören die mineralogische Zusammensetzung der eingesetzten Gesteine, ihre Reaktionskinetik unter Umweltbedingungen sowie die Verfügbarkeit von Wasser und CO₂. Lokale Umweltfaktoren wie Klima und Bodenbedingungen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, da sie die Effizienz der mineralischen Kohlenstoffbindung beeinflussen können. Zusätzlich sind auch die Emissionen während des gesamten ERW-Prozesses zu berücksichtigen, einschließlich des Gesteinsabbaus, der Zerkleinerung und des Transports, die in die Bilanz der entfernten CO₂-Emissionen einfließen müssen.

Ein Aspekt, der schon im Kapitel 4.1. ‚Auswirkungen auf die Umwelt durch ERW‘ untersucht wird, ist die hohe Menge an Gestein, die bei einer großflächigen Implementierung von ERW benötigt wird. Um dabei möglichst wenig Schäden an den Ökosystemen herbeizuführen, und außerdem möglichst wenig zusätzliche Emissionen freizusetzen, ist es sinnvoll eine Auswahl an geeigneten Standorten auszuwählen. Eine Weltkarte in Abbildung 4 von Moosdorf et al., (2014) zeigt eine Übersicht an verfügbaren Gesteinen, die für ERW relevant sein könnten (Moosdorf et al., 2014). Sie zeigt, dass Gesteine besonders nördlich und südlich des Äquators zu finden sind. Es sind außerdem auf jedem Kontinent Gesteinsressourcen vorhanden, wobei die Vorkommen in ihrer Häufigkeit stark variieren.

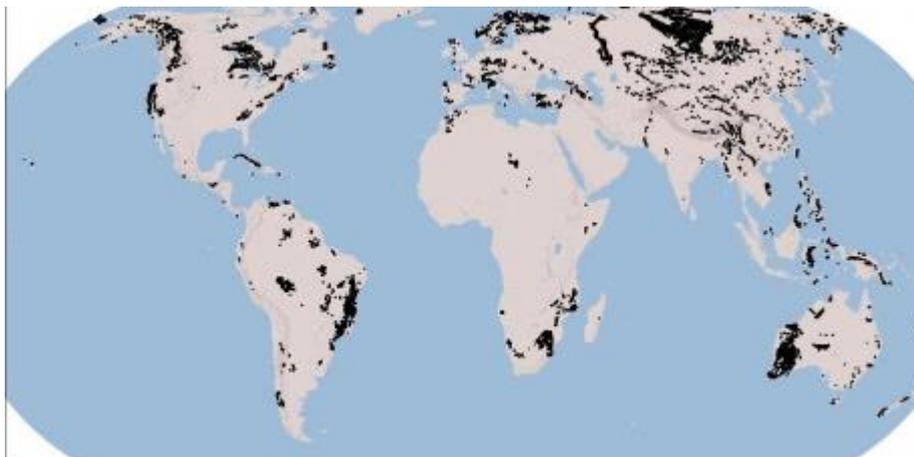


Abbildung 4 Standorte des Ausgangsgesteins nach (Moosdorf et al., 2014)

Da die Verfügbarkeit der Gesteine nicht der einzige relevante Faktor ist, ist es ebenfalls wichtig zu prüfen, wo diese eine effektive Verwitterung ermöglichen könnten. Abbildung 5, ebenfalls aus Moosdorf et al., (2014) zeigt potenzielle CO₂-Sequestrierungsraten pro Tonne Gestein in zwei Szenarien: einem optimistischen und einem pessimistischen. Der Vergleich der Abbildung 4 und

Abbildung 5 verdeutlicht, dass nicht alle Gebiete mit verfügbarem Gestein auch effizient CO₂ binden können und umgekehrt. Aus dem Vergleich der Karten lässt sich ableiten, dass insbesondere in Zentraleuropa, im südlicheren Teil Nordamerikas, in Mittelamerika, in Teilen Südamerikas sowie in großen Teilen von China und Japan Potenzial für ERW besteht.

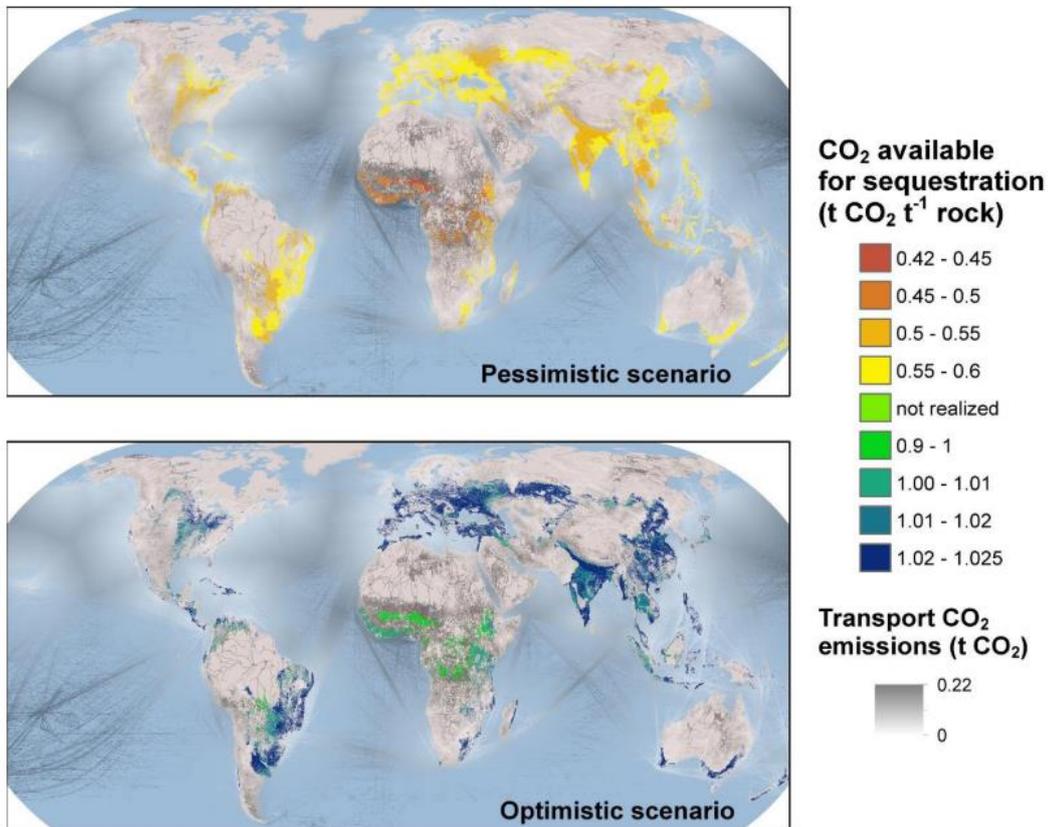


Abbildung 5 Verfügbares CO₂ für die Sequestrierung in den Anwendungsgebieten. Die Emissionen durch den Transport sind zum Vergleich dargestellt. (Moosdorf et al., 2014)

In der Studie von Moosdorf et al., (2014) wurden, wie in Abbildung 5 dargestellt, die Transportemissionen, sowie die Emissionen aus dem Abbau und dem Mahlen von Gestein untersucht. Die Ergebnisse wurden in zwei Szenarien, einem optimistischen und einem pessimistischen, präsentiert. Es zeigt sich, dass der Abbau des Gesteins vergleichsweise geringe Emissionen verursacht. Dabei werden in beiden Szenarien 7 kg CO₂ pro Tonne Gestein emittiert. Beim Mahlen des Gesteins variieren diese Werte zwischen 70 kg im optimistischen und 220 kg im pessimistischen Szenario und das zeigt, dass die Mahlung des Gesteins höhere Emissionen verursacht.

Die Emissionen, die durch den Transport entstehen, sind schwieriger zu quantifizieren und hängen stark vom gewählten Transportmittel ab. Der Einfluss ist aber deutlich höher, zum Beispiel

verursacht der Straßentransport Emissionen zwischen 59 und 105 g CO₂ pro km je Tonne transportierten Gesteins. Bei einem Transport von 50 Tonnen Gestein über 200 km würde dies im optimistischen Szenario 590 kg CO₂ und im pessimistischen Szenario etwas mehr als eine Tonne CO₂ entsprechen (Moosdorf et al., 2014) Diese deutlich höheren Emissionen, die beim Transport des Gesteins entstehen, wurden auch von zwei der befragten Expert:innen bestätigt. Beide betonen, dass die Nutzung lokaler Ressourcen entscheidend ist, da der Transport von Gesteinen über weite Strecken die Klimabilanz verschlechtert. Laut E2 haben Pilotstudien gezeigt, dass die Effizienz von ERW rapide abnimmt, wenn Gesteine über mehr als 200 Kilometer transportiert werden müssen (E2, Anhang 2). Daher ist es sinnvoll, lokal verfügbare Gesteine zu verwenden, auch wenn das Sequestrierungspotential geringer ist (E2, Anhang 2, E3, Anhang 3).

4.2.1 Gesteinsspezifische Faktoren und ihre Rolle bei der CO₂- Sequestration

Die CO₂-Sequestrierung durch Verwitterung wird maßgeblich von den Mineralien bestimmt, die in einem Gestein enthalten sind, sowie von der Stabilität dieser gegenüber chemischen Reaktionen. Im vorherigen Abschnitt (Kapitel 4.1) wurden verschiedene Gesteine hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe und deren Auswirkungen auf die Bodenqualität untersucht. Für die CO₂-Sequestrierung sind jedoch nicht alle diese Faktoren gleichermaßen relevant. Zusätzlich zur Stabilität und den mineralogischen Eigenschaften spielen auch der Mahlungsgrad des Gesteinsmehls sowie umweltbedingte Faktoren wie Temperatur und Wasserverfügbarkeit eine bedeutende Rolle. Im folgenden Abschnitt werden diese Einflüsse detaillierter betrachtet.

Für ERW werden verschiedene Arten von Gesteinen als besonders geeignet erachtet. Basalt wird aufgrund seiner agronomischen Vorteile, seiner gesetzlichen Zulassung in Deutschland für die Verwendung auf landwirtschaftlichen Flächen und der Möglichkeit für Landwirt:innen, CO₂-Zertifikate zu erhalten, besonders bevorzugt (E1, Anhang 1). Basalt hat eine ausgewogene Mischung aus Elementen, die bei der Verwitterung kein Ungleichgewicht in den für Pflanzen verfügbaren Nährstoffen verursachen, und enthält keine hohen Mengen an schädlichen Spurenelementen wie Nickel (E3, Anhang 3).

Ultramafische und mafische Gesteine, die reich an Magnesium und Eisen sind, werden ebenfalls als sehr gut geeignet erachtet (E2, Anhang 2). Diese Gesteine, wie Kimberlit und weitere Olivin-reiche Gesteine, können theoretisch mehr CO₂ pro Tonne binden als Basalt. Gesteine, wie Dunite, könnten laut E4 bis zu 850 Kilogramm CO₂ pro Tonne binden, im Vergleich zu 400 bis 450 Kilogramm bei

Basalt (E4, Anhang 4). Allerdings enthalten diese Gesteine hohe Konzentrationen an Nickel und Chrom, was ihre Anwendung auf Feldern einschränken könnte (E1, Anhang 1, E4, Anhang 4). E3 empfiehlt Gesteine, wie Dunite auf Grund ihrer hohen Konzentrationen an Schwermetallen und der gleichzeitig hohen Sequestrierungsrate, bei technischeren Anwendungen, wie dem Bau von Reaktoren oder der Nutzung alkalireichen Abwassers zur Zugabe zu den Ozeanen, zu testen (E3, Anhang 3). Daher ist Basalt trotz seines geringeren CO₂-Sequestrierungspotentials aufgrund seines niedrigeren Gehalts an schädlichen Spurenelementen und seines höheren Gehalts an nützlichen Nährstoffen wie Kalium und Phosphor für Pflanzen und für den Einsatz in der Landwirtschaft vorteilhaft (E4, Anhang 4).

In einer Studie von Taylor et al. wurde das CO₂ Sequestrationspotential von Basalt und Harzburgiten in den Tropen (30°N bis 30°S) untersucht (Taylor et al., 2016). In den aufgeführten Simulationen zeigt sich ebenfalls, dass potentiell Hunderte von Petagramm (1×10^{15} g) CO₂ bis 2100 gebunden werden könnten. Der mittlere CO₂-Verbrauch durch terrestrische Verwitterung steigt in Richtung eines Maximums, wenn die Gesamtmenge des aufgebrauchten Gesteins zunimmt, wobei Olivinreiche Harzburgite etwa doppelt so effektiv sind wie Basalt bei vergleichbaren Anwendungsraten. Die doppelte Effektivität der Harzburgite sieht man im RCP4,5 Szenario mit einer Ausbringrate von 5 kg Gestein pro Quadratmeter in der Abbildung 6.

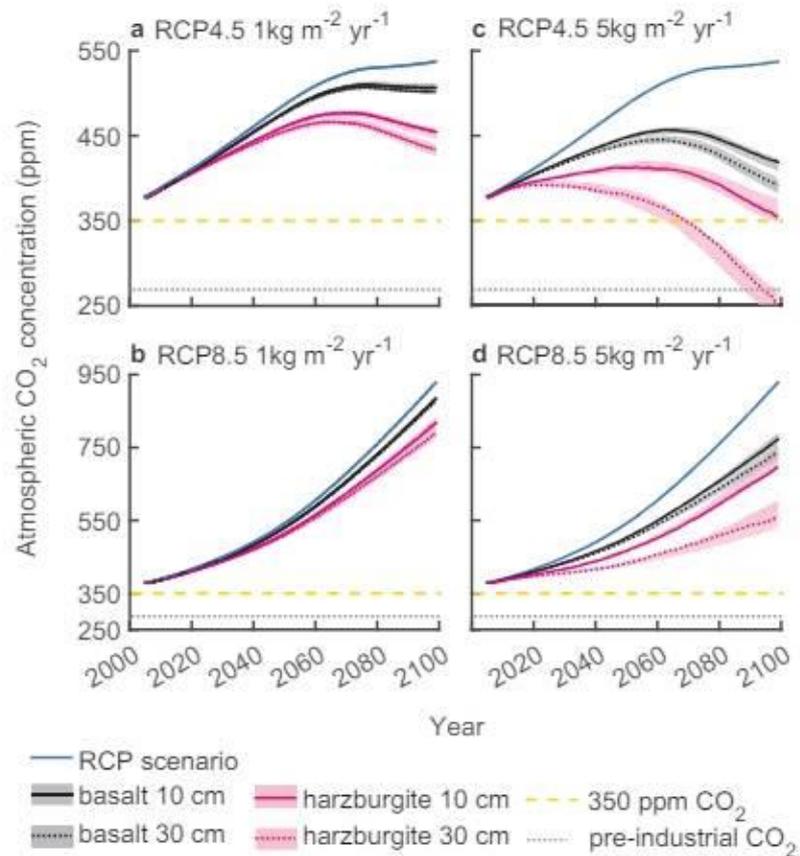


Abbildung 6 ERW senkt das atmosphärische CO₂ im Zuge des prognostizierten Klimawandel des 21. Jahrhunderts (Taylor et al., 2016)

Abbildung 6 stellt die mögliche Reduzierung des atmosphärischen CO₂-Gehalts im Zusammenhang mit den projizierten Klimaveränderungen des 21. Jahrhunderts dar (Taylor et al., 2016). In der Abbildung 6 wird das Ziel, dass das CO₂-Niveau unter 350 ppm sinken muss, damit weitere Klimaauswirkungen wie extreme Wetterereignisse und der Anstieg des Meeresspiegels vermieden werden, durch die gelbe Linie dargestellt. Die Diagramme zeigen die Auswirkungen der Zugabe von Basalt und Harzburgiten zu tropischen Verwitterungshotspots auf 20 Millionen km². Bei einer niedrigen Zugaberate (1 kg m⁻² pro Jahr) und zwei Mischungstiefen (10 cm und 30 cm) wird die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre für (a) das RCP4.5-Szenario (mittleres Minderungs-Szenario) und (b) das RCP8.5-Szenario (business-as-usual-Szenario) dargestellt. Die Diagramme (c) und (d) zeigen die Auswirkungen einer höheren Zugaberate (5 kg m⁻² pro Jahr) von den Gesteinen auf dieselben tropischen Gebiete. In der Abbildung ist zu erkennen, dass (c) das einzige Szenario ist, in dem das CO₂-Niveau unter 350 ppm sinkt (Taylor et al., 2016).

In der Untersuchung von Lewis et al. (2021) wurden sechs unterschiedliche Gesteine auf ihr Verwitterungspotential untersucht: Blue Ridge, Cragmill, Hillhouse, Oregon, Tawau und Tichum (Lewis et al., 2021). Bei dieser Studie wurde die 1-D RTM-Bodenprofil-ERW-Simulationen mit einem illustrativen Ton-lehmigen Agrarboden verwendet. Daraus ergab sich bei einer einmaligen Basisanwendungsrate von 50 t/ha zerkleinertem Gestein CDR-Potentiale zwischen 1,3 und 8,5 Tonnen CO₂ pro Hektar nach 15 Jahren Verwitterung. Auch bei dieser Studie stellt sich heraus, dass schnell verwitternde Minerale, die reich an Ca und Mg sind, wie Olivin und Augit, insbesondere in den frühen Stadien der Auflösung das CDR-Potential dominieren (Lewis et al., 2021).

In der Studie von Emmanuel aus dem Jahr 2018 wurden 2-D-Zellularautomatensimulationen zur Untersuchung des Einflusses von der Korngröße des Gesteins und der Gesteinszusammensetzung auf chemische Verwitterung und chemomechanische Kornablösung verwendet (Emmanuel, 2018). Größere Korngrößen zeigen eine geringere Verwitterungsrate, während diese von der Konzentration weniger reaktiver Mineralien nichtlinear abhängt. Das Modell bietet einen ersten Ansatz zur Simulation der Kopplung von physikalischen und chemischen Prozessen, jedoch ohne Standard-Kinetik-Formulierungen oder Berücksichtigung physikalischer Prozesse wie Diffusion und Fluidfluss.

Die Partikelgröße ist ein wesentlicher Faktor, der die Verwitterungsrate von Gesteinen gemäß Untersuchungen von Emmanuel (2018) stark beeinflusst. Feinkörnige Gesteine zeigen eine signifikant schnellere Verwitterung im Vergleich zu grobkörnigen Gesteinen. Eine Erhöhung der relativen Korngröße von 2 auf 64 führt bei den untersuchten Gesteinen zu einer Reduktion der Verwitterungsrate um 37%. Dies ist hauptsächlich auf die höhere Rate chemischer Verwitterung in feinkörnigen Gesteinen zurückzuführen, während mechanische Verwitterungskomponenten in beiden Fällen mindestens 33% zur Gesamtverwitterungsrate beitragen. Feinkörnige Gesteine zeigten eine höhere Frequenz von Ablösungen, bei denen kleine Körner in den meisten Zeitschritten abgelöst wurden, während bei grobkörnigen Gesteinen weniger häufige, aber deutlich größere Ablösungsereignisse beobachtet wurden. Die Simulationen verdeutlichen, dass das feinkörnige Gestein eine höhere Dichte an Korngrenzen aufweist, 39 % im Vergleich zu 7 % bei grobkörnigem Gestein, was zu einer erhöhten Auflösungsrate führt. Die Beziehung zwischen Korngröße und Verwitterungsrate war nichtlinear, und oberhalb einer bestimmten Korngröße nahm die Verwitterungsrate exponentiell ab. Dies legt nahe, dass der Einfluss der Korngröße auf die Verwitterung in realen Gesteinen auf kleine Skalen beschränkt sein könnte, insbesondere wenn die Dichte reaktiver Grenzen unter etwa 20% des gesamten Bereichs liegt (Emmanuel, 2018).

4.2.2 Einfluss von Kulturpflanzen auf die CO₂-Sequestration

Die Studie von Swoboda et al. (2022) bietet umfassende Einblicke in das CO₂-Sequestrationspotential verschiedener Gesteine in Kombination mit Pflanzenwachstum, sowie in die variierenden Verwitterungsraten unter diesen Bedingungen (Swoboda et al., 2022). Es wurden in dieser Studie 48 verschiedene Feldversuche in unterschiedlichen Ländern überprüft, daher sollte bei dem Vergleich beachtet werden, dass unterschiedliche Umwelteinflüsse nicht mit einbezogen wurden. Im Folgenden werden einige dieser Ergebnisse dargelegt. Olivin, angewendet mit Ryegrass auf einem sandigen Boden mit einem pH-Wert von 4,7 und einer Partikelgröße von etwa 7-600 µm, zeigte über einen Zeitraum von acht Monaten eine CO₂-Sequestrierung von etwa 23 t ha⁻¹ (Swoboda et al., 2022). Ein weiteres Experiment mit Olivin und minimaler Weizenpräsenz auf einem sandigen Podsol mit einem pH-Wert von 3,4 und einer mittleren Partikelgröße von 20 µm, ergab eine CO₂-Sequestrierung von ungefähr 16 t ha⁻¹ über einen Zeitraum von mehr als zwölf Monaten (Swoboda et al., 2022). Wollastonit, angewendet mit Sojabohnen oder Alfalfa auf einem lehmigen Sandboden mit einem pH-Wert von 6,6 und einer Partikelgröße unter 63 µm, führte über 3,5 Monate zu einer CO₂-Sequestrierung von etwa 9,6 t ha⁻¹ (Swoboda et al., 2022). In Kombination mit Bohnen oder Mais auf einem sauren Boden mit einem pH-Wert von 4,9 und einer Partikelgröße unter 25,9 µm konnte Wollastonit innerhalb von zwei Monaten etwa 30 t CO₂ ha⁻¹ sequestrieren (Swoboda et al., 2022). Basalt, appliziert zusammen mit Sorghum auf einem tonhaltigen Lehmboden mit einem pH-Wert von 6,6 und einer Partikelgröße unter 1250 µm, führte über zwölf Monate zu einer CO₂-Sequestrierung von etwa 2,36 t ha⁻¹. Diese Ergebnisse verdeutlichen die bedeutende Rolle von Kulturpflanzen bei der Verwitterung und der Freisetzung von Mineralien, insbesondere in der Rhizosphäre, der obersten Bodenschicht (Swoboda et al., 2022).

