



---

seit 1558

# FRIEDRICH-SCHILLER-UNIVERSITÄT JENA

Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät

Institut für Geowissenschaften

BGEO4.4

Wissenschaftliches Arbeiten

## **ENHANCED WEATHERING Methoden und Umsetzung**

Anton Neundorfer

Matrikelnummer: 190145

Modulleiter / Hausarbeitsbetreuerin:

Prof. Dr. Kai Uwe Totsche / Dr. Michaela Aehnelt

Jena, den 06. Juli 2021

## **Zusammenfassung**

Die Verwitterung von Silikaten stellt den langfristigen Teil des Kohlenstoffkreislaufes dar, welcher über geologische Zeiträume den CO<sub>2</sub> Gehalt der Atmosphäre und damit das Klima reguliert.

Enhanced Weathering stellt ein Konzept der Kohlenstoffdioxid Entfernung (CDR) dar, welches an den Prozessen des langfristigen Kohlenstoffkreislaufes ansetzt, indem die dort ablaufenden Prozesse so beschleunigt werden sollen, dass in menschlichen Zeitspannen atmosphärisches CO<sub>2</sub> gebunden werden kann. Hierfür soll silikatisches Gesteinsmaterial klein gemahlen und über Land- oder Meeresflächen ausgebracht werden um über die so entstehende große reaktive Fläche höhere Verwitterungsraten als natürlich möglich zu erreichen – und signifikante Mengen an CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre abzuführen. Ein positiver Nebeneffekt dieses Konzepts ist eine Bekämpfung der Ozean Versauerung durch Eintrag von säurebindender Alkalinität in die Ozeane. Ein klarer wissenschaftlicher Konsens darüber, wieviel CO<sub>2</sub> mit dieser Methode praktisch sequestriert werden kann ist allerdings nicht gegeben. Außerdem ist das Konzept mit möglichen Risiken, wie der Freisetzung von Schwermetallen (Ni, Mn und Cr) und der Erhöhung des pH-Wertes von sensiblen Süßwassersystemen verbunden, welche vor dem Einsatz dieser Methode geklärt und abgewogen werden müssen.

In dieser Arbeit wird der Stand des Wissens über Enhanced Weathering wiedergegeben und die diesem zugrundeliegenden Mechanismen erklärt. Anschließend wird Enhanced Weathering in Bezug auf den anthropogenen Klimawandel diskutiert.

# Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnisse .....	3
2	Einleitung.....	1
2.1	Zielsetzung .....	2
3	Material und Methoden .....	3
3.1	Material.....	3
3.2	Methoden.....	3
4	Ergebnisse.....	4
4.1	Natürliche Verwitterung und der Carbonat-Silikat-Zyklus .....	4
4.2	Enhanced Weathering .....	6
4.2.1	Umsetzungsstrategien.....	6
4.2.2	EW als CDR-Methode .....	7
4.2.2.1	CDR Raten und globales Potential .....	7
4.2.3	Kofaktor: EW zur Bekämpfung der Ozean-Versauerung.....	13
4.2.3.1	Verteilung im offenen Ozean .....	15
4.2.4	Mögliche Nebeneffekte und Risiken .....	15
5	Diskussion und Schlussfolgerung .....	17
6	Literaturverzeichnis.....	19
6.1	Weiterführende Literatur .....	20

# 1 Verzeichnisse

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Umsetzbarkeit von 1,5°C-relevanten CDR-Methoden.....	2
Abbildung 2: Betrachtung der dem Karbonat-Silikat-Zyklus zugrundeliegenden chemischen Reaktionen.....	4
Abbildung 3: Vereinfachte Gleichungen des Lösungsprozesses von Carbonaten und Silikaten .....	5
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Karbonat-Silikat-Zyklus.....	6
Abbildung 5: Lösungsdauer eines perfekt gerundeten, 1mm großen Kornes in einer Lösung mit pH 5 .....	8
Abbildung 6: Mineralogische Zusammensetzung im Olivin-Orthopyroxen-Klinopyroxen Diagramm .....	8
Abbildung 7: Zusammenhang zwischen der Lösungsrate $D$ und der Korngröße bzw. der für die Zermahlung benötigten Energie .....	9
Abbildung 8: Verwitterungsrate im Vergleich zu A) dem jährlichen CDR Potential für eine Korngröße von 20 $\mu\text{m}$ und B) der Korngröße für ein jährliches CDR Potential von 4 Gt $\text{CO}_2/\text{a}$ .....	13
Abbildung 9: Weltweites Ackerland aufgeteilt in warme und temperierte humide Klimate .	12
Abbildung 10: Enhanced Weathering verringert ansteigende Ozean Versauerung durch zukünftige $\text{CO}_2$ Emissionen.....	14

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Verwitterungsraten in $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ von Dunit und Basalt bei $\text{pH}=7$ und $T=25^\circ\text{C}$ .	11
Tabelle 2: Zusammenfassung potentielle Nebeneffekte durch Enhanced Weathering .....	16
Tabelle 3 Bestehender Forschungsbedarf zum besseren Verständnis von Enhanced Weathering .....	18

## **Abkürzungsverzeichnis**

EW .....	Optimierte Verwitterung ( <i>Enhanced Weathering</i> )
CDR .....	Kohlenstoffdioxidentfernung ( <i>Carbon Dioxide Removal</i> )

## 2 Einleitung

Es ist nicht zu bestreiten, dass der Umgang mit dem anthropogenen Klimawandel – insbesondere Bemühungen zur Verringerung der globalen Erwärmung und deren Auswirkungen – eine der wichtigsten Aufgaben und Herausforderungen der Menschheit im 21. Jahrhundert darstellt.

Um die Auswirkungen des Klimawandels möglichst auf ein Minimum zu reduzieren, sollte die Erderwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich mit prä-industriellen Werten 2°C – besser noch 1,5°C – nicht überschreiten. Um möglichst wenig oder nicht über 1,5°C hinauszugelangen müssen laut dem Weltklimarat neben einer Minimierung der Treibhausgasemissionen auch Methoden der Kohlenstoffdioxid-Entfernung (CDR, carbon dioxide removal) im Bereich von 100 - 1000 Gt CO<sub>2</sub> während des 21. Jahrhunderts angewandt werden. CDR könnte sowohl angewandt werden, um anfallende Emissionen auszugleichen als auch um netto-negative Emissionen zu erreichen und somit im Falle eines Überschreitens der 1,5°C-Grenze die Erwärmung nachträglich wieder zu reduzieren. (IPCC, 2018, S. 17)

Zu den bestehenden und potenziellen CDR-Methoden gehört neben der Auf- und Wiederaufforstung, der Landrenaturierung und Kohlenstoffsequestrierung in Böden, der Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) und der direkten Abscheidung von Kohlendioxid aus der Luft mit anschließender Speicherung (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) auch die künstlich beschleunigte bzw. optimierte Verwitterung (EW, Enhanced Weathering). (IPCC, 2018, S. 17)

Abbildung 1 zeigt eine Einschätzung über die Umsetzbarkeit verschiedener Methoden zur Kohlenstoffdioxid Entfernung aus der Atmosphäre, welche im Rahmen des „Sonderberichtes 1,5°C Globale Erwärmung“ 2018 durch den Weltklimarat veröffentlicht wurde.

System	Mitigation Option	Evidence	Agreement	Ec	Tec	Inst	Soc	Env	Geo	Context
Carbon Dioxide Removal	Bioenergy and carbon dioxide capture and storage	Robust	Medium							Depends on biomass availability, CO <sub>2</sub> storage capacity, legal framework, economic status and social acceptance
	Direct air carbon dioxide capture and storage	Medium	Medium							Depends on CO <sub>2</sub> -free energy, CO <sub>2</sub> storage capacity, legal framework, economic status and social acceptance
	Afforestation & reforestation	Robust	High							Depends on location, mode of implementation, and economic and institutional factors
	Soil carbon sequestration & biochar	Robust	High							Depends on location, soil properties, time span
	Enhanced weathering	Medium	Low							Depends on CO <sub>2</sub> -free energy, economic status and social acceptance

Abbildung 1: Umsetzbarkeit von 1,5°C-relevanten CDR-Methoden. Dunkle Schattierung zeigt die Abwesenheit von Barrieren für die Umsetzbarkeit in diesem Bereich, moderate Schattierung zeigt, dass dieser Bereich weder negativen noch positiven Effekt auf die Umsetzbarkeit hat oder dass die Belege hierfür nicht eindeutig sind und geringe Schattierung bedeutet, dass es hier möglicherweise die Umsetzbarkeit einschränkende Barrieren gibt. Keine Schattierung bedeutet, dass es nicht ausreichend Belege in der Literatur gibt, um Einschätzungen über die Umsetzbarkeit treffen zu können. Die Informationen im Context-Feld zeigen, durch welche Kontextabhängigkeiten sich die Einschätzungen verändern könnten. Abkürzungen: Ec: Ökonomisch - Tec: Technologisch - Inst: Institutionell - Soc: Sozio-kulturell - Env: Umwelttechnisch/Ökologisch - Geo: Geophysikalisch (de Coninck et al., 2018, S. 382)