Das Vorhandensein von Kulturpflanzen, insbesondere graminösen Arten wie Mais oder Weizen, führte zu einer erheblichen Steigerung der Freisetzung von Elementen wie Silizium, Calcium, Magnesium und Natrium aus Basalt im Vergleich zu kontrollierten Bedingungen ohne Pflanzen. Diese Effekte werden durch die zusätzliche Freisetzung von H⁺-Ionen während der Stickstoff-Fixierung durch Rhizobien (Bakterien), die mit Leguminosen (Hülsenfrüchtler) assoziiert sind, verstärkt. Diese Säurefreisetzung senkt den pH-Wert in der Rhizosphäre und beeinflusst maßgeblich die Bodenchemie und die Verwitterungsprozesse (Swoboda et al., 2022; Akter & Akagi, 2005; Haque et al., 2019).

In einer Langzeitstudie von Beerling et al. wurden Felder über einen Zeitraum von vier Jahren untersucht. Es wurden in drei von vier Jahren Mais und in einem der Jahre Soja angebaut. Die

Ergebnisse der Studie zeigen, dass die CO₂-Sequestrierungspotential-Rate im Jahr des Sojaanbaus in der Fruchtfolge (2019) am höchsten war (Beerling et al., 2024). Es wurde, wie in den vorherigen Studien, eine Korrelation mit einer signifikanten Versauerung in der Rhizosphäre erkannt, verursacht durch Stickstoff-fixierende Leguminosenwurzeln. Diese lokalisierte Versauerung trägt zur erhöhten Verwitterung von Gesteinen bei, was wiederum die CO₂-Sequestrierung unterstützt. Die Ergebnisse unterstützen ebenfalls die oben erwähnte Rolle von Pflanzenwurzeln, insbesondere von Leguminosen, bei der Modulation chemischer Prozesse im Boden, die für die CO₂-Sequestrierung relevant sind (Beerling et al., 2024).

4.2.3 Einfluss des Klimas auf das CO₂-Sequestrationspotential

Das Klima hat einen großen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Verwitterung. Das liegt daran, dass wie im Kapitel 2.1 "Chemische Reaktionen im Detail" erwähnt, die Verwitterung vor allem Wasser und auch Wärme benötigt. Diese entscheidenden Faktoren für die Wirksamkeit von ERW sehen auch die befragten Expert:innen als besonders relevant an (E1, Anhang 1, E3, Anhang 3). Bei trockenen Sommern und unzureichender Wasserversorgung löst sich das Gesteinsmehl beispielsweise nicht auf, wodurch die Reaktionen im Boden gehemmt werden (E1, Anhang 1). Hohe Temperaturen und Niederschläge fördern die Verwitterung, doch die natürlichen Niederschläge können auch durch Bewässerungssysteme ersetzt werden (E3, Anhang 3). Laut E3 sind die Verwitterungsprozesse außerdem in der Regenzeit besonders effektiv, selbst bei niedrigeren Temperaturen (E3, Anhang 3).

Die besten Klimabedingungen für ERW sind in warmen, feuchten Regionen mit hoher Luftfeuchtigkeit und viel Regen, wie in tropischen Klimazonen (E1, Anhang 1, E2, Anhang 2, E4, Anhang 4). In diesen Gebieten, wie beispielsweise in Brasilien oder Indien, ist die Verwitterung besonders effektiv (E1, Anhang 1). Allerdings bedeutet dies nicht, dass ERW in anderen Regionen nicht funktioniert. Es hängt jedoch stark von den jeweiligen Bedingungen ab, wie schnell und effizient die Verwitterung abläuft (E1, Anhang 1, E2, Anhang 2). In Europa wird beispielsweise viel Forschung betrieben, um herauszufinden, ob und wie gut die Verwitterung in gemäßigten oder mediterranen Klimazonen funktioniert. E4 meint, dass wenn ERW unter europäischen Bedingungen funktioniert, es in besser geeigneten Klimazonen noch effektiver sein wird (E4, Anhang 4). Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Beschaffenheit des Bodens. In Regionen mit sehr mineralarmen Böden, wie in Teilen Afrikas und in tropischen Gebieten, können diese Böden besonders von der

Zugabe von Mineralstaub profitieren, da dort bereits viele Nährstoffe verwittert und weggespült wurden (E4, Anhang 4).

Nicht nur die befragten Expert:innen betonen die Bedeutung des Klimas für eine effektive Verwitterung. Diese Erkenntnis wird auch durch Studien wie der von Li et al. (2016) gestützt. In dieser Studie wurden Daten aus 37 basaltischen Regionen weltweit untersucht, darunter 22 intraplatonische (inaktive) und 15 aktive Vulkanfelder. Dabei zeigte sich eine breite Variation sowohl bei der mittleren Jahrestemperatur, die zwischen -9 und 27 °C lag, als auch beim Abfluss, der Werte zwischen 74 und 2120 mm/Jahr aufwies. Letzterer ist relevant, da das Wasser, das über die Erdoberfläche fließt, die Produkte der Gesteinsverwitterung, einschließlich gebundenem CO₂, transportiert.

Es wurde keine signifikante Beziehung zwischen Temperatur und Niederschlag gemäß der Clausius-Clapeyron-Beziehung festgestellt. Dies könnte aber mit der Reaktivität von frisch ausgebrochenem Basalt und hydrothermalen Reaktionen zusammenhängen, die möglicherweise nicht direkt vom Klima abhängen. Obwohl aktive und intraplatonische Vulkanfelder ähnliche Temperaturverteilungen aufweisen, haben aktive Vulkanfelder einen höheren Abfluss. Es wurde eine starke Korrelation zwischen der CO₂-Sequestrationsrate (KCO₂) und der Temperatur gefunden, insbesondere in intraplatonischen Vulkanfeldern. In aktiven Vulkanfeldern ist die CO₂-Sequestrationsrate im Durchschnitt viermal höher als in intraplatonischen. Es gibt außerdem eine schwache Korrelation zwischen dem Abfluss und der CO₂-Sequestrationsrate, die stärker wird, wenn Unsicherheiten in den Daten ignoriert werden (Li et al., 2016).

4.2.4 Messmethoden von CO₂-Sequestrierung bei ERW

Zurzeit existieren mehrere Methoden zur Grundlage von MRV-Verfahren (Monitoring, Reporting, Verifikation) für die CO₂-Sequestrierung von ERW (Clarkson et al., 2024). Dazu gehören die Verfolgung von Mineralbestandteilen sowie die direkte Überwachung der Bildung und des Exports von Hydrogencarbonat. Diese Messmethoden werden in unterschiedlichen Kontexten angewendet, von Experimenten zur Untersuchung der Grundlagen der Verwitterung und Lösungskinetik bis hin zu Feldstudien, die reale Prozesse überwachen.

Für die geplante Entfernung von mehreren Gigatonnen CO₂ ist die Skalierbarkeit der ERW-Industrie von entscheidender Bedeutung (Clarkson et al., 2024). Dafür sind effiziente und zuverlässige Messmethoden unerlässlich. Derzeit gibt es aber noch Herausforderungen und Unsicherheiten. Aktuelle Modelle für die Verwitterung sind oft eher mit geschlossenen Batchreaktoren als mit natürlichen Feldbedingungen vergleichbar. Große Unsicherheiten bestehen in Kernparametern wie

der Verwitterungskinetik von Mineralien. Modelle, die unter bestimmten experimentellen Bedingungen kalibriert wurden, haben unterschiedliche Erfolge bei der Vorhersage empirischer Datensätze in anderen Anwendungen.

In der folgenden Tabelle 1 werden die unterschiedlichen Messmethoden, die in der Untersuchung von Clarkson et al. ausgeführt wurden, beschrieben und die jeweiligen Vor- und Nachteile dargelegt. Anschließend werden die derzeitigen Herausforderungen und Unsicherheiten bei der Messung von der CO₂-Sequestrierung bei ERW beleuchtet (Clarkson et al., 2024).

Tabelle 1: Übersicht der Messmethoden zur Bestimmung der CO₂-Entfernungskapazität von Gesteinsmehlen nach (Clarkson et al., 2024)

Phase	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Feste Proben	Analyse der Konzentrationen von Alkali- und Erdalkali-Oxiden zur Berechnung der CO ₂ -Entfernungskapazität	Schnelle Orientierungshilfe bei der Materialauswahl	Keine zeitliche Komponente, vollständige Verwitterung vorausgesetzt, spezifische Säuretypen und CO ₂ -Verluste unberücksichtigt
	Konzentration von Kationen in Boden-Gesteinsmehl-Mischungen zur Identifizierung von Kationenverlust	Übereinstimmung mit landwirtschaftlichen Praktiken, zeitlich integrierte Signale	Begrenzte Messgenauigkeit, Bodenheterogenität, spezifische Säuretypen und CO ₂ -Verluste unberücksichtigt
	Messung der Anreicherung von anorganischem Bodenkohlenstoff als Speicher für CO ₂	Möglichkeit zur Messung des erfassten und gespeicherten Kohlenstoffs, etablierte Protokolle	Keine Schätzung der Bikarbonat Aufnahme, auf Umgebungen mit Karbonatfällungen beschränkt, spezifische Säuretypen und CO ₂ -Verluste unberücksichtigt
	Quantifizierung der Kationen, die vorübergehend in Austauschstellen im Boden gespeichert sind	Auflösung von Unterschieden im Vergleich zu Gesamtfeststoffen	Nicht standardisierte chemische Behandlung, abhängig von Bodentypen, Annahme keiner Kationenauslaugung, Kationen im Grundwasser nicht erfasst
Flüssige Proben	Messung der Anreicherung von Verwitterungsprodukten in Flüssigproben	Präzise Identifizierung des Flusses von Verwitterungsprodukten, räumlich integrierte Einsicht	Übergang von Kationen in austauschbaren Anteil unberücksichtigt, begrenzte Skalierbarkeit, temporäre Schwankungen können Signale verfälschen
	Quantifizierung der Auflösung von nicht-kohlensäurehaltigen Säuren und Salzeinträgen	Identifikation von nicht-kohlensäurehaltigen Säuren und anderen Kationenquellen	Begrenzte Skalierbarkeit, temporäre Schwankungen können Ergebnisse beeinträchtigen

	Messung der Ansammlung von Bikarbonaten in Flüssigproben	Direkte Messung des Kohlenstoffexports	Arbeits- und fachintensiv, temporäre Schwankungen und Atmung können Ergebnisse verzerren
	Indirekte Messung der Gesamtionenaktivität in flüssigen Proben durch Sensoren	Potenziell genaue Ergebnisse bei korrekter Kalibrierung	Erfordert Kalibrierung der elektrischen Leitfähigkeit auf Alkalität oder Kationenkonzentrationen
	Nutzung stabiler Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope, Radiokarbon und radiogenes Strontium	Aufschluss über die Zusätzlichkeit von Kohlenstoff aus nicht- CO ₂ -Quellen	Kostenintensiv, komplexe Interpretation der Ergebnisse
	Nutzung neuer Isotope (Li, Mg, Ca, Si, stabiles Sr)	Detaillierte Informationen über Reaktionsprozesse und Herkunft der Elemente	Kostspielig, erfordert komplexe Dateninterpretation
Gasförmige Proben	Messung des CO ₂ -Ausstoßes im Bodensystem	Potenziell direkte In-situ-Messung der CDR, Kombination mit anderen Treibhausgasflüssen möglich	Zeitliche Schwankungen können Signale verfälschen, stark vom organischen Kohlenstoffkreislauf dominiert

4.2.4.1 Unsicherheiten und Herausforderungen bei CDR-Schätzungen

Hohe Anwendungsraten von 50 bis 100 Tonnen pro Hektar sind typisch für die meisten laufenden ERW-Experimente, um klare Signale zu erhalten (Swoboda et al., 2022). Solche großen Mengen können jedoch, insbesondere wenn sie oberflächlich aufgetragen oder nur in einer flachen Bodenschicht (0–10 cm) gemischt werden, Alkalinitätshotspots bei der Auflösung erzeugen. Dies kann die Mikro- und Makroporen-Sättigungszustände signifikant verändern und die Auflösungsgeschwindigkeit verlangsamen (Swoboda et al., 2022). Daher könnte die Extrapolation der CO₂-Absorptionsraten aus solch hohen Anwendungsmengen fehleranfällig sein (Swoboda et al., 2022).

Temporale Unsicherheit ist eine der größten Einschränkungen für ERW-Messansätze, da die Verwitterung von Mineralien ein fortlaufender Prozess ist und CO₂-Entfernungen über Jahrzehnte bis Jahrhunderte hinweg erfolgen können. Nur Festphasenmessungen liefern ein zeitlich integriertes Maß für die Verwitterung (Kanzaki et al., 2022). Es gibt eine räumliche und zeitliche Überlappung zwischen Mineralauflösung, Transport und Speicherung (Kanzaki et al., 2022). Klare regulatorische Richtlinien sind erforderlich, um festzulegen, zu welchem Zeitpunkt ein Zertifikat bezüglich der Messung am Verwitterungsort ausgestellt werden kann (Kanzaki et al., 2022).

Die langfristige Nutzung von chemischen, stickstoff- und phosphorhaltigen Düngemitteln in nährstoffarmen Böden kann die Nachverfolgung von ERW erschweren und die Effizienz der Kohlenstoffdioxid-Entfernung (CDR) verringern (Andrews & Taylor, 2019). Dies liegt daran, dass solche Düngemittel zur Bildung starker Mineralsäuren wie Salpeter- und Phosphorsäure führen können. Auch Schwefelsäure kann in bestimmten ultramafischen Gesteinstypen mit Sulfidmineralien vorkommen (Relph et al., 2021). Zusätzlich tragen organische Säuren, die durch organische Düngemittel oder das Vorhandensein von Huminsäuren entstehen, zur Verwitterung bei und stellen eine Herausforderung für die CDR-Schätzungen dar (Basak et al., 2017; Swoboda et al., 2021; Busato et al., 2022).

Starke Mineralsäuren sind deutlich saurer als Kohlensäure und fördern die Mineralverwitterung ohne gleichzeitige CO₂-Sequestrierung (Hamilton et al., 2007; Perrin et al., 2008; Larkin et al., 2022). Daher ist die genaue Quantifizierung der, durch starke Säuren verursachten, Verwitterung entscheidend für das Verständnis der Gesamtkohlenstoffbilanz (Dietzen & Rosing, 2023).

Die Verwitterung von Gesteinsmehl kann zur Freisetzung von Silizium, Aluminium, Eisen und Kationen führen, was die Bildung sekundärer Minerale wie authigene Tone, amorphe Silikate, Metalloxide und Oxyhydroxide fördert. Diese Mineralien bilden sich abhängig von der Verwitterungskongruenz, die beschreibt, wie vollständig ein Mineral gelöst wird und die Verwitterungsprodukte in Lösung gehen (Oelkers et al., 2019). Die Bildung sekundärer Minerale wird durch Verwitterungskinetik, Umgebungsbedingungen wie pH, eH, Niederschlag sowie die Porosität und Permeabilität des Gesteins kontrolliert. Sie können die Verwitterungsraten durch Überziehen von Primärmineralen verringern, wobei der Einfluss kontextabhängig ist (Köhler et al., 2010; Schuiling et al., 2011).

Neben der Erhöhung der Verwitterungsraten können sekundäre Minerale auch die Reaktionskinetik erhöhen oder durch Oberflächenpassivierung als negativer Rückkopplungseffekt auf die CDR-Rate wirken. Sie erhöhen zudem die Kationenaustauschkapazität des Bodens und beeinflussen die Identifizierung von Verwitterungssignalen sowie den Gesamtkohlenstoffexport (Harrington et al., 2023). Authigene Tonminerale können zu CO₂-Ausgasung führen, ein Phänomen bekannt als "reverse weathering", das für globale Kohlenstoffkreisläufe von Bedeutung ist (Fuhr et al., 2022; Bayon et al., 2022). Die genaue Rolle von reverse weathering in terrestrischen Böden und bei Anwendungen von ERW ist noch nicht ausreichend beforscht (Renforth & Campbell, 2021).

Die Vegetation stellt eine unmittelbare Komplikation für CDR-Schätzungen dar, da sie selektiv Verwitterungsprodukte aus der Lösung entfernt (Shao et al., 2016; Reershemius et al., 2023). Zur

vollständigen Verwitterungsmassenbilanz muss die Vegetation beprobt werden, um den Verlust an Kationen aus dem System abzuschätzen (Shao et al., 2016; Reershemius et al., 2023). Eine Nichtberücksichtigung dieses Kationenverlusts kann zu einer Unterschätzung der durch Gesteinsmehlauflösung freigesetzten Kationen führen. Obwohl die Pflanzenaufnahme im Vergleich zur Kationenfreisetzung durch Verwitterung von Basaltmehl in ERW-Feldversuchen mit Mais/Soja und Miscanthus im mittleren Westen der USA relativ gering ist (Kantola et al., 2023), bleibt die Überwachung der Vegetationschemie wichtig für das Verständnis der Gesundheitsrisiken durch Metalle aus Gesteinsmehlen (Dupla et al., 2023). Standardisierte agronomische Praktiken sind erforderlich, um die Metallspeicherung in Pflanzen zu berücksichtigen und das Expositionsrisiko zu verringern (Brune et al., 1995; Thomas & Reid, 2020). Die Entfernung von Flüssigkeiten aus dem Boden durch die Vegetation erschwert außerdem die Probenahme von Flüssigkeiten im Feld und trägt zur Unsicherheit bei Fließratenberechnungen bei. Die Auswirkungen der Kationenentfernung durch Vegetation auf den Kohlenstoffkreislauf des Gesamtsystems sind derzeit wenig erforscht (Britto & Kronzucker, 2008; Amann & Hartmann, 2022). Es ist wichtig, Raum- und Zeitaspekte zu berücksichtigen, da die Verfügbarkeit von Kationen in der Vegetation kurzfristig ist und Kationen in Fällen zurückgeführt werden können, in denen die Vegetation, oder zumindest der Großteil ihrer Biomasse, nicht aus dem System entfernt wird (Banwart et al., 2009).

5 Diskussion

5.1 Interpretation und Bewertung der Ergebnisse

Diese Arbeit hat das Ziel die Auswirkungen von ERW auf die Bodenqualität und das CO₂-Bindungspotential zu untersuchen. Dabei wurden die folgenden Forschungsfragen untersucht: „Welche Faktoren beeinflussen die Effizienz von ERW als Methode zur CO₂-Sequestrierung und wie können diese optimiert werden?“ und „Wie beeinflusst ERW die Bodenqualität von landwirtschaftlichen Flächen?“. Die aus dieser Arbeit resultierten Ergebnisse werden folgend dargestellt und diskutiert.

Die Anwendung von ERW zeigt in den untersuchten Studien und gemäß den interviewten Expert:innen signifikante positive Effekte auf die Bodenchemie und -qualität. Verschiedene Faktoren werden beeinflusst, sodass ERW möglicherweise nicht nur den Boden und langfristig die Bodenqualität durch u.a. zusätzliche Minerale und eine Erhöhung des KAKs positiv beeinflusst, sondern auch das Wachstum und die Erträge von Pflanzen verbessern könnte. Allerdings ist bei der Implementierung von ERW besondere Sorgfalt geboten, da je nach verwendetem Gestein größere Mengen an Schwermetallen vorhanden sein könnten, die gesundheitliche Schäden entlang der Nahrungskette verursachen könnten. E4 hat hierzu angemerkt, dass diese Gefahr möglicherweise überschätzt wird und dass die tatsächliche Menge an Schwermetallen, die von den Pflanzen aufgenommen werden, einer sorgfältigen Untersuchung bedarf. Aufgrund der unterschiedlichen Reaktivität der Minerale können die Schwermetalle variierende Grade der Bioverfügbarkeit aufweisen. (E4, Anhang 4). E3 schlägt eine Lösungsstrategie vor, um Gestein mit hohem Sequestrierungspotential zu nutzen und gleichzeitig die negativen Auswirkungen von Schwermetallen im Boden zu vermeiden. Diese Strategie besteht in der Kombination von Pflanzenkohle und ERW, da Pflanzenkohle die Fähigkeit besitzt, Schwermetalle zu adsorbieren (E3, Anhang 3). E3 weist jedoch darauf hin, dass diese Methode derzeit noch erforscht wird und daher noch nicht als gesichert gelten kann (E3, Anhang 3).

Im Hinblick auf die menschliche Gesundheit sollte die Ausbringung von Gesteinsmehl sorgfältig betrachtet werden. Die hohe Staubentwicklung, die durch das Gesteinsmehl entsteht, kann potenziell gesundheitsschädlich sein, wenn keine adäquaten Schutzmaßnahmen ergriffen werden (E2, Anhang 2). Eine Lösung hierfür könnte laut E2 eine Pelletierung des Gesteins sein, da die Pellets dann erst beim Kontakt mit Regen aufplatzen würden und somit keine Staubentwicklung mehr entstehen würde (E2, Anhang 2).

Da die Implementierung von ERW besonders in der Landwirtschaft als sinnvoll empfunden wird, müssen auch die Landwirt:innen von dieser Methode überzeugt werden. Verschiedene Interviewpartner:innen betonten, dass die Wirtschaftlichkeit der Erzeugnisse maßgeblich durch staatliche Subventionen sichergestellt wird und daher ein klar definiertes Geschäftsmodell benötigt wird, um neue Methoden wie ERW anzuwenden (E1, Anhang 1, E3, Anhang 3, E4, Anhang 4). Besonders in wirtschaftlich herausfordernden Regionen wie Griechenland könnten finanzielle Anreize einen direkten Einfluss auf die Akzeptanz haben (E4, Anhang 4). Empfehlungen anderer Landwirt:innen könnten für die Akzeptanz ebenfalls eine zentrale Rolle spielen. Die Verbreitung von ERW durch positive Erfahrungen und Empfehlungen wurde als effektiver Weg zur Förderung angesehen (E1, Anhang 1, E2, Anhang 2).

Ein weiteres Hindernis für die Akzeptanz von ERW könnte die gegenwärtige weitverbreitete Verwendung von Kunstdüngern darstellen. Da handelsübliche Kunstdünger in der Regel spezifisch auf die Nährstoffbedürfnisse der jeweiligen Böden abgestimmt sind, könnte der Ersatz dieser durch ERW herausfordernd sein, da ERW eine solch präzise Nährstoffanpassung nicht gewährleisten kann (E2, Anhang 2). In der ökologischen Landwirtschaft findet Gesteinsmehl bereits Anwendung als Dünger, weshalb die Akzeptanz von ERW in diesem Sektor möglicherweise höher sein könnte (E2, Anhang 2). Dies betrifft laut E2 aber häufig nicht den Globalen Süden, in kleinbäuerlichen Umgebungen, wo sich Landwirt:innen keine Düngemittel leisten können und Gesteinsmehl eine sehr gute Alternative darstellt, da die Böden starke Nährstoffmängel haben. ERW kann in diesen Regionen einen großen sozioökonomischen Effekt haben, da die Menschen höhere und stabilere Ernten haben können und die Böden nachhaltiger nutzen können (E2, Anhang 2).

Zudem empfiehlt E3 sich auf die Co-Benefits von ERW zu konzentrieren, wie die potenzielle Verbesserung der Erträge und die Möglichkeit, Kalk zu ersetzen, um die Landwirt:innen zu überzeugen (E3, Anhang 3). Die Auswirkungen von ERW auf Ernterträge und Bodenqualität wurden ebenfalls diskutiert. Insbesondere in Regionen mit einem Mangel an Mikronährstoffen könnte ERW zusätzliche Rechtfertigungen für seine Anwendung bieten. Dies könnte beispielsweise in einigen tropischen Regionen wie Brasilien der Fall sein, wo die direkte Beobachtung einer Verbesserung der Ernterträge durch ERW die Effektivität dieser Methode verdeutlichen könnte (E4, Anhang 4). Dies wäre jedoch in vielen europäischen Ländern nicht der Fall, da ein geringerer Bedarf an zusätzlichen Mikronährstoffen besteht, wie zum Beispiel in Griechenland (E3, Anhang 3; E4, Anhang 4).

Ein weiterer Aspekt, der die Effektivität von ERW beeinflusst, ist das Potential zur CO₂-Sequestrierung, das stark von den mineralogischen Eigenschaften des verwendeten Gesteins abhängt. Es werden in der Anwendung momentan Gesteine präferiert, die eine ausgewogene

Mineralzusammensetzung haben und einen geringen Anteil von Olivin enthalten. Dies führt in vielen Fällen zu einer geringeren CO₂-Sequestrierung, da Olivin-armes Gestein langsamer verwittert als Olivin-reiches. Die bereits erwähnte Kombination von ERW und Pflanzenkohle könnte nicht nur zur Reduzierung von Bedenken bezüglich Schwermetallen beitragen, sondern auch das Potential zur CO₂-Sequestrierung, durch die Verwendung von Gestein mit einem hohen Olivin-Gehalt, erhöhen.

Zusätzlich zur Auswahl des Gesteins spielt auch der Mahlungsgrad des Gesteinsmehls sowie Umweltfaktoren wie Temperatur und Wasserverfügbarkeit eine entscheidende Rolle für die Effektivität der CO₂-Sequestrierung. Optimale Bedingungen, wie sie beispielsweise in tropischen Regionen mit warmem Klima, hoher Niederschlagsmenge, sauren und sandigen Böden und reichen Gesteinsvorkommen in der Nähe vorliegen, sind insbesondere in Ländern wie Indien und Brasilien gegeben. Daher sollten Regionen wie diese priorisiert behandelt werden. Es ist zu beachten, dass die Umsetzung an Standorten mit weniger optimalen Bedingungen, bei denen die Sequestration länger dauern könnte, dennoch funktioniert. E2 erwähnt in diesem Zusammenhang, dass wenn das Gestein einmal in den Boden eingebracht ist, dies unvermeidlich den Verwitterungsprozessen unterliegt, die je nach Klimazone unterschiedlich schnell ablaufen, aber letztendlich immer stattfinden (E2, Anhang 2). Viele Studien und Feldversuche werden derzeit in europäischen Regionen wie Großbritannien, Deutschland und Frankreich durchgeführt und zeigen positive Ergebnisse (E3, Anhang 3).

Die Gesteinsverfügbarkeit vor Ort ist für die Effektivität von ERW einer der wichtigsten Aspekte, da beim Transport großer Gesteinsmengen ein erheblicher CO₂-Ausstoß entstehen würde, der von der CO₂-Bilanz abgezogen werden müsste, was die Effektivität von ERW verringert. Die Verfügbarkeit von Gestein ist auf allen Kontinenten gegeben, jedoch variiert sie stark. Aus diesem Grund sollten Regionen bevorzugt werden, in denen der Transportweg für das Gestein nicht mehr als 200 Kilometer beträgt. E4 verdeutlicht in diesem Zusammenhang außerdem, dass die Forschung zu ERW noch viele ungeklärte Fragen aufweist und sich in einer Phase befindet, in der die praktische Umsetzung untersucht wird. Orte, die theoretisch für die Verwitterung geeignet wären, verfügen nicht immer über die erforderliche Infrastruktur oder die finanziellen Mittel, was ebenfalls berücksichtigt werden muss. (E4, Anhang 4).

Ein weiterer limitierender Faktor für die CO₂-Entfernung ist derzeit der Ausstoß von CO₂, der neben dem Transport, hauptsächlich durch das Mahlen des Gesteins entsteht. Die Untersuchungen von Moosdorf et al. zeigen, dass die CO₂-Emissionen, die mit dem Abbau, dem Mahlen und der Ausbringung von Gesteinsstaub verbunden sind, die Effizienz der CO₂-Bindung durch ERW je nach

Korngröße um 10-25 % verringern könnten (Moosdorf et al., 2014). Dies könnte sich jedoch ändern, wenn die Energie für das Mahlen aus erneuerbaren Quellen stammt und der Transport nachhaltiger gestaltet wird. Mögliche Ansätze hierfür könnten die Nutzung von Bahnschienen und die Weiterentwicklung nachhaltigerer LKW sein, die beispielsweise mit grünem Wasserstoff betrieben werden.

Eine bedeutende Herausforderung bei ERW, möglicherweise sogar die größte, besteht darin, das entfernte CO₂ genau zu messen. Aktuell existiert keine Methode, die die sequestrierte Menge CO₂ im gesamten Prozess vom Boden bis in die Flüsse und Meere vollständig nachweisen kann. Dies wird von den befragten Expert:innen kritisch betrachtet, wobei sie zugleich zukünftige Verbesserungen optimistisch erwarten (E1, Anhang 1, E2, Anhang 2, E3, Anhang 3, E4, Anhang 4). E1 erklärt, dass die Untersuchung von Boden und Wasser aufgrund des offenen Systems herausfordernd ist, da Proben genommen werden können, aber der Verlauf ihrer Wechselwirkungen schwer nachvollziehbar bleibt (E1, Anhang 1). E3 hebt außerdem die Unsicherheiten hervor, die mit der Zeitverzögerung zwischen Gesteinsauflösung und CO₂-Bindung im Boden verbunden sind (E3, Anhang 3). Die Messung der Alkalinität im Wasser, die das gebundene Bicarbonat repräsentiert, ist ein etablierter Ansatz, der jedoch durch die Sättigung der Kationenaustauschkapazität des Bodens und die Bildung von Tonmineralen beeinflusst wird, wie E3 betont (E3, Anhang 3). Diese Aspekte werden von E4 ergänzt, die Cascade Climate erwähnt, eine Organisation, die Richtlinien für die Messung von ERW entwickelt, da die aktuellen Methoden zur CO₂-Sequestrierung noch weitere Forschung erfordern. Sowohl E2 als auch E3 bringen den Zukunftsoptimismus zum Ausdruck, dass durch Projekte wie Cascade bessere Vorhersagen zur Geschwindigkeit und Effizienz der CO₂-Sequestrierung durch ERW möglich sein könnten (E3, Anhang 3; E4, Anhang 4). E1 und E3 sehen auch großes Potential bei der Nutzung von verbesserten Modellierungstechniken, die in der Zukunft eine größere Rolle in der Messung des sequestrierten CO₂s spielen könnten (E1, Anhang 1; E2, Anhang 2). E3 betrachtet die Nutzung von Isotopen für genauere Messungen als einen bedeutenden Schritt zur Weiterentwicklung zukünftiger Messmethoden (E3, Anhang 3). E4 unterstreicht die Notwendigkeit für klare Richtlinien und verbesserte Messmethoden, um die Herausforderungen von der Messung der CO₂-Sequestrierung durch ERW zu bewältigen (E4, Anhang 4). Clarkson et al. (2024) empfiehlt in diesem Zusammenhang, mehrere Methoden kombiniert zu nutzen, um diese Probleme zu mindern oder zu beseitigen. Diese Unsicherheit erschwert die uneingeschränkte Akzeptanz der Methode, da weniger CO₂ gespeichert werden könnte als erwartet. Daher ist weitere Forschung in diesem Bereich notwendig (Clarkson et al., 2024).

Die aktuellen Kosten für ERW sind erheblich, jedoch besteht die Möglichkeit einer Kostensenkung durch eine umfassende Skalierung. Die Messung stellt einen großen Teil der Kosten dar, was derzeit schwer zu reduzieren ist, aber in Zukunft billiger werden könnte, insbesondere in Ländern wie Indien und Brasilien im Vergleich zu Deutschland oder den USA. Aktuell belaufen sich die ERW-Kosten laut Experten wie E1 auf etwa 200 Euro pro Tonne, mit der Möglichkeit einer Kostensenkung durch eine Skalierung (E1, Anhang 1). Kohlenstoffkredite spielen eine entscheidende Rolle für die Wirtschaftlichkeit von ERW. Laut E1 sollten Kohlenstoffkredite bei etwa 200 Euro pro Tonne sequestriertem CO₂ liegen, um ein tragfähiges Geschäftsmodell zu ermöglichen (E1, Anhang 1). Die derzeit hohen Kosten für Kohlenstoffkredite für ERW sind jedoch hauptsächlich auf Monitoring-, Reporting- und Verifikationskosten zurückzuführen. Es wird erwartet, dass diese Kosten in den nächsten Jahren sinken könnten, unterstützt durch Initiativen wie Cascade (E4, Anhang 4).

Ein weiterer Aspekt, der zwar keine direkten Kostensenkungen bei ERW zur Folge hätte, jedoch potenzielle Einsparungen für Landwirt:innen bedeuten könnte, ist die Möglichkeit des Ersatzes von Kalk oder künstlichen Düngemitteln. Diese Option ist stark von der spezifischen Gesteinsart abhängig und könnte die Entscheidungsfindung von Landwirt:innen bezüglich der Nutzung von ERW beeinflussen (E1, Anhang 1). Es wird außerdem jährlich etwa eine Million Tonnen CO₂ durch die Produktion von landwirtschaftlich genutztem Kalk in Deutschland emittiert. ERW bietet möglicherweise das Potential, diese Produktion zu ersetzen und somit erhebliche Emissionseinsparungen zu erzielen, obwohl dies nicht in den Cradle-to-Grave-Berechnungen von ERW berücksichtigt werden könnte (E1, Anhang 1).

5.2 Implikationen für die Praxis und Politik

Die CO₂-Sequestrierung durch ERW ist aufgrund der derzeitigen Messmethoden schwer zu quantifizieren, was sowohl für die Praxis als auch für die Politik eine Herausforderung darstellt. Um die Methode vollständig anerkennen zu können, ist es essenziell, diese Messprobleme zu klären.

Ein zentraler Punkt, der sich in der Politik ändern muss, besteht darin, verstärkt auf wissenschaftliche Expertise zu hören, insbesondere im Bereich der CO₂-Entfernungsmethoden (CDR), und Expert:innen mit fundiertem Wissen in Entscheidungsprozesse einzubinden (E2, Anhang 2; E3, Anhang 3, E1, Anhang 1; E4, Anhang 4). E3 betont die Herausforderungen bei der Änderung bestehender Richtlinien und die mangelnde wissenschaftliche Vertretung in Diskussionen zur

Umsetzung von CDR (E3, Anhang 3). E4 weist ebenfalls auf die regulatorischen Hindernisse in Deutschland hin, die Forschungsprojekte erschweren (E4, Anhang 4).

E1 betont die Bedeutung politischer Gespräche und die Unterstützung durch Ministerien und Politiker:innen für die Implementierung von ERW (E1, Anhang 1). Es besteht eine Notwendigkeit von Investitionen und Unterstützung, wie Subventionen, für die Umsetzung von ERW sowie die Erzielung von Einnahmen aus CO₂-Zertifikaten (E1, Anhang 1). Dafür sollten ebenfalls die rechtlichen Aspekte wie Fragen zum Bergbau und potenziellen Ernteschäden durch die Anwendung von Gesteinsmehl geklärt werden, besonders eine Entschädigung für mögliche Verluste von Landwirt:innen sollte ein zentraler Punkt sein (E1, Anhang 1, E2, Anhang 2). Auch die EU-Regulierungen für die Vorschriften für Bodenverbesserungen sind momentan noch nicht praxisnah (E3, Anhang 3). Dies zeigt sich auch bei der Festlegung von Grenzwerten für anorganische Düngemittel (E3, Anhang 3), aber auch die aktuellen Vorgaben für Schwermetalle in Düngemitteln sollten überprüft werden (E4, Anhang 4). Momentan gibt es eine Obergrenze für die Konzentration in Düngemitteln, jedoch wird nicht kontrolliert, wie viel tatsächlich auf den Feldern ausgebracht wird (E4, Anhang 4). Besonders die Regulierung der Nickelkonzentration und deren Auswirkungen auf ERW-Projekte werden diskutiert, wobei die Notwendigkeit präziser und praxisorientierter Richtlinien betont wird.

Neben Subventionen und anderen finanziellen Unterstützungen könnte ein weiterer Ansatz sein, die Kosten für das ausgestoßene CO₂ von Unternehmen zu erhöhen. Derzeit zahlen Unternehmen in Deutschland etwa 30 Euro pro Tonne CO₂, daher ist es momentan wirtschaftlicher diese Kosten zu übernehmen, anstatt 200 Euro pro Tonne für die Entfernung des CO₂s zu zahlen (E4, Anhang 4).

Eine Forschungslücke bei ERW besteht darin, dass umfassende Studien fehlen, welche die Unterschiede in der CO₂-Sequestrierung bei verschiedenen Mengen des ausgebrachten Gesteins systematisch untersuchen. Zukünftige Forschung könnte Experimente beinhalten, die im gleichen klimatischen Gebiet und mit dem gleichen Gestein durchgeführt werden, jedoch mit variierenden Mengen an ausgebrachtem Gestein. Diese Studien könnten wichtige Erkenntnisse darüber liefern, welche Mengen an Gestein am effektivsten für die CO₂-Sequestrierung sind und gleichzeitig Aufschluss darüber geben, ob es eine Sättigungsschwelle gibt, ab der kein zusätzliches CO₂ sequestriert werden kann. Solche Erkenntnisse wären eine fundierte Grundlage für die Optimierung von ERW-Strategien.

Trotz der Erkenntnisse, die aus dieser Arbeit zu den potenziellen Auswirkungen von ERW auf die Bodenqualität und das CO₂-Reduktionspotential gewonnen wurden, sind mehrere Limitierungen

anzumerken. Die Hauptlimitierung dieser Arbeit liegt in der Nutzung einer unsystematischen Literaturrecherche und Expert:innen-Interviews als primäre Datenquellen. Obwohl diese Methoden wertvolle qualitative Einblicke und theoretische Grundlagen lieferten, könnten sie nicht die gleiche Detailtiefe und quantitative Genauigkeit bieten wie eigene Labor- oder Feldversuche. Dies könnte zu Einschränkungen in der Validität und der Präzision der gemachten Schlussfolgerungen führen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Begrenzung der Studie auf eine deskriptive Analyse und theoretische Bewertung. Ohne eigene experimentelle Datensätze besteht die Möglichkeit, dass wichtige Interaktionen zwischen Gesteinsarten, Bodentypen und klimatischen Bedingungen möglicherweise nicht vollständig berücksichtigt wurden.

Zusätzlich könnten potenzielle Bias-Effekte durch die Auswahl der Literaturquellen und der Expert:innen-Interviews auftreten, was die Repräsentativität der gesammelten Daten beeinträchtigen könnte. Trotz dieser Limitierungen bietet diese Arbeit einen wichtigen Schritt zur Erforschung der potenziellen Anwendungen von ERW im Kontext der Klimakrise und legt eine Grundlage für weiterführende Untersuchungen, die die identifizierten Limitierungen überwinden könnten.

6 Fazit

ERW bietet vielversprechende Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion. Die Auswahl verschiedener Gesteinsarten und ihre chemischen Reaktionen sind entscheidend für die Effizienz dieser Methode. Die Anwendung von ERW kann Umweltaspekte wie Bodenqualität und Pflanzenwachstum positiv durch pH-Wert-Veränderungen und der Mineralzufuhr beeinflussen. Die Skalierung von ERW steht jedoch vor Herausforderungen wie den Kosten für Gesteinsabbau, Transport und Vermahlung, sowie den CO₂-Emissionen. Die aktuellen Messmethoden zur CO₂-Sequestrierung durch ERW sind noch in der Entwicklung und erfordern weitere Forschung.

Viele Studien weisen darauf hin, dass sich ERW positiv auf die Bodenqualität landwirtschaftlicher Flächen auswirkt. Die Bodenqualität kann durch ERW auf verschiedene Weise verbessert werden. Das Einbringen von zerkleinertem Gestein kann den pH-Wert des Bodens erhöhen, was zur Neutralisierung saurer Böden führt, wodurch wiederum das Pflanzenwachstum und die Bodenqualität gefördert wird. Zudem werden durch ERW wichtige Mineralien freigesetzt, die die beiden genannten Aspekte ebenfalls positiv beeinflussen. Durch die Verbesserung der Böden kann ERW die Aktivität von Bodenmikroben fördern, die im Nährstoffkreislauf eine relevante Rolle spielen.

Es gibt unterschiedliche Faktoren, die die Effizienz von ERW als Methode zur CO₂-Sequestrierung beeinflussen. Diese können auf unterschiedliche Art und Weise optimiert werden. Klimatische Bedingungen wie Temperatur und Wasserverfügbarkeit, die Wahl und Feinheit des Gesteinsmehls, sowie die Bodenart sind entscheidend für die Effizienz von ERW. Magnesium- und eisenreiche Gesteine haben sich dabei als besonders wirksam erwiesen. Eine Optimierung könnte durch gezielte Auswahl und Verteilung dieser Gesteine, sowie den Einsatz effizienter Zerkleinerungstechnologien erfolgen. Zudem kann die Identifizierung optimaler geografischer Regionen die Effizienz steigern, indem unterschiedliche Bodenarten und deren Einfluss auf die Verwitterungsprozesse berücksichtigt und ERW-Methoden entsprechend angepasst werden. Eine optimale Region wäre beispielsweise Brasilien.

Zukünftige Forschung sollte die Effizienz von ERW unter verschiedenen klimatischen Bedingungen und Bodenarten optimieren. Besonders wichtig ist die Entwicklung verbesserter und kostengünstigerer Messmethoden für die CO₂-Sequestrierung, wie die Nutzung von Isotopen oder die Integration mehrerer Messmethoden, um genauere und verlässlichere Daten zu erhalten. Langfristige Feldversuche und groß angelegte Pilotprojekte sind notwendig, um die langfristigen Auswirkungen und die Nachhaltigkeit von ERW besser zu verstehen.