Die chemische Verwitterung von Gesteinen – insbesondere Gesteinen mit einem hohen Silikat-Anteil – stellt einen wichtigen Teil des klimaregulierenden, globalen, langfristigen Kohlenstoffkreislaufes dar. Bei der chemischen Verwitterung löst sich das Ausgangsmaterial in Verbindung mit CO<sub>2</sub> und Wasser (Kohlensäure) auf. Die Lösungsprodukte (Bicarbonat) werden anschließend über Flüsse in Ozeane transportiert, wo sie dann über lange Zeiträume, häufig als Carbonate gespeichert werden. Dieser Prozess der Gesteinsverwitterung unter Abführung von Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub> kann künstlich optimiert werden – es wird von Enhanced Weathering gesprochen. Hierfür werden Gesteine künstlich auf kleine Korngrößen reduziert und anschließen über Landflächen, Küstengebiete oder den offenen Ozean verteilt. (Strefler et al., 2018, S. 1–2)

## 2.1 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es mittels einer ausführlichen Literaturrecherche und -analyse Mechanismen, Prozesse und Methoden, die dem Konzept des Enhanced Weathering zugrunde liegen zu erklären, den Wissensstand darzulegen und eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema zu ermöglichen. Es soll auch auf verschiedene Umsetzungskonzepte eingegangen werden. Außerdem sollen mögliche Risiken für Mensch und Umwelt beleuchtet werden. Das Thema soll zudem im Hinblick auf den Klimawandel diskutiert werden.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Material

Zur Informationsgewinnung für diese Arbeit wurden neben der Literatursuche der Thüringer Universitäts- und Landesbibliothek (ThULB) die Datenbanken GeoRef, Web of Science und SciFinder<sup>n</sup> verwendet. Ebenso wurde Google Scholar eingesetzt – vor allem für die Volltextsuche.

Des Weiteren wurden ein fachliterarisches Werk, einige Peer-Review Paper aus verschiedenen Periodika und eine veröffentlichte Doktorarbeit genutzt.

Als Hauptinformationsquellen für die Arbeit dienten folgende Veröffentlichungen:

1. *Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification.* (Hartmann et al., 2013)
2. *Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks.* (Strefler et al., 2018)
3. *Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification* (Taylor et al., 2016)

#### 3.2 Methoden

Die erste Literatursuche erfolgte über die Literatursuche der ThULB mit dem Stichwort „*Enhanced Weathering*“. Diese Suche lieferte nur ein Ergebnis (Power et al., 2013). Die in diesem Werk im Kapitel zu Enhanced Weathering Werk zitierten Quellen lieferten einen guten Überblick über weitere bis dahin veröffentlichte Literatur.

Die weitere Suche erfolgte schließlich überwiegend mittels der oben aufgeführten Datenbanken. Stichwörter und Verknüpfungen waren „*Enhanced Weathering*“; „*Enhanced Weathering*“ AND risks; „*Enhanced Weathering*“ AND silicic acid; „*Enhanced olivine Weathering*“; „*Enhanced Weathering*“ AND implementation und „*Carbonate Silicate Cycle*“;

Weitere Literatur wurde über Artikel, in welchen die Arbeit von Strefler et al. (2018) zitiert wird und über die englischsprachigen Wikipedia Artikel „Enhanced Weathering“ und „Carbonate-Silicate-Cycle“ gefunden.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Natürliche Verwitterung und der Carbonat-Silikat-Zyklus

Der Gehalt an atmosphärischem  $\text{CO}_2$  und damit das Klima der Erde wird langfristig durch die verschiedenen Teilzyklen des Kohlenstoffkreislaufs kontrolliert. Hierzu zählt neben dem organischen, kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf, welcher über Photosynthese auf der einen Seite und Veratmung und Zersetzung auf der anderen Seite fungiert, auch der anorganische, langfristige Kohlenstoffkreislauf – der Carbonat-Silikat-Zyklus.