Literaturverzeichnis

- Akter, M., & Akagi, T. (2005). Effect of Fine Root Contact on Plant-Induced Weathering of Basalt. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(6), 861–871. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00121.x>
- Amann, T., & Hartmann, J. (2022). Carbon Accounting for Enhanced Weathering. *Frontiers in Climate*, 4. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.849948>
- Anda, M., Shamshuddin, J., & Fauziah, C. I. (2013). Increasing negative charge and nutrient contents of a highly weathered soil using basalt and rice husk to promote cocoa growth under field conditions. *Soil and Tillage Research*, 132, 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2013.04.005>
- Andrews, M. G., & Taylor, L. L. (2019). Combating Climate Change Through Enhanced Weathering of Agricultural Soils. *Elements*, 15(4), 253–258. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.4.253>
- Banwart, S. A., Berg, A., & Beerling, D. J. (2009). Process-based modeling of silicate mineral weathering responses to increasing atmospheric CO₂ and climate change. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2008GB003243>
- Basak, B. B., Sarkar, B., Biswas, D. R., Sarkar, S., Sanderson, P., & Naidu, R. (2017). Chapter Three - Bio-Intervention of Naturally Occurring Silicate Minerals for Alternative Source of Potassium: Challenges and Opportunities. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 141, pp. 115–145). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.016>
- Baumeister, R. F., & Leary, M. R. (1997). Writing Narrative Literature Reviews. *Review of General Psychology*, 1(3), 311–320. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.1.3.311>
- Bayon, G., Bindeman, I. N., Trinquier, A., Retallack, G. J., & Bekker, A. (2022). Long-term evolution of terrestrial weathering and its link to Earth's oxygenation. *Earth and Planetary Science Letters*, 584, 117490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117490>
- Beerling, D. J., Epihov, D. Z., Kantola, I. B., Masters, M. D., Reershemius, T., Planavsky, N. J., Reinhard, C. T., Jordan, J. S., Thorne, S. J., Weber, J., Val Martin, M., Freckleton, R. P., Hartley, S. E., James, R. H., Pearce, C. R., DeLucia, E. H., & Banwart, S. A. (2024). Enhanced weathering in the US Corn Belt delivers carbon removal with agronomic benefits. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(9). <https://doi.org/10.1073/pnas.2319436121>
- Beerling, D. J., Kantzas, E. P., Lomas, M. R., Wade, P., Eufrazio, R. M., Renforth, P., Sarkar, B., Andrews, M. G., James, R. H., Pearce, C. R., Mecure, J.-F., Pollitt, H., Holden, P. B., Edwards, N. R., Khanna, M., Koh, L., Quegan, S., Pidgeon, N. F., Janssens, I. A., ... Banwart, S. A. (2020a). *ARTICLE The potential for large-scale CO₂ removal via rock weathering on croplands.*
- Beerling, D. J., Kantzas, E. P., Lomas, M. R., Wade, P., Eufrazio, R. M., Renforth, P., Sarkar, B., Andrews, M. G., James, R. H., Pearce, C. R., Mecure, J.-F., Pollitt, H., Holden, P. B., Edwards, N. R., Khanna, M., Koh, L., Quegan, S., Pidgeon, N. F., Janssens, I. A., ... Banwart, S. A. (2020b). *ARTICLE The potential for large-scale CO₂ removal via rock weathering on croplands.*

- Beman, M. J., Arrigo, K. R., & Matson, P. A. (2005). Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature*, *434*(7030), 211–214. <https://doi.org/10.1038/nature03370>
- Braun, V., & Clarke, V. (2019). *Successful qualitative research a practical guide for beginners*.
- Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2008). Cellular mechanisms of potassium transport in plants. *Physiologia Plantarum*, *133*(4), 637–650. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01067.x>
- Brune, A., Urbach, W., & Dietz, K. -J. (1995). Differential toxicity of heavy metals is partly related to a loss of preferential extraplasmic compartmentation: a comparison of Cd-, Mo-, Ni- and Zn-stress. *New Phytologist*, *129*(3), 403–409. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb04310.x>
- Busato, J. G., Santos, L. F. dos, Monteiro de Paula, A., Fabríz Sodré, F., de Oliveira, A. L., Dobbss, L. B., Souza Martins, É. de, & Jindo, K. (2022). Can co-application of silicate rock powder and humic-like acids increase nutrient uptake and plant growth in weathered tropical soil? *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, *72*(1), 761–774. <https://doi.org/10.1080/09064710.2022.2078222>
- Clarkson, M. O., Larkin, C. S., Swoboda, P., Reershemius, T., Suhrhoff, T. J., Maesano, C. N., & Campbell, J. S. (2024a). A review of measurement for quantification of carbon dioxide removal by enhanced weathering in soil. *Frontiers in Climate*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1345224>
- Clarkson, M. O., Larkin, C. S., Swoboda, P., Reershemius, T., Suhrhoff, T. J., Maesano, C. N., & Campbell, J. S. (2024b). *A Review of Measurement for Quantification of Carbon Dioxide Removal by Enhanced Weathering in Soil*.
- d’Hotman, D. V. , & V. O. (1961). Soil rejuvenation with crushed basalt in Mauritius. *Int. Sugar J.*
- Dias, K. G. de L., Guimarães, P. T. G., do Carmo, D. L., Reis, T. H. P., & Lacerda, J. J. de J. (2018). Alternative sources of potassium in coffee plants for better soil fertility, productivity, and beverage quality. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, *53*(12), 1355–1362. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001200008>
- Dietzen, C., & Rosing, M. T. (2023). Quantification of CO₂ uptake by enhanced weathering of silicate minerals applied to acidic soils. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *125*, 103872. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103872>
- Dupla, X., Möller, B., Baveye, P. C., & Grand, S. (2023). Potential accumulation of toxic trace elements in soils during enhanced rock weathering. *European Journal of Soil Science*, *74*(1). <https://doi.org/10.1111/ejss.13343>
- Edwards, D. P., Lim, F., James, R. H., Pearce, C. R., Scholes, J., Freckleton, R. P., & Beerling, D. J. (2017). Climate change mitigation: Potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. In *Biology Letters* (Vol. 13, Issue 4). Royal Society. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0715>
- Emmanuel, S. (2018). Impact of grain size and rock composition on simulated rock weathering. *Earth Surface Dynamics*, *6*(2), 319–327. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-319-2018>

- Eufrazio, R. M., Kantzas, E. P., Edwards, N. R., Holden, P. B., Pollitt, H., Mercure, J. F., Koh, S. C. L., & Beerling, D. J. (2022). Environmental and health impacts of atmospheric CO₂ removal by enhanced rock weathering depend on nations' energy mix. *Communications Earth and Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00436-3>
- Fuhr, M., Geilert, S., Schmidt, M., Liebetrau, V., Vogt, C., Ledwig, B., & Wallmann, K. (2022). Kinetics of Olivine Weathering in Seawater: An Experimental Study. *Frontiers in Climate*, 4. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.831587>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Hamilton, S. K., Kurzman, A. L., Arango, C., Jin, L., & Robertson, G. P. (2007). Evidence for carbon sequestration by agricultural liming. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(2). <https://doi.org/10.1029/2006GB002738>
- Haque, F., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2020). Risk assessment of Ni, Cr, and Si release from alkaline minerals during enhanced weathering. *Open Agriculture*, 5(1), 166–175. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0016>
- Haque, F., Santos, R. M., Dutta, A., Thimmanagari, M., & Chiang, Y. W. (2019). Co-Benefits of Wollastonite Weathering in Agriculture: CO₂ Sequestration and Promoted Plant Growth. *ACS Omega*, 4(1), 1425–1433. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02477>
- Harley, A. D., & Gilkes, R. J. (2000). Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: A geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56(1), 11–36. <https://doi.org/10.1023/A:1009859309453>
- Harrington, K. J., Hilton, R. G., & Henderson, G. M. (2023). Implications of the Riverine Response to Enhanced Weathering for CO₂ removal in the UK. *Applied Geochemistry*, 152, 105643. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105643>
- Huh, Y. (2003). *Chemical weathering and climate a global experiment: A review*.
- IPCC AR6 WGIII: CDR Factsheet. (2022).
- Kantola, I. B., Blanc-Betes, E., Masters, M. D., Chang, E., Marklein, A., Moore, C. E., von Haden, A., Bernacchi, C. J., Wolf, A., Epihov, D. Z., Beerling, D. J., & DeLucia, E. H. (2023). Improved net carbon budgets in the US Midwest through direct measured impacts of enhanced weathering. *Global Change Biology*, 29(24), 7012–7028. <https://doi.org/10.1111/gcb.16903>
- Kanzaki, Y., Zhang, S., Planavsky, N. J., & Reinhard, C. T. (2022). Soil Cycles of Elements simulator for Predicting TERrestrial regulation of greenhouse gases: SCEPTER v0.9. *Geosci. Model Dev.*, 15, 4959–4990.
- Köhler, P., Hartmann, J., & Wolf-Gladrow, D. A. (2010). Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(47), 20228–20233. <https://doi.org/10.1073/pnas.1000545107>
- Larkin, C. S., Andrews, M. G., Pearce, C. R., Yeong, K. L., Beerling, D. J., Bellamy, J., Benedick, S., Freckleton, R. P., Goring-Harford, H., Sadekar, S., & James, R. H. (2022). Quantification of CO₂ removal in a large-scale enhanced weathering field trial on an oil palm plantation in Sabah,

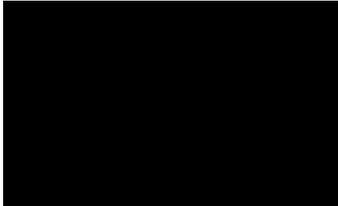
- Malaysia. *Frontiers in Climate*, 4.
<https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2022.959229>
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., Cayuela, M. L., Camps-Arbestain, M., & Whitman, T. (2021). Biochar in climate change mitigation. In *Nature Geoscience* (Vol. 14, Issue 12, pp. 883–892). Nature Research.
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>
- Lewis, A. L., Sarkar, B., Wade, P., Kemp, S. J., Hodson, M. E., Taylor, L. L., Yeong, K. L., Davies, K., Nelson, P. N., Bird, M. I., Kantola, I. B., Masters, M. D., DeLucia, E., Leake, J. R., Banwart, S. A., & Beerling, D. J. (2021). Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering. *Applied Geochemistry*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105023>
- Li, G., Hartmann, J., Derry, L. A., West, A. J., You, C. F., Long, X., Zhan, T., Li, L., Li, G., Qiu, W., Li, T., Liu, L., Chen, Y., Ji, J., Zhao, L., & Chen, J. (2016). Temperature dependence of basalt weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 443, 59–69.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.015>
- Marklein, A., Chang, E., & Ca, B. (2022). *Eion Corp Whitepaper Terrestrial Enhanced Rock Weathering: Fundamental Principles*.
- McQueen, N., Gomes, K. V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotta, M., & Wilcox, J. (2021). A review of direct air capture (DAC): Scaling up commercial technologies and innovating for the future. In *Progress in Energy* (Vol. 3, Issue 3). Institute of Physics.
<https://doi.org/10.1088/2516-1083/abf1ce>
- Möllersten K. (2022). *Energy Proceedings Assessment of classes of CDR methods: Technology Readiness, Costs, Impacts and Practical Limitations of Biochar as Soil Additive and BECCS*.
- Moosdorf, N., Hartmann, J., & Renforth, P. (2014). *Carbon dioxide efficiency of terrestrial enhanced weathering*.
- Mostafa, G. (2024). *Basic Geology*. <https://www.researchgate.net/publication/380532996>
- Oelkers, E. H., Pogge von Strandmann, P. A. E., & Mavromatis, V. (2019). The rapid resetting of the Ca isotopic signatures of calcite at ambient temperature during its congruent dissolution, precipitation, and at equilibrium. *Chemical Geology*, 512, 1–10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.02.035>
- Okrusch, M., & Frimmel, H. E. (2022). Experimente in magmatischen Modellsystemen. In M. Okrusch & H. E. Frimmel (Eds.), *Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde* (pp. 367–394). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-64064-7_18
- Perrin, A.-S., Probst, A., & Probst, J.-L. (2008). Impact of nitrogenous fertilizers on carbonate dissolution in small agricultural catchments: Implications for weathering CO₂ uptake at regional and global scales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13), 3105–3123.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.04.011>
- Price, D. G. (1995). Weathering and weathering processes. In *Quarterly Journal of Engineering Geology* (Vol. 28). <http://qjgeh.lyellcollection.org/>

- Priyono, J., & Gilkes, R. J. (2008). High-Energy Milling Improves the Effectiveness of Silicate Rock Fertilizers: A Glasshouse Assessment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(3–4), 358–369. <https://doi.org/10.1080/00103620701826498>
- Reershemius, T., Kelland, M. E., Jordan, J. S., Davis, I. R., D'Ascanio, R., Kalderon-Asael, B., Asael, D., Suhrhoff, T. J., Epihov, D. Z., Beerling, D. J., Reinhard, C. T., & Planavsky, N. J. (2023). Initial Validation of a Soil-Based Mass-Balance Approach for Empirical Monitoring of Enhanced Rock Weathering Rates. *Environmental Science & Technology*, 57(48), 19497–19507. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03609>
- Rolph, K. E., Stevenson, E. I., Turchyn, A. V., Antler, G., Bickle, M. J., Baronas, J. J., Darby, S. E., Parsons, D. R., & Tipper, E. T. (2021). Partitioning riverine sulfate sources using oxygen and sulfur isotopes: Implications for carbon budgets of large rivers. *Earth and Planetary Science Letters*, 567, 116957. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116957>
- Renforth, P., & Campbell, J. S. (2021). The role of soils in the regulation of ocean acidification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1834). <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0174>
- Ross, D. S., & Ketterings, Q. (1995). *Recommended Methods for Determining Soil Cation Exchange Capacity*.
- Schuling, R. D., Wilson, S., & Power, Ian M. (2011). Enhanced silicate weathering is not limited by silicic acid saturation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(12), E41–E41. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019024108>
- Shao, S., Driscoll, C. T., Johnson, C. E., Fahey, T. J., Battles, J. J., & Blum, J. D. (2016). Long-term responses in soil solution and stream-water chemistry at Hubbard Brook after experimental addition of wollastonite. *Environmental Chemistry*, 13(3), 528–540. <https://doi.org/10.1071/EN15113>
- Silva, B., Paradelo, R., Vázquez, N., García-Rodeja, E., & Barral, M. T. (2013). Effect of the addition of granitic powder to an acidic soil from Galicia (NW Spain) in comparison with lime. *Environmental Earth Sciences*, 68(2), 429–437. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1747-3>
- Smith, S. M. , Geden, O. , Nemet, G. , Gidden, M. , Lamb, W. F. , Powis, C. , Bellamy, R. , Callaghan, M. , Cowie, A. , Cox, E. , Fuss, S. , Gasser, T. , Grassi, G. , Greene, J. , Lück, S. , Mohan, A. , Müller-Hansen, F. , Peters, G. , Pratama, Y. , ... Minx, J. C. (2023). *The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition*. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>
- Strefler, J., Amann, T., Bauer, N., Kriegler, E., & Hartmann, J. (2018). Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>
- Swoboda, P., Döring, T. F., & Hamer, M. (2022). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 807). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>
- Swoboda, P., Hamer, M., Stotter, M., Döring, T. F., & Trimborn, M. (2021). Effects of rock powder additions to cattle slurry on ammonia and greenhouse gas emissions. *Atmosphere*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/atmos12121652>

- Taylor, L. L., Quirk, J., Thorley, R. M. S., Kharecha, P. A., Hansen, J., Ridgwell, A., Lomas, M. R., Banwart, S. A., & Beerling, D. J. (2016). Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification. *Nature Climate Change*, 6(4), 402–406. <https://doi.org/10.1038/nclimate2882>
- Terlouw, T., Bauer, C., Rosa, L., & Mazzotti, M. (2021). Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: A critical review. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 14, Issue 4, pp. 1701–1721). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d0ee03757e>
- Thomas, M., & Reid, R. (2020). Vacuolar compartmentalisation and efflux of cadmium in barley. *Botany*, 99(1), 1–8. <https://doi.org/10.1139/cjb-2020-0080>

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.



Sarah Klingenberg, 11.07.2024

Anhang 1

Transkript E1 28. Mai 2024

E1: 1:48

Hello.

Sarah Klingenberg: 1:49

Hello, good morning.

Sarah Klingenberg: 13:23

Let's start with the first question. Could you share your opinion on ERW as a method of CO₂ sequestration compared to other methods of CO₂ sequestration?

E1: 13:43

Well, you know, you have to look into the future. Where are we going? Well, the world population is going to increase, right? So we will not have more space. We will not have the space for afforestation. I mean, afforestation is a very attractive way of doing it, but the time scale doesn't fit. Before we know it, we'll be in a situation where we need to remove too much CO₂ from the atmosphere. That takes too long. It takes forever for a tree to grow. Also, you have noticed that there is an increase in bushfires, so it's not a very safe place to store your carbon. So afforestation is fine. We need to do it. For instance, the Amazon is disappearing. Basically, even mature forests do not absorb CO₂. In fact, they produce CO₂, which is not known by many people. So afforestation is not an option. Then we have BECCS. Bioenergy Carbon Capture and Storage, which was an option. Initially, people were growing crops specifically to produce energy, which is ridiculous in a world where we do not have enough food for the world population. Well, in fact, we do. But a) we are throwing away 30% because it doesn't meet our specifications. You know, a cucumber has to be straight; a cucumber does. It is not allowed to be crooked, right? So that is a problem, so there's competition for space. And competition for space is not a good thing in a growing community. Now, another option, and I'm just talking about terrestrial options now, OK. Another option is direct air capture. Well, direct air capture is shown now in Iceland, right? You have these huge plants. The only reason they can do it in Iceland is because it has cheap energy. But it uses too much energy and, in fact, you know the first direct air capture company was called Global Thermostat. And that was in the US and it was just sold for spare parts because it doesn't work. So direct air capture is something that the oil industry and people, you know, they love it because it's technical. In fact, Enhanced Rock Weathering is so simple it's not exciting. But the good thing about enhanced weathering is that, you know, arable land is there. You're not competing for space; you're adding it to the field when it's plowed in. At the same time, you can plow in other minerals, but in fact, it is already a mineral fertilizer. It is also accepted as a fertilizer by law because organic farmers have been using it for ages, not to sequester CO₂, but because it's good for the crop. The silicate that's dissolving enhances the crop's resistance. In many cases, it will increase the yield. There are no negative points. You could argue that in basalt, there are some heavy metals like nickel and chromium. But nickel and chromium are immobile at the pH of farmland, and they will not go into the crop. Tests have shown no damage. Of course, we need to monitor this. But on the other hand, there are volcanic islands in the world that we use as holiday resorts, and they produce their own food, and people are not dying there because of nickel and chromium poisoning or anything. So it's not an issue. I don't see any negative points in using weathering.

Sarah Klingenberg: 19:48

And how would you compare it to biochar?

E1: 19:52

Well, there's nothing wrong with biochar. In fact, you can use both. But we don't have enough feedstock for biochar.

Sarah Klingenberg: 20:00

And do you think combining them is a good option?

E1: 20:07

Yes, combining is wonderful because industrial agriculture has impoverished the soils. The soils have no carbon left, and with the changing climate where we expect more heavy rainfall, it will wash away topsoil. Biochar will provide refuge for soil bacteria and communities. It also absorbs nutrients and water and releases them more slowly. But the percentage of biochar in your soil must be significant. Just adding 1% biochar will not change the soil characteristics. As I said, we don't have enough feedstock, but whatever we have, we should not let it rot away but either produce soil organic carbon and build that up or burn or pyrolyze it for biochar.

Sarah Klingenberg: 21:37

Yeah. Alright, thank you. So are there any agricultural farming systems that you consider particularly suitable for the application of ERW, and could you evaluate the impact of ERW on soil quality and health in these systems?

E1: 22:00

Well, for that, you should talk to somebody from the Tünen Institute because they are looking into it. First of all, I would think that it's suitable for any arable soil. We need it as much as possible because there's a lot of carbon we need to take out of the atmosphere. So it should be done everywhere where it's possible, and it is improving soil quality in different ways. Directly because you are adding mineral fertilizer. You're adding silicate, which is good for the resistance of the crops. But you're also increasing soil organic carbon. So you're recovering the amount of humus in the soils, which is good. And there are not any particular farming systems that are suitable, but you're probably referring to what is called agroforestry or so.

Sarah Klingenberg: 23:21

I asked myself, if it's better on a big scale because the soils are already less healthy than in smaller-scale biological farming systems. So I thought, that when the soil is way healthier, it wouldn't sequester that much CO₂ as it would be in large-scale agricultural systems.

E1: 23:48

No, I think the sequestration will be equal, independent of what kind of soil. It does make a difference, the soil type, and that is one of the outcomes of our greenhouse experiments: that the type of soil has a huge influence on the efflux of CO₂ out of the soil. You know, the soil PCO₂ is always higher than in the atmosphere, so there's always a flux of CO₂ from the soil into the atmosphere. And funny enough, there was an increase in flux in soils that were treated with all kinds of different amendments, so not just basalt; we also looked at olivine. We looked at steel slag. In all cases, except for the steel slag, you had an increase in the efflux of CO₂. How that works, we don't know yet, but it is probably positive priming. So you have a positive priming when you are amending, say, basalt. I think that has to do with the fact that the soil community is now all of a sudden seeing a healthier soil or a soil that becomes more and more healthy, and they're so happy they're respiring like crazy. But many of the cations that are released by the weathering will attach to the negative charge of organics and make it more difficult for bacteria to respire them. So on the one hand, you have an increase in respiration, but part of the organic carbon will be better protected by the association with cations and minerals. And that part has a longer residence time. So you're also building up your soil organic carbon. And all of this needs to be understood; we still need to understand how this works, and for that, we need models. In fact, this morning, I was talking to a modeler to get this done.

Sarah Klingenberg: 26:29

Perfect, thank you. Which types of silicate rocks would you consider particularly effective for ERW and why?

E1: 26:49

Basalt.

Sarah Klingenberg: 26:52

Are you familiar with different basalt rocks?

E1: 27:20

No, I don't, to be honest. The reason we go for basalt is because, you know, kimberlite, for instance, is a magma that is very rich in cations. And if you look at the stoichiometry of kimberlite, you will sequester more than one tonne of CO₂ for one tonne of kimberlite. The same is true for, for instance, olivine. Olivine is a mineral. But a very olivine-rich stone is, for instance, dunite. Dunite is very rich, but dunite also has a high concentration of nickel and chromium. So I wouldn't use it that much. The big advantage of why I'm going for basalt is because it is already allowed by law in Germany. And that is, I think, a very strong argument. So people cannot say, you know, you're not allowed to do it. Yes, I'm allowed to do it.

Sarah Klingenberg: 28:48

We also have a lot of basalts in Germany as well.

E1: 28:57

That's right. And also, the agronomics are very important. So you have to look into the big advantage for the farmers, besides the business aspect when they can get carbon credits or so for what they're doing. And the agronomics of basalt are good. That's the reason why it's being used by biofarmers. They also use diabase, for instance, but diabase is already a magma that has differentiated from basalt in a different way. And if you look at the stoichiometry, you can take up less CO₂ per tonne of diabase, and it contains a lot of calcium. So if you have a lot of calcium, that is not wrong in the first place, but you would not use that in, for instance, calcareous areas where you have already a high saturation with calcium carbonate.

Sarah Klingenberg: 30:16

Alright, perfect. Thank you. How do you rate the influence of different climates on the effectiveness of ERW?

E1: 30:43

Well, if you have a dry summer like last year and there is not enough water, the result will not dissolve.

So water is an important factor. At the end, it is a chemical reaction and therefore it is dependent on temperature. So the best areas, the best climates for weathering are those areas that are rich in rain, are humid and hot. So Brazil or India, they are perfect for weathering. But that doesn't mean that it doesn't work in other regions, right? The other question is what is more efficient: if you have a shunt of your cations into the groundwater, like heavy rainfall, or would it be better to have, say, drip irrigation, where you have a continuous... And those are issues that are still under research. We don't know, but the obvious thing is that temperature and water supply...

Sarah Klingenberg: 32:14

Thank you. Do you have any concerns about the environmental impact of ERW? And if so, could you explain them in more detail?

E1: 32:36

No, even if there are some papers on this, it remains very efficient. If you would go to the Eiffel right, or we have this basalt belt across Germany in the middle of Germany from east to west. If

you would go from there to the north and to the south and you will not travel more than say 400 kilometers even with a diesel truck, you would still be 90% efficient. So, and right now we don't have to... The result for purposes because there is so much basalt needed in bigger chunks for the railway, for instance, or for... road construction, that when they crack the basalt, there is a lot of, say, basalt flour, right? Very fine material. That is... It is like a waste for them. And we can use it just like that. The smaller, the faster it will weather, right? And at some point, you know, if we scale this up, at some point, we will mill it just for the purpose of creating smaller fractions, and then even then, it is still efficient to do it because the most of the... Say, the CO₂ debt, you know, if you do the life cycle analysis of the whole process, most of it goes into transportation. Milling it is not a big issue. Also, in Germany, all the mills that are used for cracking the rock are driven by electricity, not by diesel engines.

Sarah Klingenberg: 34:46

Oh, really? That sounds good.

E1: 34:51

And you can imagine that once we have enough regenerative electricity, right? It is not an issue.

Sarah Klingenberg: 35:04

Yes, that's true, thank you. How would you rate the current method of measuring sequestered CO₂? And do you think there would be better options in the future?

E1: 35:37

It is still very difficult because it's an open system. You know, we can take samples, but at some point we will lose contact with where it's going, and then it shows up in the rivers through the groundwater. It comes in the rivers from the rivers. It comes in the ocean and the big question is what is happening in between. Now all of this can only be solved by modeling and understanding the system. So that is where we need to go at the moment to understand the system. What we do is we measure what is called alkalinity, which is Basically, it's the amount of bicarbonate dissolved in the water and that is increasing because it has a negative charge and it's compensated or neutralized by one of the cations from the basalt. But that's not the whole story. You know, people still don't understand that the big part of the cations is staying first in the soil, which is called the cation exchange capacity of soil. And at some point, which is called the breakthrough, you know, the first cations that have been temporarily caught by the soil organic carbon are then released and going into the groundwater at that point, once you have saturated the cation exchange capacity. You know you will have the full flow. But some of the cations will go into and build clay minerals. And these clay minerals are good for the soil. But they don't sequester bicarbonate, so it's always a combination. And that's why this is good. It's a combination of agronomics, benefit for the soil and growing crops on that soil, plus carbon sequestration.

Sarah Klingenberg: 38:11

Thank you. What political or regulatory challenges do you see, particularly serious when implementing ERW?

E1: 38:23

I've been talking a lot to politicians and I just had a talk with the Minister of Agriculture in Niedersachsen. And I've been talking to one of the State Secretaries from Berlin. And they all think it's a great idea. But it needs to be supported. One of the big issues we have is the time lag between the deployment of the basalt and when I get money for my carbon credits, right? If it's a process that is ongoing for over 5 years, you know, it's an investment. I'm investing in it and in five years' time, I get my return.

Now for a farmer, yes, of course, it's difficult to do. So we need to find ways of doing this. And you may know that farmers make 40% or so on average of their income based on subsidies. So that gives you a very strong handle to do something. You can subsidize when they do this right. That is the type of stuff that needs to be done. But at the same time, what you need to do is to raise taxes for the production of CO₂ because people need to have an incentive to reduce their emissions. And if they can't, then they can compensate with carbon credits that they buy, where they can say, well, this carbon has been permanently removed from the atmosphere. So we need to build a storage like a Fort Knox. You know, I'm not allowed to print as much money as I want. It needs to be controlled by the amount of gold that I have in some place as a value. And the same has to be true for the carbon credits. So we have to have a carbon credit Fort Knox, which guarantees that the price is stable. For instance, what has happened now? Now we are in the EU into a mode where they're very friendly to industry because they want to be re-elected. And they have increased the allowance for emissions. They are dissolving the Green Deal. And by doing so, the carbon credit value went from €80 per tonne, which is already way too low, it went to €30 per tonne, so it's almost only one third, and then all of a sudden it stops. Then the businesses that are developing carbon credits, that is, investing into this, all of a sudden are out of business and that should not happen. The carbon credit price is way too low. There was a recent calculation what the ultimate price of a tonne of carbon would be if we are back in that situation that I talked to you about, the Mayosean, right in the mid-Mayosean, because then there is, say, 20 meters sea level rise.

Then 70 or 80% of the world population has to move because they live on the coast. You will have very bad crops. They will, you know, you will have droughts more than we have nowadays. There will be bushfires, there will be floodings. So the cost of 1 tonne of carbon ultimately will be \$28,000 a tonne.

Sarah Klingenberg: 43:19

Wow, that's a lot of money.

E1: 43:20

Yeah, but that is a realistic price. Of course, you know, we don't want to go that way. So we have to be realistic. The other thing is that the economists, they calculate the economic damage, right? They calculated based on the increase of the global average temperature. But that is not realistic. You know, the booming economies are not in the high latitudes, they are not in the low latitudes, they are in the mid-latitudes. So what you need to do is to look at the extreme weather events caused by climate and their regional impact. And sum all of that up. And if you do that, then the price of a carbon credit would be six times more than it is today. So that would be realistic, but they don't do that. And that needs to be done.

Sarah Klingenberg: 44:33

So the carbon credit prices you sell or a lot of people sell. What is a realistic prize? It's around 200 to 500.00 Euro, right?

E1: 44:48

Well, right now there is a voluntary market and there are not a lot of enhanced rock weathering carbon credits. The carbon credits that are bought by companies like Microsoft or Google are direct air capture or biochar because that is a closed system. It's easy to estimate how much carbon you sequester. So we don't have the MRV, it's called the Monitoring Reporting Verification for the enhanced rock weathering as it should be. The same is true, by the way, for ocean alkalization.

Sarah Klingenberg: 45:29

Alright, thank you.

So how do you view the role of ERW in current and future climate protection plans?

E1: 45:50

It should be well, like I said, you know, it's only 10%. It is hard to abate emissions, but it is one that is ready to go, ready to upscale and we should do it right away.

Sarah Klingenberg: 45:55

And do you think it will happen that way like not that it should be bad? Like how will the politics decide? Do you have a feeling for yourself maybe?

E1: 46:17

Well, I'm not sure if that's realistic. I think that the politics will decide that we should do it and that they will recognize. But I'm afraid that it may be too late because the climate system is basically like a rubber band, and if you extend it too much it will just snap and that's it. And once it snaps then we cannot return. There's a point of no return.

Sarah Klingenberg: 47:00

Thank you. For a large-scale implementation of ERW, farmers need to be convinced of the effectiveness of this method. What strategies or arguments could be most effective for this?

E1: 47:34

Yes. Well, like I said, you know, the farmers are living largely from subsidies, and it needs to be subsidized. So there needs to be a business model. If there is no business model, the farmer will not do anything. Maybe it needs to be incentivized for them to do so, and that is something that politicians should take care of, to turn it into a business model. Now the other thing is, like you said, it is the agronomics. And in fact, a farmer or the Bundesministerium of Agriculture will not do anything just because companies say it's good. If I'm telling them, you know, it's so good to use basalt, then they say, well, that's nice, but how do I know? So you need to have the OK from institutes that are working with and for the farmers. So I've been talking also to the institute and we have a project that we would like to run. That it is good for agronomic reasons and also good for business reasons for farmers to do it. And if one farmer tells his neighbor, well, you know, I did this enhanced rock weathering and they gave me money for this plus I have more crop, then the other farmer says, well, I will do that next year. And then you have an exponential growth.

Sarah Klingenberg: 49:47

Yeah, that sounds good. I'm looking forward to that project. How do you consider the costs of ERW compared to other CO₂ removal strategies?

E1: 50:04

Well, I think right now if we calculate the cost because we have been doing this with some farmers within the Carbon Drawdown Initiative, it will cost us about €200 per tonne. So the price should be and it could go down because we ordered our basalt in big bags. And of course, if you scale it up, you can probably get the price around €150 per tonne of basalt, applied. But then the carbon credit should be around, I don't know, say around €200 something like that. I think that's reasonable. And then you have a business model plus you have the agronomics. You know it replaces and we don't know if it replaces the liming, for instance. If we could replace liming, we are not just saving money, but in Germany, already we have 1,000,000 tonnes of CO₂ produced for agricultural lime, so if we can stop that, you know, we are saving emissions. And we are not allowed to put that into our cradle-to-grave calculation, but it does help.

Sarah Klingenberg: 51:47

Yes, that's true. Alright. Do you think there will be breakthroughs in research and execution that will bring entirely new perspectives?

E1: 53:22

No, I don't think there's going to be a big change because it's straightforward and it can be optimized. So the price for doing this will go down, but not a lot. It's not like the production of renewable energy through solar panels. I mean, initially the solar panels were very expensive and then it's going down. No, it's not going to happen a lot, no.

Sarah Klingenberg: 53:40

OK, thank you. So this is my last question.

E1: 54:01

OK.

Sarah Klingenberg: 54:02

If so, is there anything you'd like to add that might be important for the use of ERW that was not covered in this interview, and if you can recommend other experts in this field for us to contact.

...

Sarah Klingenberg: 55:53

Perfect. Thank you so much for your time. It was very interesting talking to you.

E1: 55:57

You're welcome.

Sarah Klingenberg: 58:29

Thank you. Have a great day. Bye bye.

E1: 58:34

Bye. You too. Bye bye.

Anhang 2

Transkript E2 30. Mai 2024

Sarah Klingenberg: 1:00

Hi, hörst du mich?

E2: 1:05

Hallo. Ja.

Sarah Klingenberg: 1:10

Vielen Dank fürs Teilnehmen, ich freue mich.

E2: 1:15

Ja, bitte sehr.

Sarah Klingenberg: 6:30

Super, ich fang mal mit der ersten Frage an. Könnten Sie Ihre Einschätzung zu Enhanced Rock Weathering (ERW) als Methode der CO₂-Sequestrierung im Vergleich zu anderen Methoden der CO₂-Sequestrierung teilen?

E2: 7:00

Also das ist eine riesengroße Frage und es kommt ein bisschen darauf an, welche Kriterien man anlegt. Wenn man möchte, dass das CO₂ besonders lange gespeichert wird, ist ERW eine sehr gute Methode, denn der Kohlenstoff wird zurück in den geologischen Kreislauf geführt, der viele Millionen Jahre dauert. Sobald CO₂ mineralisiert ist, zum Beispiel als Kalziumkarbonat im Meer, dauert es einen ganzen tektonischen Zyklus, bis es wieder ins Erdinnere gelangt und dann als Vulkan-CO₂ freigesetzt wird. Die Permanenz ist also sehr hoch. Es gibt natürlich zwischen dem Acker und dem Meer einige Schritte, wo etwas CO₂ verloren geht, aber damit muss man leben.

Wenn ich das mit Pflanzenkohle vergleiche, stelle ich fest, dass bei Pflanzenkohle aus CO₂ ein neuer Rohstoff hergestellt wird. Das mache ich bei der Verwitterung nicht; hier wird CO₂ als Abfallstoff ins Meer transportiert. Auf der anderen Seite hat die Verwitterung bodenverbessernde Eigenschaften: der pH-Wert steigt, wovon insbesondere saure Böden profitieren können. Das ist ein indirekter Effekt.

Ein großer Vorteil gegenüber anderen Methoden ist, dass in kleinbäuerlichen Umgebungen, wo sich Landwirte keine Düngemittel leisten können, Gesteinsmehl eine sehr gute Alternative darstellt. Dies betrifft häufig den globalen Süden, wo die Böden auch extrem mager sind. Das hat einen großen sozioökonomischen Effekt, da die Leute höhere und stabilere Ernten haben und die Böden nachhaltiger nutzen können.

Bei Pflanzenkohle sind die sozioökonomischen Effekte ebenfalls groß. Wenn ich Direct Air Capture als Vergleich heranziehe, hat das keinen Einfluss auf die lokale Bevölkerung, weder positiv noch negativ. Daher macht Gesteinsmehl viel mehr Sinn, um möglichst viele Menschen teilhaben zu lassen. Außerdem kann Gesteinsmehl die Themen Nahrungsmittelsicherheit und Nahrungsmittelproduktion unterstützen. Gesteinsmehl kann Kunstdünger nicht komplett ersetzen, macht aber unabhängiger von den Preisen für Kunstdünger, die stark mit den Energiepreisen zusammenhängen.

Sarah Klingenberg: 10:13

Ja, es klingt so, als ob Sie Pflanzenkohle und ERW besonders positiv bewerten. Wenn Sie sich entscheiden müssten, welche Methode würden Sie eher wählen?

E2: 10:40

Heute würde ich mich für Pflanzenkohle entscheiden, weil sie im Moment etablierter ist und besser läuft. Langfristig ist aber Gesteinsverwitterung das bessere, weil sie deutlich langfristiger angelegt ist. Pflanzenkohle hat auch Verluste, während Gesteinsverwitterung langfristig angelegt ist. Es ist grundsätzlich schwer, die Methoden zu vergleichen. Zum Beispiel kostet das Mahlen von Gestein Energie, während die Herstellung von Pflanzenkohle Energie produziert. Bergbau ist natürlich auch nicht ideal, aber gerade die sozioökonomischen Aspekte sind wichtig. Hier schneiden beide Methoden relativ gut ab.

Sarah Klingenberg: 11:41

Ja, stimmt, vielen Dank. Gibt es landwirtschaftliche Anbausysteme, die sich Ihrer Meinung nach besonders für die Anwendung von ERW eignen, und könnten Sie die Auswirkungen von ERW auf die Bodenqualität und -gesundheit in diesen Systemen bewerten?

E2: 11:53

Ja, für uns ist eher die Klimazone ausschlaggebend. Heiß und feucht ist dort, wo die Gesteinsverwitterung am schnellsten passiert und wo die Böden auch relativ schlecht sind, weil sie schon lange diesem sehr korrosiven Klima ausgesetzt sind. Der Boden sollte nicht zu feinkörnig sein, denn wenn man noch feines Gesteinsmehl hinzufügt, kann kein Wasser mehr durchdringen, es bilden sich Pfützen, und das Gesteinsmehl wird weggeschwemmt. Grobkörniger Boden kann durch das Mischen mit Pulver mehr Feuchtigkeit halten, was gut ist. Alkalische Böden sind nicht geeignet, sondern saure Böden mit wenig organischen Kohlenstoff. Es gab eine Studie zu Moorböden, die viel organischen Kohlenstoff enthalten und CO₂-Quellen werden. Moorböden sind jedoch schlecht erreichbar, und niemand würde dorthin fahren, um Gestein zu streuen. Die besten Böden sind organikarme, sandige, saure Böden.

Sarah Klingenberg: 13:49

Okay, super, danke schön. Welche Arten von silikatischen Gesteinen würden Sie als besonders geeignet für ERW erachten und warum?

E2: 14:27

Oftmals werden die Gesteine in der Literatur falsch bezeichnet. Viele arbeiten mit Basalt, der oft falsch klassifiziert wird. Tatsächlich handelt es sich um Basanit, dessen chemische Zusammensetzung etwas anders ist als die von Basalt. Ultramafische und mafische Gesteine sind sehr gut, das heißt magnesium- und eisenreiche Vulkangesteine. Es macht immer Sinn, mit lokalen Ressourcen zu arbeiten. Wir hatten Pilotstudien, bei denen die Klimabilanz rapide abnimmt, sobald das Gestein über 200 Kilometer transportiert werden muss. Daher macht es Sinn, ein weniger gut funktionierendes Gestein zu nehmen, das aber in der direkten Umgebung verfügbar ist.

Sarah Klingenberg: 15:45

Ja, okay, super. Wie beurteilen Sie den Einfluss der verschiedenen Klimabedingungen auf die Wirksamkeit von ERW?

E2: 15:52

Es sollte so warm und feucht wie möglich sein und der Boden sauer. Viel Vegetation sorgt für einen sauren Boden, da Pflanzen und Bäume CO₂ durch die Wurzeln in den Boden einleiten, was perfekt ist, weil sie quasi das Direct Air Capture für uns übernehmen und das CO₂ zu den Gesteinen führen.

Sarah Klingenberg: 16:19 Aber lohnt es sich trotzdem, ERW in Europa anzuwenden, auch wenn es in Indien oder Brasilien besser funktioniert?

E2: 16:36 Ja, genau. Wenn ich Gestein in den Boden einbringe, passiert das einfach, und ich kann das Gestein nicht wieder herauspicken. Je nach Klimazone passiert es schneller oder langsamer, aber es passiert auf jeden Fall.

Sarah Klingenberg 17:02

Super, vielen Dank. Hast du irgendwelche Bedenken hinsichtlich der Umweltauswirkungen von ERW?

E2: 17:14

Ja, natürlich gibt es Bedenken, insbesondere bezüglich des Gesteinsabbaus, also des Bergbaus. Wie bei anderen Bergbaumethoden können dabei Nachteile auftreten, besonders wenn es oberflächennah geschieht. Hier ist ein nachhaltiges Konzept erforderlich, einschließlich Renaturierung. Ein Problem könnte sein, dass zu feines Material den Boden zur CO₂-Quelle macht, weil es viel organisches Material enthält und die Bodensäure verändert. Zu viel Gestein auf einem Haufen ist natürlich auch nicht optimal. Des Weiteren könnten falsche Versprechen seitens der Firmen auftreten, obwohl diese weniger als Umweltauswirkungen zählen. Ein spezifisches Problem ist noch, dass beim Ausbringen auf das Feld viel Staub entsteht, weshalb eine Methode gefunden werden muss, um dies feucht auszubringen oder zu palettieren, oder es bei Regen zu tun. Der entstehende Staub könnte unter Umständen problematisch sein.

Sarah Klingenberg 18:25

Aber diese Pellets müssten dann sehr klein sein, oder?