In Bezug auf die Langzeitklimawirkung ist der Carbonat-Silikat-Zyklus der wichtigste Teil des globalen Kohlenstoffkreislaufs.  $\text{CO}_2$  bildet mit Regenwasser die schwache Kohlensäure  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , welche über geologische Zeiträume silikatisches Gestein verwittert. Verwitterungsprodukte der kohlensäureinduzierten Silikat-Verwitterung sind unter anderem  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  Ionen, Hydrogencarbonat-Ionen  $\text{HCO}_3^-$  und gelöstes  $\text{SiO}_2$ . Diese werden über Flüsse in Ozeane transportiert, wo verschiedene Organismen diese Produkte in ihre Schale einbauen. Beispielsweise verwenden Foraminiferen das  $\text{Ca}^{2+}$  für ihre Calciumcarbonat-Schalen, Radiolarien verwenden das gelöste  $\text{SiO}_2$ . Sterben diese Organismen, so lösen sich die meisten Schalen wieder auf – ein gewisser Teil bleibt aber erhalten und wird in Sedimenten vergraben. Die Kombination der Silikat Verwitterung mit der Carbonat Ausfällung lässt sich also wie in Abbildung 2 gezeigt darstellen. (Kasting & Catling, 2003, S. 439–441)

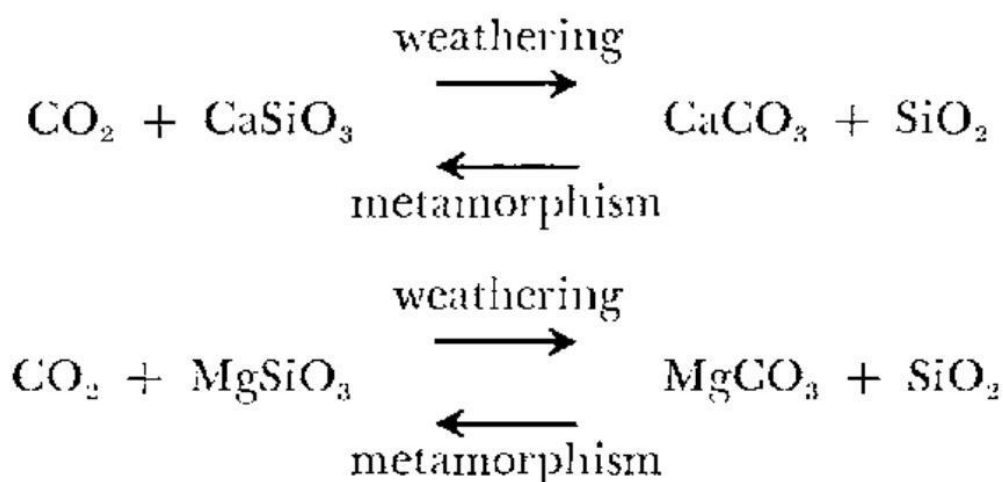


Abbildung 2: Betrachtung der dem Carbonat-Silikat-Zyklus zugrundeliegenden chemischen Reaktionen (stark vereinfacht) (Berner et al., 1983, S. 642)



Abbildung 2 zeigt auch den Prozess, durch welchen CO<sub>2</sub> langfristig gesehen wieder in die Atmosphäre zurückgeführt wird. Wäre das nicht der Fall wäre irgendwann das gesamte atmosphärische CO<sub>2</sub> in Carbonaten angereichert und die Erde nicht mehr bewohnbar.

In Abbildung 3 sind Lösungsprozesse anderer Minerale und der „Nettoverbrauch“ an CO<sub>2</sub> während dem Verwitterungsprozess in vereinfachten Gleichungen dargestellt.

Durch Versenkung der Carbonate an Subduktionszonen rekombinieren diese mit dem dann als Quarz vorliegendem SiO<sub>2</sub> und bilden wiederum Silikate unter Freisetzung von CO<sub>2</sub>, welches über Vulkanismus wieder in die Atmosphäre übergeht. Abbildung 4 fasst den Carbonat-Silikat-Zyklus zusammen.

#### Typical mineral reactions

(**educts** ⇒ **ions and silica in solution, secondary minerals** ⇒ **precipitation reactions in the ocean**)

##### **Calcium carbonate (not a silicate)**



##### **Olivine (silicate)**



##### **Albite (silicate)**

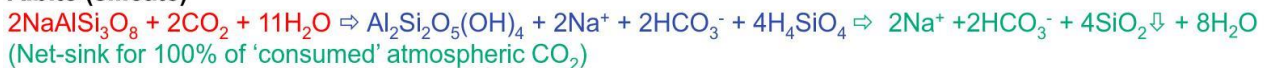


Abbildung 3: Vereinfachte Gleichungen des Lösungsprozesses von Carbonaten und Silikaten und Beschreibung des "Nettoverbrauch" an CO<sub>2</sub> während der Verwitterung mittels Kohlensäure aus Wasser und CO<sub>2</sub> (Hartmann et al., 2013, S. 115)

Dieser Prozess führt zu einer langfristigen Klimakontrolle, denn die Verwitterungsraten von Silikaten vergrößern sich mit steigender Temperatur, was dazu führt, dass mehr CO<sub>2</sub> abgeführt wird, was wiederum zu einer Abkühlung des Weltklimas führt – und andersrum: wenn es kalt ist, sind die Verwitterungsraten gering und es verbleibt mehr CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, was zu einer Erwärmung führt. (Kasting & Catling, 2003, S. 439–441)

Diese natürliche Temperaturregulierung erfolgt über geologische Zeiträume und ist damit deutlich zu langsam, um dem anthropogenen Klimawandel entgegenzuwirken. An dieser Stelle greift das Konzept des Enhanced Weathering an.

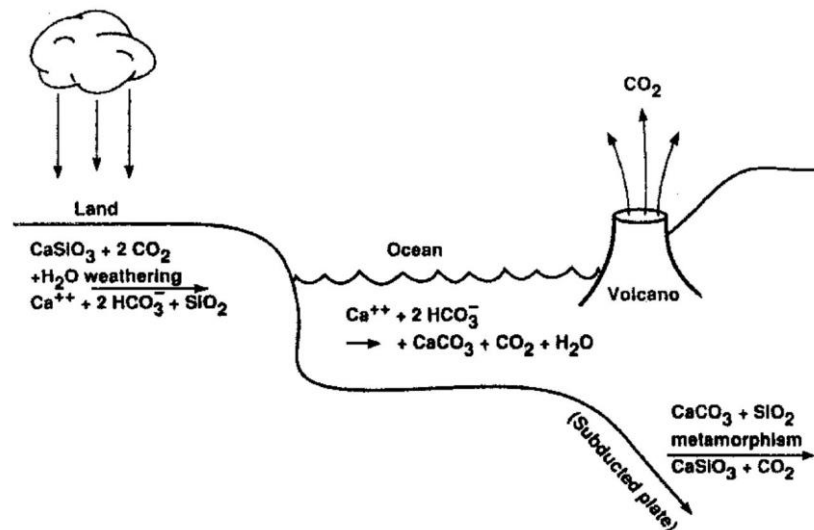


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Karbonat-Silikat-Zyklus (Kasting & Catling, 2003, S. 440)

## 4.2 Enhanced Weathering

Im folgenden Kapitel soll das Konzept des Enhanced Weathering als Methode der Kohlenstoffentfernung und die zugrundeliegenden Mechanismen vorgestellt werden. Des Weiteren werden Strategien bzw. Methoden der Umsetzung erläutert.

### 4.2.1 Umsetzungsstrategien

Wie bereits erwähnt gibt es verschiedene Überlegungen Enhanced Weathering zu realisieren. Nach Hartmann et al. (2013, S. 117) zählen zu den Umsetzungsstrategien unter anderem folgende Methoden:

- Verteilung von fein zerkleinertem Silikatpulver auf Landflächen.
- Verteilung reaktiven Materials auf der offenen Meeresoberfläche.
- Verteilung geeigneten Materials in den Küstenbereichen, wo Wellengang die natürliche Verwitterung zusätzlich beschleunigen kann.
- Verteilung von künstlichen Produkten wie Eisen- und Stahlschlacke oder Reste aus der Zementproduktion. Diese Materialien sind schnell löslich und haben wie silikatisches Gestein das Potential  $\text{CO}_2$  zu konsumieren.
- Pumpen von  $\text{CO}_2$  in mafische bzw. ultramafische Formationen, um die chemische Verwitterungsrate und die Carbonatisierung zu erhöhen.

Die meisten bisherigen Veröffentlichung zu EW befassen sich mit der Verteilung an Land. Aus diesem Grund liegt der Fokus dieser Arbeit ebenfalls hier.

## 4.2.2 EW als CDR-Methode

Im großen Stil eingesetzt kann eine künstlich beschleunigte Verwitterung von silikatischem Gestein theoretisch eine signifikante Menge an CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entziehen und so dem Klimawandel entgegenwirken. Im folgenden Abschnitt soll auf das Potential zur Kohlenstoffdioxidentfernung von EW eingegangen werden.

### 4.2.2.1 CDR Raten und globales Potential

Die Frage, wieviel CO<sub>2</sub> mittels Enhanced Weathering sequestriert werden kann, ist nicht sehr einfach zu beantworten. Wie schon in Abbildung 1 gezeigt ist sich die Wissenschaft bei dieser Methode noch nicht einig. Es gibt noch nicht ausreichend Belege um klare, evidenzbasierte Werte nennen zu können.