E2: 18:58

Ja, genau. Normalerweise sind sie etwa 1 bis 2 Zentimeter lang. Man kann diesen Pellets zum Beispiel Zellulose oder ähnliches beimischen, sodass sie bei Feuchtigkeit aufplatzen. Gesteinsmehl wird üblicherweise untergepflügt, damit es im Boden liegt und nicht oben drauf bleibt. Wenn die Pellets dann im Boden aufplatzen, ist das in Ordnung.

Sarah Klingenberg: 19:13

Okay, das bedeutet natürlich einen zusätzlichen Produktionsschritt, der wiederum Energie verbraucht, oder?

E2: 19:31

Genau, richtig. Man könnte natürlich größeres Gestein wählen, das weniger staubt, aber dafür in Kauf nehmen, dass der Prozess langsamer verläuft. Trotzdem kann man kontinuierlich mehr auf die Felder bringen. Man kann es auch alle 3 bis 4 Jahre unterpflügen oder wie man möchte, um es langfristig auf die Felder zu bringen.

Sarah Klingenberg: 19:55

Wie oft würdest du es dann auf die Felder ausbringen?

E2: 20:12

Wir haben noch nicht genügend Erfahrungswerte, um das genau zu sagen. Es hängt davon ab, wie schnell das Material verwittert. Es kommt auch auf die Bodenbeschaffenheit an. Wenn der Boden bereits sehr fein ist, sollte man es nicht zu oft anwenden. Auch wie viel man aufbringt und wie oft man pflügt, spielt eine Rolle. Es gibt Felder, die nicht jedes Jahr gepflügt werden. Man könnte die Menge so dosieren, dass sie gleichmäßig über die Jahre verwittert und so eine regelmäßige CO₂-Sequestrierung ermöglicht.

Sarah Klingenberg: 22:37

Dankeschön. Wie beurteilst du die derzeitige Methode zur Messung des gebundenen CO₂?

E2: 22:44

Sie ist unzureichend. Ich glaube jedoch, dass sie sich in Zukunft verbessern wird. Nun, ich weiß, dass viel Forschungsarbeit in diesem Bereich geleistet wird. Man kann nicht einfach auf jedes Feld gehen und Proben nehmen, um CO₂ zu messen, das wäre zu teuer und aufwendig. Stattdessen werden Bodentypen charakterisiert und in Modelle integriert. Diese Modelle können dann mit aktuellen Wetterdaten gefüttert werden, um die CO₂-Reaktionen zu prognostizieren. Aber dafür braucht es messbare Parameter und Modelle, die kontinuierlich validiert werden müssen. Hier stehen wir noch am Anfang.

Sarah Klingenberg: 24:01

Dankeschön. Welche politischen oder rechtlichen Herausforderungen siehst du als besonders schwerwiegend bei der Umsetzung von ERW an?

E2: 24:49

Politisch gesehen ist die Haltung einiger Parteien wie FDP oder CDU, die behaupten, dass wir unsere Emissionen nicht reduzieren müssen, ein großes Hindernis. Wir müssen jedoch 90% unserer Emissionen reduzieren, sonst hat technisches Engineering keine Auswirkung und ist nicht messbar oder spürbar. Rechtlich gesehen ist das Thema Bergbau ebenfalls wichtig. Man muss auch Lösungen finden, wenn das Ausbringen von Gesteinsmehl auf Felder die Ernte beeinträchtigt. Man sollte Landwirte für mögliche Ernteauffälle entschädigen, da sonst die Akzeptanz sinkt. Es ist wichtig, die lokale Bevölkerung einzubinden, beispielsweise durch Schaffung von Arbeitsplätzen und Entwicklung der Infrastruktur.

Sarah Klingenberg: 25:48

Glaubst du, dass dies in den nächsten 10 Jahren subventioniert werden könnte?

E2: 26:15

Ich hoffe, dass es geschieht. Meine Erfahrungen mit der Politik waren frustrierend. Einige Politiker bevorzugen traditionelle Methoden wie Aufforstung, während wissenschaftlich fundierte Alternativen ebenfalls unterstützt werden müssen. Es braucht eine ausgewogene Förderung verschiedener Ansätze.

Sarah Klingenberg: 26:55

Ja, genau, das passt natürlich dann auch ganz gut. Also wie siehst du die Rolle in den aktuellen und zukünftigen Klimaschutzplänen, vielleicht auch bezogen auf die nächsten 10 Jahre?

E2: 27:10

Genau, also bei Klimaschutzplänen oder sagen wir Klimastrategien müssen Emissionsreduktionen ganz oben stehen. Aber ebenso wichtig ist die Frage, was mache ich mit den Restemissionen? Und meiner Meinung nach sollte man frühzeitig beginnen, auch Engineering-Optionen einzubeziehen,

und Gesteinsverwitterung ist relativ einfach. Bis auf das Messen ist die Umsetzung recht unkompliziert. Also ja, genau, man muss keine Maschinen dafür bauen. Es ist einfach, langfristig und hat viele positive Nebeneffekte. Das halte ich auch für deutlich seriöser als zum Beispiel Bodenkohlenstoff oder Humusaufbau, weil das eher relativ schnelllebige oder empfindliche Methoden sind, teilweise Kohlenstoffspeicher. Bei der Verwitterung geht es meistens gut, wenn man es richtig macht. Also, es ist eigentlich ein No-brainer.

Sarah Klingenberg: 28:44

Aber dass diese Relevanz in der Politik in den nächsten 10 Jahren erkannt wird, ist nicht so wahrscheinlich, oder?

E2: 28:55

Ja, genau. Ich glaube, in Indien zum Beispiel ist das ein bisschen anders, weil ganz Indien fast ausschließlich aus Basalt besteht, der direkt vor der Haustür liegt. In Deutschland und Europa haben wir eine starke Lobby für naturnahe Methoden. Selbst wenn mit Gesteinsmehl gedüngt wird, ist Bergbau immer noch das "böse Kind". Es ist sehr seltsam, wie Gesteinsverwitterung behandelt wird. Gerade der BUND und andere Lobbygruppen stellen es oft als technologische Lösung dar, die per se schlecht für die Umwelt sei. Dabei wird Pflanzenkohle als Management-basierte Methode deklariert, obwohl sie in riesigen Pyrolyseöfen hergestellt wird, die nur aus Stahl bestehen und viel mehr High-Tech enthalten als das einfache Zermahlen von Gestein. Es scheint recht willkürlich zu sein. Ich habe das Gefühl, dass viele agrarpolitische Entscheidungen auf Lobbyarbeit und weniger auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basieren.

Sarah Klingenberg: 33:23

Ja, okay, Dankeschön. Für eine großflächige Einführung von ERW müssen die Landwirte von der Wirksamkeit dieser Methode überzeugt werden. Welche Strategien oder Argumente könnten dafür am wirksamsten sein?

E2: 33:53

Ja, also Bauern lesen definitiv keine wissenschaftlichen Artikel. Finanziell steht es schlecht um sie, daher wäre das beste Argument, dass wir sie finanziell unterstützen, um das Risiko abzufedern, falls die Ernte durch die Methode nicht so gut ausfällt wie gewohnt. Das Problem bei diesen Kunstdüngern ist, dass die Bauern Proben ihres Bodens einschicken und die Unternehmen dann Dünger liefern, der perfekt auf den Boden und die gewünschten Pflanzen abgestimmt ist. Das können Gesteine nicht leisten, da sie nur langsam Nährstoffe freisetzen. Daher kann man die Bauern damit nicht überzeugen. Man muss zunächst finanzielle Anreize schaffen und dann mit Argumenten zur Nachhaltigkeit und Bodengesundheit folgen. In der Ökolandwirtschaft hat Gesteinsmehl früher gute Ergebnisse gebracht, ebenso im Gartenbau. Am besten funktioniert es jedoch, wenn ein Bauer gute Erfahrungen damit macht und es seinen Nachbarn empfiehlt. Das sind verlässliche Quellen. Viel Reden hilft hier nicht, es müssen viele kleine Pilotprojekte durchgeführt werden.

Sarah Klingenberg: 36:10

Theoretisch kann es ja schon auch helfen, dass es mehr Pflanzenwachstum gibt, oder meinst du, dass es im Vergleich zu diesen Superdüngern da dann schlechter funktioniert?

E2: 36:28

Ich glaube, dass Superdünger immer besser sind als Gesteinsmehl. Aber sie werden auch immer teurer und belasten den Boden, weil sie die natürlichen Prozesse stören. Bei Gesteinsmehl bleibt der Boden lebendig, weil es langsam Nährstoffe freisetzt.

Sarah Klingenberg: 37:02

Ach ja. Dementsprechend wäre es also sinnvoller, andere Bauern davon zu überzeugen?

E2: 37:08

Ja, denn sie können trotzdem saure Böden haben.

Sarah Klingenberg: 37:20

Wie beurteilen Sie die Kosten von ERW im Vergleich zu anderen CO₂-Entfernungsstrategien? Sind diese Ihrer Meinung nach akzeptabel?

E2: 37:30

Auch hier kann man sagen, es entstehen zusätzliche Kosten, zum Beispiel für den Bergbau, der Umweltkosten verursacht. Auf der anderen Seite gibt es auch Gewinne, besonders im globalen Süden durch nachhaltigere Landwirtschaftspraktiken und Einsparungen bei umweltschädlichen Düngemitteln. Zusammenarbeit mit der Natur hat ihre Kosten, aber der Preis von ERW ist im Vergleich zu anderen Methoden wettbewerbsfähig, insbesondere was die permanente CO₂-Speicherung und die Biosphärenleistung betrifft.

Sarah Klingenberg: 40:00

Super, danke. Glauben Sie, dass es in der ERW-Forschung und -Ausführung zu Durchbrüchen kommen wird, die völlig neue Perspektiven eröffnen? Wenn ja, welche sind das?

E2: 40:37

Ich glaube, wenn es einen Durchbruch gibt, dann bei der Methode, wie ERW gemessen wird. Es wurde schon einmal darüber nachgedacht, dies vielleicht per Satellit zu tun, um die CO₂-Ausgasung aus dem Boden zu erfassen. Das wäre revolutionär, da man dann kostengünstig viele Daten sammeln könnte. Das wäre eine fantastische Entwicklung. Derzeit ist diese Idee zwar im Raum, wurde aber wieder verworfen, weil es angeblich nicht machbar sei. Vielleicht gibt es hier noch Fortschritte in der Zukunft.

Sarah Klingenberg: 41:15

Super, das war es auch quasi schon. Gibt es noch etwas, was du hinzufügen möchtest, was noch nicht ausreichend behandelt wurde? Oder könntest du mir auch andere Expertinnen empfehlen, mit denen ich sprechen könnte, wo du sagen würdest, dass es sinnvoll wäre?

E2: 41:41

Also ich habe nur einen Arbeitskollegen, der mit mir zusammenarbeitet. Er würde dir aber wahrscheinlich dasselbe erzählen.

Sarah Klingenberg: 47:23

Vielen Dank, es freut mich sehr, dass du dir so spät am Abend noch Zeit dafür genommen hast.

E2: 51:35

Gerne. Dann schicke ich dir auch das. Okay, Tschüss.

Sarah Klingenberg: 51:44

Danke, ciao.

Anhang 3

Transkript E3: 31.05.

Sarah Klingenberg: 1:25

Good morning. Nice to meet you.

E3: 1:26

Hi, good morning. Nice to meet you as well.

Sarah Klingenberg: 12:26

Could you share your assessment of Enhanced Rock Weathering (ERW) as a method of CO₂ sequestration compared to other methods of CO₂ sequestration?

E3: 12:28

Yes, of course. So maybe let me or let me ask first a clarifying question where you talk about methods of CO₂ sequestration. Does that include everything from, let's say growing trees towards very technical solutions?

Sarah Klingenberg:

Yes, but you don't have to talk about everything, the comparison to DAC would be interesting for me, but just talk about the things you think are important to share.

E3: 13:00

OK that's clear. Because it's interesting that you indeed mentioned DAC, because I think that's the one where most people see most potential for upscaling together with ERW.

To remember very well when I was at the conference two years ago, this most talks were indeed on either afforestation or DAC or ERW. And I think the majority of people that was present see those two, so DAC and ERW as the two with the most potential for upscaling. What I think in general is, that there is no single solution for achieving the negative emissions that we need. So in that sense, I work on ERW because I believe it could bring a worthwhile contribution, but at the same time, I think that it will never be able to completely capture all the CO₂ that is necessary and we do need other methods as well. So in that sense, I'm also very strongly advocating that there is research done on DAC and also on organic carbon sequestration. I think I will mostly talk about that one in comparison, but also on biochar. So, from the perspective of someone coming from Earth sciences and coming from a natural science and an environmental science background, I think it's very important that we study any technique that we apply does not do additional harm and within ERW one clear one is that it can induce losses of soil organic carbon, which is not desirable from a climate perspective but also not desirable from a soil quality perspective. 14:43

So I think ERW does have the potential to eventually overcome that because if you'll make the comparisons to liming which I think is the process that we know most about and has the most similarities with ERW, we see that it can lead to stabilisation of organic matter in the end. Often you see that the short term effect is, that the pH is increasing. Well, the microbes like that better and as a result of that they start to become more active, and they start to eat the organic carbon and they produce more CO₂. So that's a short-term effect, that has also been observed in pot experiments that we did and also some published work already. 15:38

But at the same time, the long-term effect is that the minerals, when they weather, some of them will just produce Nutrients and will go into a solution. But you will also form new minerals and those

new minerals often have the capacity to form chemical bonds with organic matter so that can then in turn leads to stabilisation of organic matter, but that is more a longer term effect.

This is going a bit in the detour from what I wanted to say. What I wanted to say on this is. That I think if you apply ERW you should be very careful with methods that are used to enhance organic carbon sequestration. Organic carbon Sequestration is a method that is more accepted by the research community maybe not even per se, but more by farmers who will actually have to do the work. Methods like growing cover crops on your soil or having less tillage, so applying reduced tillage, those are things that are more accepted by farmers to do, because they see that it also has beneficial effects for their soil quality. I think, both methods are good, but it's probably very difficult to have both happening. So both inorganic carbon sequestration and organic carbon sequestration on the same field at the short time scale, at least in the longer time scale, I think it is happening. But then we're talking more about 10 years or longer.

So I think the strong benefit of ERW is the time scale at which you sequester carbon, which is longer than any form of organic carbon sequestration. A big benefit is the effects it can have on soil quality, that it can replace certain nutrients and if you have a field that has for example a calcium deficient, you can apply a rock with a relatively high amount of calcium and you can bring the nutrients more in balance so these things are really important benefits of ERW.

Well, you mentioned DAC before, I think it's also not competing at all with DAC, So that makes it very nice. You can develop both techniques and just achieve in the end more CO₂ sequestration.

Then maybe on biochar, because I haven't mentioned that one yet. I think ERW and biochar seem to work well together. In theory what the biochar can do is, that the rocks also contain some trace elements which can be harmful in high amounts such as nickel, and the biochar could in principle absorb that. So the idea would be that if you apply them together you can sort of get the Biochar to take up that nickel and that it doesn't end up in the plants.

Sarah Klingenberg: 19:09

So, you would say a combination would be the best method so far?

E3: 19:07

Yes, I think so. We've seen mostly beneficial effects on soil quality. We've seen that if you apply Olivin, then you really see lower nickel concentrations when you apply biochar. So that is that is really, really good. For basalts, that's less prominent because the amount of nickel in basalt is also lower.

Sarah Klingenberg: 19:47

When you look at Biochar as its own without ERW in combination. Do you think it's nearly as good or as good as ERW itself, or only in combination?

E3: 20:03

Oh, I find it a bit difficult to rank, let's say certain techniques in that way. I think applying biochar in itself is also very valuable to the soil. Biochar is, let's say, the most stable form of organic carbon you can get, but it's not as stable as inorganic carbon is. But there is also less resistance to applying biochar So that's an important one. I think that the process of producing biochar comes with less downsides than mining minerals and grinding them, etc. And that is definitely one advantage of using biochar. And the certification is already further in the sense that now if you add it, you can actually get a certificate that shows how much carbon you added to the soil. And for ERW, we're just not at that stage yet.

Sarah Klingenberg: 22:53

Thank you. Are there any agricultural farming systems that you consider particularly suitable for the application of ERW? And could you evaluate the impact of ERW on soy quality and health in these systems?

E3: 23:16

OK. I will mostly answer from a soil quality perspective. So one very crucial factor is the soil pH. What we've seen is that soil that has a high pH, so I'm talking about 7, or so, doesn't really need the increase in pH that is induced by ERW. It's also because the pH is already so high the weathering process goes more slowly, so these soils are not particularly suitable for adding minerals. The very other contrast, if you're talking about peat soils or organic matter rich soils, they often have a very low pH, and these soils have two downsides that first of all, you start to destabilise the organic matter that is present in the soils. And second of all that if you have such a low pH, even if you weather the minerals, you don't really produce the bicarbonate and the carbonate that is necessary for carbon sequestration, because in the carbonate system basically if you are below pH 4.5 then still everything is CO₂. If you are well between 4.5 and five, there's still a lot of CO₂. So last year, an important paper came out that showed that basically they recommend that a soil should have at least a pH of 5.2 in order to produce meaningful amounts of bicarbonate and that a soil should have a pH below 6. You would still have to do some sort of correction for the fact that part of the bicarbonate that you produce still can be converted back to CO₂.

Sarah Klingenberg: 24:40

It's very interesting that it's the pH doesn't have to be too acidic.

E3: 25:18

No, I think acidic soils is good in general, but better not too rich in organic carbon. That's for sure so. And you have to be aware that you might have to do a correction on your data. So I would generally say having a soil between pH-5 and six would be sort of ideal, I think. But on the other hand, there's other factors to take into account. A lot of ERW trials are conducted in the in the global South for example in Brazil. Again, these soils are very acidic. But there you have the benefits that the climate is very suitable for ERW that these soils are very poor in nutrients, so they really need the nutrients that are brought in. And then the fact that you maybe don't sequester all minerals, that is, weather it's CO₂, is that something you have to take into account but not more than that, it's still very beneficial to these soils. So there's multiple factors there to take into account, but surely not a high pH and not too rich in organic matter.

Well, to farming, you have farming systems of conventional versus organic farmers. Well, for organic farming, the application of Rock dust is already allowed. So there's particular Rock dust where it's already allowed. It's already certified as an inorganic fertiliser that can be used. So that would make the application by organic farmers easier. You maybe also wanted to know, like, are we talking about croplands or grasslands. I don't really have a clear answer to that, except that for grasslands it's more difficult to apply so rather, if there's also much less research done on grasslands, I think so far. But I would then at least suggest combining it with, if you are already doing some grasslands renewal, it would be a good time to add the minerals.

And I think regarding soil quality, actually the one thing I want to say is that people that I mean soil quality and soil health, that sort of these are very umbrella terms and You could very well be that you see an A higher concentration of nutrients of certain nutrients, which is beneficial, but you also see a higher concentration of nickel which is not beneficial. So, I think In general, yes, you can evaluate the impacts for the soil quality, but there is no such thing as a good soil quality because it's always multiple parameters and some may be increased and some may be decreased.

Sarah Klingenberg: 29:00

Yes, and it probably also depends on what you want to grow.

E3: 29:10

Oh yeah, absolutely. I mean, certain crops, all crops have different nutrients requirements and you would anyway always have to apply nitrogen fertiliser as well, if you're not having a nitrogen binding or Legume species.

Sarah Klingenberg: 29:30

Perfect. Thank you. Which type of silicate rocks would you consider particularly effective for enhanced rock weathering and why?

E3: 29:45

So the most people use currently basalt in the research. I think you have seen that as well and I think basalt has the good mix of being highly abundant and having a good mix of elements so that if it weathers you don't create an imbalance in the nutrients that are available for plants. And the fact that it doesn't contain very high amounts of trace elements like nickel, etc. So from the overall picture, I think basalt is definitely the best candidate to use when applying to soils. But there are some nuances to bring to that, I think. If you are really thinking about more technical applications of enhance rock weathering such as I don't know building reactors and then using that you have an affluent that is very rich in alkalinity and you would add that to the oceans. I don't something like that then at least anyway that is not in the soil system, I think in such cases you can also test using Dunite, so that's olivin rich rock, because that's simply weathers faster and you capture more moles of CO₂ per mole of mineral that you weather.

But it's the downsides of that in a natural system is that you have very imbalanced nutrients because it's been basically only magnesium that you bring in and the fact that it contains high amounts of nickel. So you would then definitely have to add some biochar as well in order to remove that. The group where I'm in now, they look at rocks that are rich in a mineral called nepheline you find that also in particular basalts. But this is also known to be a very fast weathering mineral so certain basalt types have that mineral present and it's seems suitable candidate for silica rock to be used.

I think what is also important to take into account is how close you are to your parent material. Because I if you have to transport the rocks for a far distance then that's for your LCA is not very good either. Plus I think I also think that it's very good for soil quality that you add material that is not so different from let's say the native material. So ideally if you add a mineral that is similar to the parent material which the soil developed, I think that is also favourable for the soil quality in the end because you're not disturbing, let's say the natural balance too much. So maybe that is also one thing to add to this, it's not really about the type of rocks, but if you have a very sandy soil, I think it is for the soil quality better to add more fine material for a set like you get a better Distribution of your grain size in the soil.

Sarah Klingenberg: 34:38

Thank you. The next question is: How do you rate the influence of different climate on the effectiveness of ERW?

E3: 34:49

So generally, if you have high temperatures, high precipitation, that's generally the zones which are most effective. What you see clearly is that water is super important. You really need water and, in the research, where we try to collect leeches, I mean then you need the water to basically make sure that if reaction products are formed that they are transported away and that the new reaction

products can form, so temperature seems always a very sort of obvious one but some form of irrigation or natural precipitation is also super important.

Sarah Klingenberg: 35:39

Is it still effective to do it in Europe? So even if it's more effective in Brazil or India, do you think it's still a good method in Europe?

E3: 35:52

Yes, I think so. Absolutely, even if it is for the core benefits, but we had always in an experiment what we do with growing crops, you would always hope that you see big impacts of the plants. But in the end still in the rainy seasons you see then that that's what all the leached is produced and that's probably where the most weathering is still taking place even though the rainy seasons are more at lower temperatures.

Sarah Klingenberg: 35:57

Thank you. Do you have any concerns about the environmental impact of ERW?

E3: 36:30

Yes, I can definitely explain that. The heavy metals that you bring in is really a concern for soil quality. But I think if you find clever techniques to sort of work around that. I mean, a lot of heavy metals that you bring in the soil, they are not available for plant uptake because they precipitate as or they bind to organic matter or that way they become not available for plant uptake. So therefore, looking at the total amount of nickel that the rock contains and using that as a measure of whether it's good to apply is not always the best thing to do, because it really depends on how acidic soil is, how mobile a certain element will be. That is an important aspect. I'm also a bit concerned about field trials that are done with steel slag. I think steel slag is an amazing material to work with in reactors or in laboratory settings because it's very reactive. But you also bring so much waste into your soils that this is definitely not something I would recommend if that this is done on large scales. And the environmental impacts on the mining, so that's the source part more, which is a very important part. And on the one hand, it can if you start mining more, it can boost the economy of a certain region where the mining takes place. But it also comes at so much risk related to well, environmental pollution at the mining sites, but also the social safety of the people working. So I think that is a very important factor that needs to be taken into account. And ideally, I would see that at least in the early stages we work as much as possible with leftover material from mining that already takes place like what is done in Canada for example with a Molestinite that they use there. It's actually a very low quality Molestinite that is a leftover product from the mining activities that they already have there. And I think that is really the most efficient way of making use for ERW. But of course, if you really want to upscale to big scales then you would need to Mine more.

Also, I think an important environmental aspect when you apply it that you should avoid it to produce huge dust storms and otherwise, at least wear masks. But I think if you keep it a little bit wet, or if you make pellets out of it, then that's these are already ways of avoiding that that you produce these huge dust storms. I think that the sort of wet applying it difficult because if you have it wet then it's also more difficult to handle in the in the machinery. So I think this is another environmental impact or health impact, I would say that I'm concerned about.

Sarah Klingenberg: 41:03

And when we when we have enough renewable energy, it wouldn't be that big of a problem anymore, I guess if. If the electricity that is used is green.

E3: 41:15

Then that would be for the LCA, very beneficial I think, but still they would have dust, I think where you apply it with the machinery on the land, yeah.

Sarah Klingenberg: 41:35

Alright, yeah. How would you rate the current method of measuring the sequestered CO₂ by ERW?

E3: 41:49

That's a tricky question. So I don't know if you heard anything about Cascade by any chance. So Cascade is a community initiative aimed at producing a standard for ERW—how to apply it, how to measure it, etc. They spent half a year discussing with experts from companies and scientists, and then concluded that we can't really establish the standard yet because the field isn't developed well enough, so we're creating a pre-standard. I think this partly answers your question. The problem is that there are no current methods. There are multiple methods in use, and each measures something slightly different. Basically, there's the approach of looking at how much rock you've lost, which gives a maximum estimate of CO₂ that can be sequestered. Then if you have a column, for example, that you look at the leachate from, you collect the leachate and measure its contents. That's the part that's for sure, yeah, for sure. You mentioned alkalinity, and that's at least the minimum—I would say that's the part you can be certain has been sequestered. So it depends a bit on, and also for crediting purposes, this is the really challenging part because there can be a significant difference between that due to the time lag between a rock dissolving in the topsoil and the alkalinity you collect in the soil leachate. So it needs to be transported, and it also partly remains in the soil because it's attached to clay particles present in the soil and can also be taken up by plants. Depending on whether you remove the plant, or it stays on the land, you should also take that into account, yes or no. So, how would you rate it? It's very complex, and I think there will be better options in the future. I think the method developed at Yale University with Noah Planavsky—where they use isotopes to look at changes in magnesium to titanium ratios, at least that's a way they quantify how much of the rock is dissolved. I think that gives a very nice upper estimate that was lacking before. But I think in the future, we'll definitely get a better grasp on what's happening between when a rock meets the soil and when it leaves the soil. Once we have a better understanding of that, I think there will be better options available because right now, it's still a bit of a black box. The only thing we know is that there's a time lag, but how long that time lag is and what happens in between is still very uncertain. And that makes it very challenging to measure the sequestered CO₂. So you either work with an amount that's probably too high or an amount that's probably too low, basically.

Sarah Klingenberg: 45:04

And do you think better options could come in five years, 10 years, or 20 years?

E3: 45:39

I find it very challenging. There's so much work being done at the moment, I wouldn't be surprised if it's in five years, but I wouldn't bet on it.

Sarah Klingenberg: 45:55

Thank you. So, what political or regulatory challenges do you see as particularly serious when implementing ERW?

E3: 46:13

Ah yes, good question. I think the answer here mostly relates to the specific Dutch context, I should say. But I think it partly applies to the EU as well. The EU has very strict regulations on what can be added to soil. For instance, if you add a certain inorganic fertilizer, it can only contain a certain

amount of nickel. What I find strange is that they don't consider how much fertilizer you actually add; they only look at the concentration. So they say if it's 100 ppm, it can only contain up to 100 ppm of nickel. But if you apply 10 tonnes per hectare or 50 tonnes per hectare, you're still applying five times as much. I think that's a really strange rule that I don't understand. Also, I know that in Germany, there are different rules—they have higher limits. But then it's interesting to see what method they use to quantify this limit. Is it really the total amount, which requires working with harsh chemicals to fully dissolve the entire mineral and extract all the nickel, or is it an overestimation because part of it will never become free in soils? Or do they use specific extraction methods to extract what we call the geochemically reactive part? And there are different methods for that. So, I think aligning that and not just looking at concentrations but also at how much you apply per hectare or per square meter would make much more sense, I think. But changing these guidelines will be a hurdle. Then, from an EU perspective, I don't know if you've heard about the EU Carbon Removal Certification Framework. I'm really concerned that there are basically no scientists in that group. There are a lot of good people in that group, but hardly any scientists. I think that's really worrying.

Sarah Klingenberg: 48:48

Yes, that's true. Hopefully, they get scientists to help them understand everything.

E3: 48:56

I hope so, but I know at least 10 people who applied for positions in that framework, including myself, and none of us got in. When you look at the list and see who did get in, I'm like, okay, you really lack representation from natural sciences, and I think that's really worrying because you really need that knowledge to establish a good framework. I think they've opened the discussion, so I hope they get good input from scientists. But on the other hand, I also see some frustration among certain people there, so I don't know if that will really happen. From a Netherlands perspective, one thing that particularly applies is that one of the first scientists working on Enhanced Weathering was from the Netherlands, Olaf Schuiling. I don't know if you've heard that name. I think he had some really nice ideas. But in terms of making the Dutch government enthusiastic about the idea, he may have unintentionally caused some damage. He was a bit like a bulldozer in politics, advocating for using only olivine, and at some point, the downsides of that became clear. I think that may have led to the Dutch government not being as enthusiastic as they could be compared to other countries where it's easier to get research funded. That's my impression, but I think that's a very specific Dutch problem. On the other hand, in Germany, we have what's called a second-line policy. So, while there's EU regulation, at the local scale, there can be different regulations if you can show that your regulations are too strict for your particular ecosystem. They call it a second-line assessment, I think. There's a colleague in the Netherlands working on this for Enhanced Weathering, saying we can actually apply more because we know the nickel from minerals isn't as mobile as assumed. Generally, though, regulations are quite strict, but sometimes they're formulated strangely by only looking at concentrations and not amounts. I guess for political challenges, it really depends on the outcome of the upcoming EU elections and what happens there. But generally, the Netherlands is getting a new government that's more critical of climate policy than the previous one. That seems to be a trend across Europe, so we'll have to wait and see what happens.

Sarah Klingenberg: 53:21

Thank you. Alright, how do you view the role of ERW in current and future climate protection plans?

E3: 53:42

That's a very good question. Well, for the Netherlands, it's tricky. I think I already explained that a bit. And generally, what I find really interesting about governments is that you might think, "Oh, the

Green Party would be very much in favor of climate policy." But they are usually more against technological solutions. Many green parties view enhanced rock weathering as a technological solution rather than a nature-based solution. I would argue you can also see it as a nature-based solution because you're actually accelerating a natural process. But that, I think, is a tricky balance—how you perceive it. Whereas, on the other hand, the more right-wing parties are generally more in favor of technological solutions because then you don't have to change your behavior and things like that. So, I'm very curious about how ERW is being promoted—whether it's seen as a more technical solution or a more nature-based solution—and that will probably depend on the type of government a country has. I think there is momentum for the technique, so I think it will be growing, but I'm also a bit concerned at the same time about the lack of proper measurement and the fact that people are aware of that. And that's for a technique like DAC, that is much less of an issue.

Sarah Klingenberg: 55:49

For me, it's kind of weird because DAC is so inefficient right now, but it's so much more in the picture than enhanced rock weathering, which is so easy.

E3: 57:13

Do you know about the state of CDR reports? It's a report that came out last year, the first version, and next week they will launch the second version. In that report, they also make estimates of how much each technique can contribute at a global scale and also public perception of certain techniques. So, next week, the updated version will be presented. So, it might be nice for you to check out. I think there was a webinar related to that also.

Sarah Klingenberg: 57:28

Oh yeah, that sounds very interesting. What is it called exactly so I can write it down?

E3: 57:50

I think if you go to stateofcdr.org, I think that's the website.

Sarah Klingenberg: 58:04

Perfect. Thank you for the recommendation.

E3: 58:13

Of course. No problem. So, yeah, they made an estimate of ERW in [inaudible]. But they also showed that currently, out of all carbon removals, only a fraction comes from novel techniques, and everything else is afforestation and storing more organic carbon. So, I'm curious, actually, if that proportion has already increased. And I think an important step is that in the global carbon budget that is produced every year, they now explicitly included CDR for the first time in the most recent budgets. So, I mean, even if it's a tiny fraction, it's not important at all, but at least they explicitly acknowledge that it's a thing. And I think that's already a big step, that even people who make budgets more focused on natural science and not per se wanting to focus on CDR, acknowledge that it's important and actually removes carbon already.

Sarah Klingenberg: 59:36

Thank you. For a large-scale implementation of ERW, farmers need to be convinced of the effectiveness of this method. What strategies or arguments could be most effective for this?

E3: 59:58

I personally think focusing on the co-benefits, so the fact that yields can be improved, which is shown by studies—most studies show either no effect on yields or an increase in yields. The fact

that it can replace... Oh gosh, now I lost my English word... It can replace lime, so you can do this instead of liming. I think those are the arguments that farmers are most convinced of because, in the end, if they can get carbon credits for it, of course, because now... Because if they have to pay a lot of money, they probably wouldn't do it. So, it's the combination of that. But before the carbon credits are really well-developed, I would say showing that the yield impacts are the most important, though even they could pay probably less for fertilizers because of enhanced rock weathering. Yes, I mean, you cannot replace your nitrogen fertilizer, so you would always have to add nitrogen. But either not adding P&K or adding it in much smaller amounts, that would already save a lot. I should say, not much studied yet is that a lot of soils in the global... They suffer from lack of micronutrients. And by adding these rocks, you provide those micronutrients as well. So that's not... Although I'm not sure if you add all of them in sufficient amounts. So, as I said, I think this is something that is relatively understudied yet, but that could be for implementation in the global... Actually, be a nice additional argumentation. Then in Europe, that's not the case because there we don't have a lack of micronutrients in soils.

Sarah Klingenberg: 1:02:01

OK, perfect. How do you consider the costs of ERW compared to other CO₂ removal strategies? Are they acceptable?

E3: 1:02:17

I actually know very little about this, to be honest.

Sarah Klingenberg: 1:02:18

OK, yeah, no problem. We can also skip this question.

E3: 1:02:26

So I don't know how the cost of ERW compares to something like DAC, for example. I have no idea. I mean, the cost of a tonne of rock is definitely too high, I think, at the moment for this purpose. And if you compare it to the cost of lime or other fertilizers. So that's why for farmers currently, only if you farm organically and you anyway get a higher amount of... More money for your produce, I think it's financially beneficial for them. But yeah, for conventional farmers, because it's more expensive, you wouldn't buy it right now. But how this relates to DAC, so I have no idea.

Sarah Klingenberg: 1:05:57

Alright. Thank you. Do you think there will be any breakthroughs in the ERW research and execution that will bring entirely new perspectives?

E3: 1:06:15

Oh, that's a tough question. I think we sort of covered it partly already, but yeah, getting more details on the black box and also getting more details on the impacts on organic carbon. I think those are two really key priorities for... That people are looking at and that are very important and that will change the perspective or at least change how we quantify the net CDR potential at a certain time scale or at different time scales.

Sarah Klingenberg: 1:06:49

Perfect. So now we're at my last question. Is there anything you would like to add that was not sufficiently covered in the interview, and maybe can you recommend other experts in this field that we could contact to interview?

E3: 1:06:56

We haven't talked much about the role of models can play yet, so maybe that is something I want to add. I think there is some development in models. It's super complex because there are so many different processes that are involved that I think there is some nice progress made there in terms of certain Models that can at least give insight into what are the most important factors to take into account and to really measure if you are conducting a field trial. So maybe that's one thing to do or to add to that.

Sarah Klingenberg: 1:14:39

Thank you so much.

E3: 1:14:40

And yeah, would be happy to read it once the finalized version is there.

Sarah Klingenberg: 1:14:45

Thank you. Alright. See you. Have a nice day. Thank you. Bye-bye.

E3: 1:14:47

Yes. See you and good luck. Yes, you too. Bye.

Anhang 4

Transkript E4 31. Mai 2024

Sarah Klingenberg: 1:46

Hi.

E4: 1:48

Hello. Hi, Sarah. How are you?

Sarah Klingenberg: 1:50

Fine, thank you. How are you?

E4: 1:53

Fine. Thanks.

Sarah Klingenberg: 10:08

Could you share your opinion on Enhanced Rock Weathering as a method of CO₂ sequestration compared to other methods of CO₂ sequestration?

E4: 10:22

In principle, it's based on a natural system. You know, it's happening. I mean, there's enough research to show that at times of higher weathering, like after mountain formations, you know, the Himalayas and all these things, logically speaking, when there is an increase in weathering of silicate rocks worldwide, the climate cools down a little bit. It's a natural... It's based on a natural system that's going on. It's relatively easy, also in principle. Again, in principle, you know, you put rock dust that's out there, you put it on the soil, it has all the core benefits of it. It doesn't require expensive development of technologically advanced equipment like with DAC, for example. It should be easier to start and to get into. But of course, the price we pay... that we can't measure it because with DAC it's very easy. You measure exactly how much carbon you have in your filters. The same with biochar, but not so much with enhanced rock weathering. So, I believe that we need all of them because we need just too much CO₂ to be removed and stop emitting first and foremost, just stop pushing it out, ever. And then we need to remove it. So, I don't think it's one or the other. It's complementary. I like it because it's not competing. You can combine it with agriculture. So, it's not competing for land use. It's not competing for water. Whereas if you're doing biofuels, you're competing for water. You're competing for resources for food. If you do DAC, again, you need the land. Okay, it's not agricultural land, but you also need a lot of raw materials, a lot of input and resources to get it up and running again. So, I like it in theory. It's a nature-based, easily implemented method that's not really competing with other... I mean, for land use or for water.

Sarah Klingenberg: 12:26

Thank you. So, are there any agriculture farming systems that you consider particularly suitable for the application of enhanced rock weathering? And could you evaluate the impact of ERW on soil quality and health in these systems?

E4: 12:49

Well, from experience—because I did it myself—first of all, I mean, the idea would be that you would do it not once, but you do it every couple of years or every year. So, you need a farming practice where you have crops that are annual or in my opinion, because my first crop was cotton,

it's annual. My second crop is alfalfa, which stays for a couple of years. I'm now tending more to say you put a bigger amount in it and you leave it for three years because, as you know, every time that you're digging up soil, you're ploughing, you're taking up plants, you're seeding, you're losing also soil organic matter and stuff, and it's more expensive, also more expensive with carbon emissions if you put it out three times than if you put it out once. So, for sure, things like trees, like orchards or vineyards, it's less useful. It would be annual or perennial crops like alfalfa. They need enough water. This is another thing. So, you would also need something where most crops need water, where you have irrigation or you have enough water. Yeah, I think that's the main thing that I'm thinking about. And, of course, depending on which rocks you use, but in general, adding rock dust can have an impact on increasing pH, sometimes very small, sometimes significantly. If you put limestone, obviously, you know, so if it would be in more acidic soils or it would be crops that need for you to change the pH of the soil, then ERW would be very useful there. But it depends really on which material you use, which feedstock, because some of them can also give you some nutrients, so you are not completely but partially replacing fertilizer. But yes, so perennial crops are crops for a couple of years. They do need a lot of water because you need the water to do the wedding or do it's not happening. Relatively preferably warmer climates or higher temperatures. And yeah, it's also always good if the ERW can replace some other like liming or fertilizer things. The impact on soil quality and health in these systems, in theory, there have been a lot of research done on using rock dusts purely for agricultural reasons. There is less means it's more recent now on also taking down, you know, removing CO₂ from the air using rock dust. But I would say that, you know, in principle, it would make it better. Of course, you have to be careful. You don't want to put huge amounts of nickel or chromium on your soil when you're using olivine-rich rocks. You know, use your... But in principle, it would make it better because you're adding nutrients to the soil. You could also, again, depends, of course, on how much you put. You don't want to put too much. You could also change a little bit the texture of the soil if it's very clear, which then you put in more coarse things, that would also be good. But I would think that it would not affect it or it would affect it for the better. Again, you know, depending on how much you put in what you put, you have to use a bit your brain. But yeah, it has definitely the potential to do that.

Sarah Klingenberg: 16:07

And in your research, did you also recognize that the soil got better, or was it just in theory?

E4: 16:21

In mine, it's only two soils in Greece, and the rocks that I've added are only olivine-rich rocks, the ones that we have in Greece. So, it didn't make the soil worse. It didn't really change the texture of the soil because it was very similar in texture. It added a bit of magnesium and a little bit of nickel to the soil also, but nickel is also a plant nutrient. You know, like, we need some of it but not too much. It didn't deteriorate. Like, for sure, it didn't make anything worse. It didn't clearly improve it, but you know, it's only one type of rock dust and limited types of soil. Also, it's soils that are already high in pH. So, it's important to know, yeah.

Sarah Klingenberg: 16:58

So it wasn't like a specific acidic soil?

E4: 17:11

No, it was not acidic soils. These were soils that had already a really high pH.

Sarah Klingenberg: 17:15

So in Greece itself, you couldn't advertise it to farmers, for example, like, "This is a soil improvement you can get through ERW."

E4: 17:28

No, I was trying to find ways on a bigger scale to put rocks on the fields, you know, to scale up, but they don't do the reason where I am and generally in Greece, there it doesn't seem that they have to do any liming. Greece has a lot of carbonate limestone rocks. So, in general, the majority of the agricultural fields have a high pH anyway. So, if Greece is not doing any liming, they also don't have the machines to put the rocks on the soil, to do it on a bigger scale. So, no.

Sarah Klingenberg: 18:02

Interesting. Thank you. Which types of silicate rocks would you consider particularly effective for ERW?

E4: 18:17

Well, it's like when you're in the mining industry and you ask what is an ore and what is not; it depends on manufacturers. You need one that is local. It's like in Germany, for our German experiments, we used basalts because olivine isn't available and there is basalt. Olivine-rich rocks, okay. So in principle, if you look purely at the chemistry of the rocks and mineralogy, the olivine-rich rocks have the potential, if they're completely broken down in the best possible way, they have the potential to capture twice as much CO₂ as a result. But the olivine rocks, they have nickel and chromium, so maybe you cannot put so much on the fields, but the legislation there is also not logical. I mean, anyway, that's a different story. And then, on the other hand, the basalt has less nickel and more potassium and phosphorus potentially. So the basalt will be giving you more nutrients. So if you're looking only at the goal of purely capturing CO₂ as your main goal, then I would say more of the olivine-rich rocks. You know, well, it's like with, I mean, with grass or apples, there are so many different types of apples. So there are so many different, I mean, this is what I studied before. Do you have all the colors of the rainbow, let's say, in basalt rock? So it depends. Okay, purely from a chemical mineralogical point of view. And if your aim is CDR, it will be the olivine. But generally, you don't import olivine, so you avoid transportation emissions. Like theoretically, the best potential for CDR, it's the olivine-rich rocks. The result is also pretty good, second best, and it has the potential advantages for the crops and for agriculture. The one that we're using actually, let's say per tonne of rock dusts, it could capture 850 kilograms of CO₂. Like, you know, maximum, everything goes well, everything is broken down at the very, very end. Then the basalt that we're using has 400 or 450 kilograms, so that's why I'm saying half. But other basalts maybe only 200, so it's only a quarter of the olivine.