Die Raten mit welchen CO<sub>2</sub> mittels EW sequestriert werden kann sind abhängig von vielen Parametern. Nach Strefer et al. (2018, S. 3) sind das insbesondere die folgenden drei Parameter:

1. Die Masse an Gestein, welches auf eine bestimmte Fläche aufgebracht wird –  $M$  [kg/m<sup>2</sup>]
2. Die Lösungsrate – also der Anteil an Gestein, welcher pro Jahr verwittert – in Abhängigkeit von der Korngröße  $x$  und der Verwitterungsrate  $WR$  –  $D(x, WR)$  [Lösung pro Jahr]
3. Das spezifische Sequenzierungspotential –  $P$  [einheitsloser Faktor]

Diese Faktoren lassen sich in einer Formel für die jährliche CO<sub>2</sub>-Sequenzierungs-Rate  $R_{CO_2}$  zusammenfassen:

$$R_{CO_2} = M \cdot D(x, WR) \cdot P \quad [kg \, m^{-2} a^{-1}] \quad (1)$$

Die höchsten Sequenzierungspotentiale und Lösungsraten liefern ultramafische Gesteine mit einem geringen SiO<sub>2</sub> Gehalt und einer großen Menge an dem besonders schnell verwitterndem Mg-Olivin Forsterit Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Abbildung 5 zeigt Lösungszeiten perfekter Körner für ausgewählte Minerale. Es ist festzustellen, dass Forsterit das sich am schnellsten lösende Silikat ist, welches hier aufgelistet wird. Nach Strefer et al. liefern Dunite ein Sequenzierungspotential von 1,1 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Dunit. Mafische Gesteine haben ebenfalls ein recht hohes Sequenzierungspotential. Basalte liefern etwa 0,3 Tonnen CO<sub>2</sub> / Tonne Basalt.

Mineral	Dissolution Time (a)
Quartz	34,000,000
Kaolinite	6,000,000
Muscovite	2,600,000
Epidote	923,000
Microlite	921,000
Biotite	900,000
Albite	575,000
Andesine	80,000
Bytownite	40,000
Enstatite	10,100
Diopside	6,800
Forsterite	2,300
Dolomite	1.6
Calcite	0.1

Abbildung 5: Lösungsdauer eines perfekt gerundeten, 1 mm großen Korns in einer Lösung mit pH 5 (Hartmann et al., 2013, S. 118)

Das hohe Potential von Duniten ist nicht verwunderlich, wenn die mineralogische Zusammensetzung dieser Gesteine betrachtet wird, da Dunite mindestens 90% Olivin enthalten, wobei der besonders schnell verwitternde Forsterit überwiegt (siehe auch Abbildung 6).