I'm also wondering, you are saying silicate rocks, so you're not taking into account limestone or industrial wastes because these days, people are also looking at cement? At steel slag. So is there a particular reason it's smart, but that you focused only on silicate rocks and not on carbon rocks or not on industrial wastes, alkaline materials.

Sarah Klingenberg: 22:08

It was something I looked into shortly and I wasn't a fan of it. I thought it was kind of, in my opinion, kind of dangerous to put steel slag on fields. And so I decided against. Just a perfect personal preference, kind of.

Alright. How do you rate the influence of different climates on the effectiveness of ERW?

E4: 23:23

In theory, it's big. In practice, we have to see, there have been a lot of research the last couple of years. There's been so much research being done and as you do with any scientific research, you come with 10 questions and two years later you answered maybe one and you have 100 new questions and it's exactly like this. We're in this moment of the PhD or a bachelor's where you don't

know where to start anymore. You try to put two ends together and you find 10 new ones. In theory, it has a big effect, and of course, I mean, it's logical. If you just look at the nature. The places where the rocks have, whether the soil has, whether to well, where the weathering happened the most, you have very poor soil, you know, like in, in, in Africa, in tropical climates, you know the soil there is benefiting the most from adding new mineral dust to it because everything was weathered out and weathered away already. You know like the soil is needed because the weathering happened there so very well. So it does definitely have an effect on the effectiveness of it. Temperature and water. Yeah. So tropical is the best.

Sarah Klingenberg: 24:36

I'm asking this question because I've read in many papers that this practice is often recommended in Brazil or India. Now, I see that many people in Europe still do it. I'm wondering if the effectiveness is still good enough in Europe, as one might say.

E4: 24:58

We're still in a research phase, you know, it's also practical. I mean, the people are doing it in India and in and in and in, okay. The locations where it's theoretically better from a climate point of view don't always have the infrastructure, they have good scientists, but they don't always have the money and the infrastructure in place to do it there, you know, so and the interest from this was also first coming. Olaf's Haling was first coming in Europe and it's not so easy to set up these experiments in a different country because you have to go every week, every two weeks to collect samples. So that's why we're doing a lot of research. Okay, in a greenhouse which is kind of improving also having more of a tropical climate, but This is why research is done here and it's good to know also whether or not it works. You know, if it works here, it should definitely work also in a different climate. But the influence will be quite big.

Sarah Klingenberg: 25:36

Thank you. Do you have any concerns about the environmental impact of ERW?

E4: 25:55

Of course, you have to be careful with what you put out there or how much. Many people say that you don't do olivine because of the nickel. I am actually in the, you know, I think we should keep looking into olivine and prove whether or not it's safe or whether. Well, now they say it's unsafe, don't use it, which is ridiculous looking into the legislation, they don't make sense. Like, it doesn't make sense to say that you can put a soil improvers or you can put in agriculture soil only substances with 100 ppm concentration without saying how much it can put, you know. The end. The end goal would be how much, how much nickel do you put at the end in the soil? You know, I can put 50 ppm, 10,000 tonnes. I'm exaggerating, right? And I can put of my, you know, so, so this is ridiculous. Or if they have the toxicity of nickel. European legislation is based on nickel salts, but we know that a nickel salt is going to dissolve in an instant. You put it in water, it's dissolving. So whatever nickel is in there, let's say that you have a nickel salt of 100 ppm. You put it in water. It's easily going to release all the nickel in there if you do it with a silicate rock. We wish it would happen like this, but it's not. This is the problem. So it takes maybe 20 years to dissolve it. So you see that it's not. It's. It's also not correct to have the limitations there so. We have to be careful for sure. Also, when you use olivine-rich rocks. Because of the geological history where they're coming from, they might have asbestos in them, but any mine that is selling these products already has to check for asbestos. So it's already, you know, it's already, it's, it's, it's not an extra thread, it's already checked. You have to look for nickel for chromium. But besides this, of course, you don't want to start opening up, let's say that you don't want to use olivine and you start opening up new basalt quarries. I mean, I'm living in Greece, where they're, they're, they're in almost every mountain. They're taking out the marble for the cement industry for building. It's very ugly, it's an environmental impact. It's ugly, but

also the nature there is disturbed. You have the trucks going around so. You have to think about you try to minimize to open many more mines for this purpose, try to use the rocks that are out there already. Just be smart. Don't get a rock from Germany because it's basalt to Greece because again, you have the footprint of the CO₂. Make sure that you're not putting too big amounts of it, that it's not, you know, affecting the but it's sensible because no farmer will allow you to do it if it's affecting his crop in any negative way. You have to be smart, but I think also it's sometimes exaggerated. For example, in Greece, I was looking at maps of the natural background of nickel and chromium, and especially I cannot find them in high resolution, only very pixelly. But it was still clear that within Europe some of the highest concentration natural background of nickel and chromium is in Greece because they have this olivine-rich rocks in the mountains, weathering naturally. So all the material that is weathered from this is going down into the rivers is in the huge plains where they're doing agriculture on. Again. We have to be careful, but according to the European legislation, you know already old souls are too high in the background. So yeah, I mean there are concerns, but just use your common sense. I would say, you know, don't say I don't want any olivine because of the nickel and then opening new basalt or bringing in the basalt from really far away like. And crushing.

Sarah Klingenberg: 30:22

Yes. Yeah. And you said like right now that you could be using the dust from already mined rocks.

E4: 30:22

It's something that you could do. I mean, if it hits off, there's going to be bigger demand.

Sarah Klingenberg: 30:32

Yes, we need more stones eventually. But maybe with renewable energy, like with the electricity in the milling process, it's not that big of a problem.

E4: 30:50

Yes, the milling. That would be a possibility for example. Yes, I mean in a country like Greece, you could use solar panels for that energy. The transport is still a problem of course. But yes, you could reduce the carbon footprint and make it more environmentally friendly to do it.

Sarah Klingenberg: 31:12

Thank you. How would you rate the current methods of measuring sequestered CO₂ by ERW?

E4: 31:27

This is a big discussion. Have you heard of Cascade, Cascade Climate? It's an American organization foundation that started last summer, around August. They aimed to gather everyone involved with ERW to establish community standards. Because you mentioned what happens to CO₂ mainly it's compensation, right? There have been so many scandals in compensation schemes. I mean, when you hear "compensation," most people already don't take it seriously anymore. They wanted to prevent this with ERW. So, they aimed to create a community standard, a best practice for measurement. Just yesterday, they sent an email saying that after many hours of discussion with scientists, they realized it's too early. Instead of imposing a strict standard, they'll write guidelines. This is what we know, how far we've come, and what we currently think is a good approach. But they encourage continuous innovation and more testing. It's too early to focus on a single method for measuring sequestered CO₂. We don't have a bulletproof method yet.

There are different approaches. Based on the chemistry and mineralogy of the rock, you can calculate how much CO₂ the rock can capture by dissolving through carbonic acid. For example, if it all dissolves through carbonic acid, capturing CO₂. because if you have nitrogen fertilizers, they dissolve through nitrogen, nitric acid. But let's assume it's all carbonic acid and it's completely

dissolved. Then you can calculate its maximum potential. Some companies or ideas are to check the soil after a while to measure how much rock has dissolved. You know, if 20% of my rock has dissolved, then I've already achieved 20% of my potential, but you have to subtract losses along the way. This is the simplest method. Another idea we've had is to look at the waters, you know, when olivine breaks down, it releases magnesium 2 plus, which combines with bicarbonate 8CO_3 minus, and they move together into groundwater and soil water. Then the question is, is it captured, or is it stored in groundwater or only in the ocean? It's a big debate, a long pathway. But we could already say, for example, that at a depth of 30 centimeters, if we measure in soil water, it's captured to this extent. Some percentage could still be lost to the ocean, but we don't see it easily. Many people don't see it easily because there's a delay in the soil. There are many processes happening in the soil; cations balancing carbonates are taken up by plants and soil. So, how would I rate current methods? They're still being developed. I don't think there's a robust method currently. It sounds dramatic, but these methods only look at one part of the carbon cycle. For example, some studies show that adding rock dust to soil increases crop yield, so the crop absorbs more CO_2 during the day but also releases more CO_2 . Adding rock dust nutrients to soil increases microbial activity, potentially releasing more CO_2 . The question is, was this carbon going to be released anyway? Was it loosely bound carbon released quicker? We see what's going up but not what's going down. I'm very skeptical about this method because it only looks at one part of the cycle.

Sarah Klingenberg: 37:37

Yeah, it's really challenging to bring everything together, right? That's probably why it's not fully developed yet.

E4: 37:44

Exactly, it's a work in progress. Many people are working on it too.

Sarah Klingenberg: 37:46

Thank you. So, we already talked a little bit about it, what political or regulatory challenges do you see?

E4: 37:57

Everything, everything. It's a nightmare. I work with German people, so my colleagues have been talking to the politicians, pitching ideas, putting them forward, and they're interested, but they don't want to commit. Politicians change every four years. So by the time you pitch the idea, they say, "OK, let's look into it, let's do some research." It's the next four years. So, I'm sorry. I've just had some really big disappointments on this. On a bigger European level, there was the Green Deal. I think part of the Green Deal was that if a company is emitting CO_2 , it can't just do it like that. It has to pay €80 per tonne of CO_2 emitted. And I heard that now they changed it and they only have to pay €30 per tonne. So, while a tonne of CO_2 captured, depending on the method—whether it's biochar, direct air capture—is going to cost between €20 and €300. What company on Earth, unless they have ethical concerns, will say, "OK, I'll pay €30 to emit it, or I'll pay €100 or €200 to remove it from the atmosphere"? They'll just emit it. They won't invest in removing it. It's not helping. Yeah, many problems.

Also, there's the European voluntary carbon market for carbon credits, and of course, we want to transition it into a compliance market. So, since last year, there was a round from the European Union asking for experts to be in a carbon dioxide removal expert group. Many from my group applied, but they didn't select anyone from our team. Instead, they included people from companies that I don't even know what they have to do with CDR, even oil company people were there. Like, OK, this is not working, guys, this is not working. There is an NS recording aligns now, which is across the whole community, industry worldwide, and with regards to Europe, they're going to try and put

a document together so that in October, enhanced recording is finally going to be on the table, scheduled for the European Union carbon dioxide removal expert group. But I mean, it's a disaster, politically speaking.

So, you can use olivine in the field. But you can also put olivine in seawater. You know, it's more direct to increase pH. So, a colleague had an amazing scientific research proposal where he was going to test it in Germany, you know, in some tanks, in some water. He got €500,000, half a million euro grand for it. And when he wanted to do it, by October 2020—when did I start this? 2019?—there was German regulation that you're not allowed to do any experimenting in ocean water because it's engineering; you cannot change it. So, he wrote a research proposal, got the grant, and then because of the legislation that was put out there, he couldn't do it. He had to give the money back. This is crazy. So, we have the politicians, politicians who don't know what it's about, who don't want to commit. We have Europe going backwards, not including, and in general, you know, if they say, "Don't pay €80," they should say, "Don't pay €30 now, no, pay €200. Don't go down, go up, please." We have the European Commission not including the experts in there, but they don't have any idea. This is the political part. And we have the same thing on regulatory, for example, regulatory, are you not allowed to do any experiments on the coast or on seawater because we have to protect it? Look at the experiment. It's a natural thing. I mean, there are literally olivine beaches in Hawaii. But no, the same. But as I told you, with the nickel, you know, yeah, you cannot put anything that has more than 100 ppm concentration. But how much can I put on it? Or if we don't mind, just a concentration that doesn't make any sense, people are going to calculate the toxicity of something based on products that have nothing to do with silicates. So, there are huge problems, politically and regulatory, because it's not based on science, because the people making decisions have no idea. Sorry for the rant here, but I gave you a couple of examples. I gave you a couple of examples now, why it's a complete disaster.

Sarah Klingenberg: 43:14

Please don't apologize, thank you very much. Do you think it will have a better, bigger role in the future climate protection plans, or maybe for the next 10 years or next 20 years?

E4: 43:37

Now worldwide, there is a big push, a big interest in the research, for companies, for carbon credits. So I think we will know in the next 5 to 10 years if it works or not. I believe that in principle, it should work. It's like gravity, OK? We know how it works. It's a natural process. It works in nature. So, I mean, naturally, rock weathering already removes about 1 gigaton of CO₂ from the air every year, right? So it makes sense to say, "OK, let's help it a little bit. Let's crush some more rocks, put it on fields." Practically speaking, it works. Whether it will be implemented in climate protection plans will depend a lot on, first of all, if we can find a good way to measure it. Because it's so complex, this little thing. And secondly, on the politics and the regulation. So I think it has potential because even if we cannot measure it easily, that doesn't mean it doesn't happen; it's a natural process. It's happening. I mean, I don't see this CO₂ in the air, but you know it's there. OK, it's very, very small. You know, we have to prove it first of all, which we're working on. Let's see how that goes. And then we need to inform the public and the politicians, the regulatory bodies. It's going to depend on that. So the next 5 to 10 years are going to be crucial for that, yeah. Because if you, for example, have biochar, you're OK, you take this CO₂ from the air by growing biomass and instead of having it decompose, you're putting in energy, so again, CO₂ or green energy to put it in a form that's stable for 1000 years, let's be optimistic, 1000 years. But you're competing again for soil space. You know, the biomass for the biochar has to grow somewhere. It needs land, it needs water. So you cannot scale it up unlimitedly. And the same goes for DAC. It's beautiful how you can literally see how much you took out. I mean, it's very expensive to build it, and also you should take into account all the expenses of building it, the raw materials, and subtract this from the CO₂ footprint to start off with. In the end, the scalability of that one is also not unlimited.

Sarah Klingenberg: 46:28

Yeah, especially right now, I don't know how it's improving.

E4: 46:46

And also you cannot just build huge capture plants everywhere, you know? So in this, it has really good potential, but because it's natural, it's really difficult to prove. So we will see; it could have a big role. I believe it could have a big role, but let's see how it plays out.

Sarah Klingenberg: 47:44

Yes, thank you. OK, for large-scale implementation of ERW, farmers need to be convinced of the effectiveness of this method. What strategies or arguments could be most effective for this? Especially now, when looking into Greece, when it's not really helpful for the soil?

E4: 48:07

OK, Greece has an economic crisis. People are poor; they're trying to survive. They don't care about the climate, let's be honest about it. If you give them money for it, they'll do it. Of course, you have to prove to them that it doesn't harm their crops. Compared to other countries, people there are more afraid for their soil. They're like, "OK, is it going to change my soil? Is it going to do something bad to my soil?" Because the soil is their responsibility; they pass it on to the next generations. They're afraid of that. Maybe this might be less of a concern for Greek people. Right, that "OK, what happens after me?" But of course, they don't want any negative effect on their crops because it will affect their livelihood. But if you can give them money for it, or any subsidies or anything, this is the best and maybe the only way to do it, because they're not going to do it just for the environment, yeah? So, I guess in some countries in the world, like maybe in tropical countries or in African countries, if it's improving the crop yield, they're on board directly by themselves. Here in Greece, it doesn't seem like it's directly improving the crop yield, so you have to prove it's not harming the crops, and then you have to give them a financial incentive to do it. A private company that pays for the rock dust and pays for putting it on the soil, and then the farmer has less fertilizer, and then they can use the credits for the private company or something like this, or the farmer has better crop yields. Maybe they use the same fertilizer, but their crop is better anyway. But otherwise, you'll have to pay them for it.

Sarah Klingenberg: 50:27

Yeah, I mean, especially in Germany, the farmers need so much support because they can't do it alone right now.

E4: 50:38

Yeah, it's everywhere; it's European, it's amazing, the thing called the European Union. Yeah. Although in Germany, or maybe in countries that are a little bit financially better off, there might be more goodwill to do it also for the climate. But in other countries, definitely not so, yeah.

Sarah Klingenberg: 51:27

Yeah. How do you consider the costs of ERW compared to other carbon removal strategies?

E4: 51:41

It's a variation; yeah, well, it's cheaper than DAC, but it's not as secure. So I was just saying to my colleague today that scientifically, it makes complete sense, the isometric standards, scientifically to what we speak now. But it's very limiting at this point in time. Like, it's sure, it's secure, it's very demanding, and yes, if you buy a carbon credit from ERW that has been credited through the isometric standard, so, so, so it makes sense, then that ERW carbon credit would be €200 per ton

because you know how much goes in there and how difficult maybe another company that's not in the voluntary carbon market or that's not with the isometric, it might be cheaper, but it might take longer, it might be less sure. With DAC, you can measure exactly how much you've captured, but I'm always wondering, you captured it, where are you storing it? It's only one part of the story; it's capturing and then where are you storing it? You know, CDR is literally the removal, but you need both packages, please. With biochar, you have the removal, you have the storage, but it's limited to 1000 years. I think a lot of the price, thinking about it, of the carbon credits at this point in time for an enhanced Weathering, it's exactly this, is the MRV, and there's still, if you're buying them now, you're still paying a lot for a lot of analysis that has to be done to make sure it's safe, to make sure it's valid. And this price, I mean, this is the whole community idea and what Cascade is pushing for; it should go down in five or ten years. But right now, when you pay such a high price for an enhanced Weathering carbon credit, you are also paying for the development set of this market and to figure out the best ways to measure it. So if you're noticing, I think it's acceptable; it's what you want, you know. Do you want to take out your share and depend on how much you can afford, like with everything in life? You can do biochar; it's going to be locked for a couple of hundred or 2000 years, and you did something to remove your CO₂. If you have more money and you're willing to be a little bit more risky and to help further another industry, you can go for it. I think it's important that the clients know because it's not the same credit, and it's not the same thing behind it. So yeah, I think the costs are acceptable.

Sarah Klingenberg: 59:51

Yeah, thank you. So this is the second last question. Yeah. Do you think there will be any breakthroughs in the research or execution that will bring entirely new perspectives?

E4: 1:00:05

If so, I hope there's going to be a lot more research going to be done, but I cannot know now what is going to be the breakthrough or a new perspective. As in the soils, like in the German research group we're seeing that the soil has a lot more effect than we thought. Like you touched on climate, you talk some silicate rock this and this is the traditional theoretical stuff that I also started with 3 1/2 years ago. But actually, you know, it doesn't matter. OK. The potential initial potential depends on the rock for sure. But then how much of that potential can actually be realized depends on the climate, but also really much on the soil we see. So I think that there could be some quite big breakthroughs in realizing which soils are good or not or which shows with Rick with rock combination, how that relationship actually plays out. And then if that is very different from what we expected, of course it's going to change where we want to do it or way you could do it best. We're also trying to figure out what is happening to the products of the solution. So the cations and the bicarbonates. Trying to close the carbon cycle because there is also, you know, the fertilizing effect has effect on the plants grow more or less take up more or less but also Respiring more or less bacteria doing more or less, so you have more reflux. Since that usually quite a lot of the times. There's CO₂ coming out of the soil at night, but it's only one part of the carbon. You don't know what happened to it. Is this just from the plants that are breathing it out again? Is it bacteria that's breaking stuff down quicker and we'll stop after a while? We don't know what happened to the so organic matter that you know, the longer stored soil carbon, it's difficult to see what's happening. With the carbon that's going away through the groundwater, if you have, of course, if you're having some, some circumstances, you actually can measure the storage, that is emitted in the soil. If you have the CO₂ that you capture from the air in a carbonate and you make it the calcite, you know, a mineral in the soil, then it's very OK, it can be dissolved. But then it's very straightforward. Then you have a storage right there, but there are many parameters. Should be breakthroughs in exactly how it affects the whole carbon cycle. And we were looking at the inorganic one, but we also have to look at the organic one.

Sarah Klingenberg: 1:02:57

OK, thank you. I have like one last question. Is there anything you would like to add that was not sufficiently covered in the interview and if you could recommend other experts I might could.

E4: 1:03:11

The potential I think it has because it's natural and you can scale it up so hugely, it has huge potential. You know, there is a small chance that maybe 10 years from now we realize we we can't measure it. So there is no market but we have to look into it. So now is really, really the moment that, you know, scientifically regulatory politically is the moment that we have to try this one out could be a dead end, could be I mean I'm sure it works but could be dead end because we can't measure it or for whatever other reason like human related reason like but we have to figure it out now. It depends on the regulations. If you do things like this, you know if they say you cannot use the nickel because blah blah blah. Yes, if they say Oh well, but you know for €10, you can just admit it without taking it back out of the atmosphere. How strict look like the standard from isometric for the enhanced quadrant carbon credits. It's a very neat, very tight, specifically very rigorous one, but it's a very high bar. Not many people will be able to reach that, but I mean, I read through the whole document. Yeah, actually I'm thinking now. I mean they say, what do they do with the carbon ones? They captured it. Because they can measure, I captured it. But where are they storing it? This is the next question.

Sarah Klingenberg: 1:21:22

Thank you. Have a nice weekend.

E4: 1:21:24

Thank you. You too. Have a nice weekend.

Sarah Klingenberg: 1:21:26

Thank you. Bye bye.