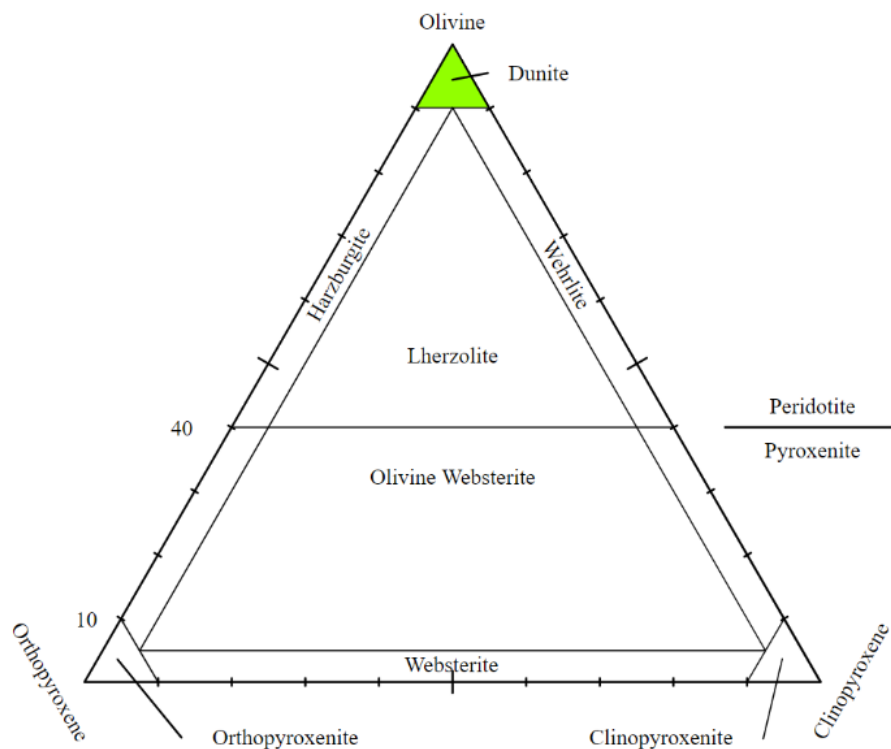


Abbildung 6: Mineralogische Zusammensetzung im Olivin-Orthopyroxen-Klinopyroxen Diagramm. Der Bereich für Dunite ist grün hinterlegt. (Tobias1984 - commons.wikimedia.org; aufgerufen am 08.06.21).

Strefler et al. schätzen den Anteil an Material, welches innerhalb eines Jahres in Abhängigkeit der Korngröße  $x$  und der Verwitterungsrate  $WR$  gelöst wird, mit folgendem Zusammenhang ab:

$$D(x, WR) = O_s(x) \cdot WR \cdot m \cdot t [a^{-1}] \quad (2)$$

$O_s(x)$  ist hierbei die korngößenabhängige spezifische Oberfläche [ $m^2/g$ ],  $WR$  die Verwitterungsrate basierend auf der Kornoberfläche [ $mol/(m^2 s)$ ],  $m$  die molare Masse des Materials [ $g/mol$ ] und  $t = 3,155 \cdot 10^7$  s/a um  $WR$  von  $1/s$  in  $1/a$  umzurechnen. Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang der Lösungsrate und der Korngröße (x-Achse oben) bzw. der Energie, welche benötigt wird, um Material auf eine gegebene Korngröße zu zerkleinern (x-Achse unten). Je kleiner die Korngröße und damit je größer die spezifische Oberfläche, desto schneller löst sich das Material – desto mehr Energie wird aber auch für den Zerkleinerungsprozess benötigt.

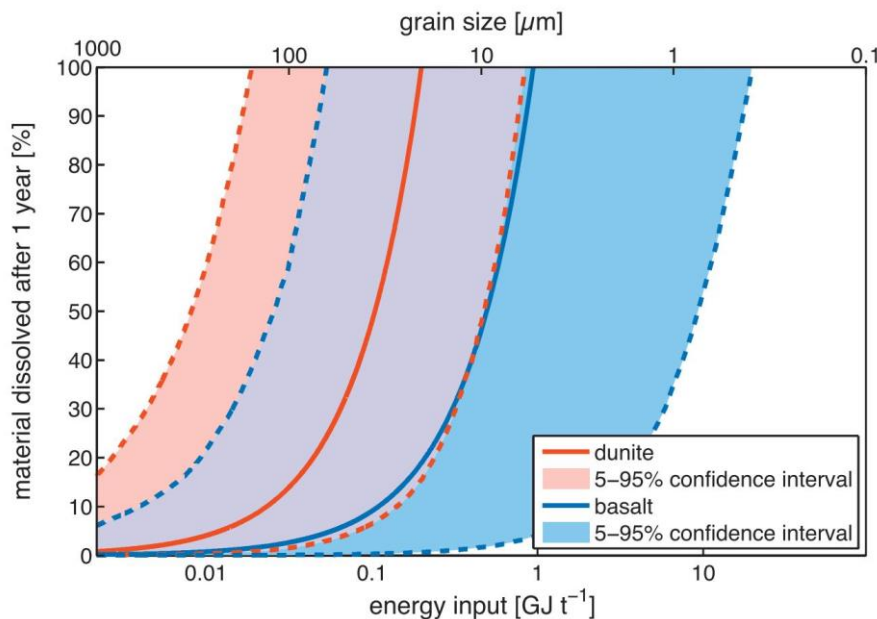


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen der Lösungsrate  $D$  (y-Achse) und der Korngröße bzw. der für die Zermahlung benötigten Energie basierend auf Gleichung 2. Die Unsicherheiten wurden von den Autoren numerisch berechnet und beinhalten sowohl die Unsicherheiten der Verwitterungsraten als auch die Unsicherheiten der spezifischen Oberfläche. (Strefler et al., 2018, S. 4)

Gleichung (1) und (2) zusammengefasst ergeben also eine allgemeine Formel für das CDR-Potential – die Masse an  $CO_2$ , welche für eine gegebene, auf eine bestimmte Fläche  $A$  aufgetragene Masse an Ursprungsmaterial in einem Jahr maximal sequestriert werden kann:

$$CDR(x, WR) = A \cdot R_{CO_2} = A \cdot M \cdot O_S(x) \cdot WR \cdot m \cdot t \cdot P \text{ [kg a}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

Für die Berechnung der Lösungsrate  $D(x, WR)$  wird hier allerdings ein stark idealisierter Lösungsprozess angenommen, welcher die Oberflächenänderung während des Lösungsprozesses vernachlässigt. Andere Autoren (z.B. Renforth et al., 2015) verwenden Modelle, welche diese berücksichtigen. Solche Modelle haben aber den Nachteil, dass sie von perfekten Kugeln anstatt von hoch-irregulären Körnern ausgehen, was nach Strefer et al. zu einer starken Verringerung der spezifischen Oberfläche um das bis zu 40-fache führt. Die Nachteile beider Modelle zeugen an dieser Stelle wieder von weiterführendem Forschungsbedarf.

Die Verwitterungsrate des verwendeten Materials ist der wichtigste Faktor zur Bestimmung des jährlichen CDR-Potentials. Da Felddaten aufgrund einer Vielzahl an zu kontrollierenden Parametern nur als Gesamtmenge angegeben werden, verwendeten Strefer et al. von Laboratorien veröffentlichte Daten und Modelldaten. Die Angaben schwanken aber teils um einige Größenordnungen, was einen großen Einfluss auf die Abschätzung des CDR-Potentials hat. WR hängt nach Hartmann et al. (2013, S. 117) neben der reagierenden Oberfläche und dem verwendeten Material auch von dem pH-Wert der reagierenden Lösung, der Temperatur, dem Druck, von biologischen Mechanismen und dem Fließregime ab. Die Vielzahl an Abhängigkeiten erklärt auch, warum die Werte verschiedener Bezugsquellen sich so stark unterscheiden. Nach Strefer et al. besteht ein temperaturbedingter Unterschied der Verwitterungsraten um etwa den Faktor drei zwischen warmen Gebieten auf der einen und temperierten Gebieten auf der anderen Seite. Unterschiede unter gleichen pH- und Temperatur Bedingungen lassen sich auf Variationen der verwendeten Experimente, auf unterschiedliche verwendete Skalen und auf analytische Variationen zurückführen. Strefer et al. haben diese Unsicherheiten durch Ober- und Untergrenzen in den Plots in den Abbildungen 7 und 8 eingeschlossen.

Die durch Strefer et al. bestimmten Verwitterungsraten für Dunit und Basalt sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es ist wichtig zu beachten, dass es sich hierbei nicht um exakte Repräsentationen für die Verwitterungsraten handelt, sondern mehr um Richtwerte, die mit zukünftigen Daten verbessert werden können.

Gestein	Angenommene Rate	Unsicherheitsbereich
Dunit	$10^{-10,53}$	von $10^{-9,77}$ bis $10^{-9,95}$
Basalt	$10^{-9,86}$	von $10^{-9,55}$ bis $10^{-12,63}$

Tabelle 1: Verwitterungsraten in  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  von Dunit und Basalt bei  $\text{pH}=7$  und  $T=25^\circ\text{C}$ . (Strefler et al., 2018)

Es gibt nach Strefler et al. zwei wichtige Standortsfaktoren für den Einsatz von Enhanced Weathering. Die chemische Verwitterung funktioniert nur unter Anwesenheit von Wasser. Dieses muss in den potenziellen Gebieten folglich ganzjährig zur Verfügung stehen. Zudem sind die Verwitterungsraten, wie bereits weiter oben beschrieben, sehr temperaturabhängig – unter erhöhten Temperaturen geht die chemische Verwitterung wesentlich schneller vonstatten. Warme und temperierte, humide Gebiete scheinen also die am besten geeigneten Gebiete zu sein, um möglichst schnelle Verwitterungsraten zu erreichen. Strefler et al. grenzen die Standortauswahl noch weiter ein: Gesteinsmaterial kann an Land, in Küstengebieten oder im Meer ausgebracht werden. An Land ist dies vor allem in Waldgebieten, auf Weiden und auf Ackerland möglich, die Analyse der Autoren bezieht sich aber nur auf letzteres – Ausbringung auf Ackerland. Die Autoren begründen diese Entscheidung damit, dass für diese Gebiete in der Regel schon eine ausreichende Infrastruktur besteht, welche eine einfache Erreichbarkeit ermöglicht. Außerdem könnten landwirtschaftliche Maschinen gegebenenfalls bei der Austragung helfen. Als potenzielle Einsatzgebiete definieren Strefler et al. somit alle Ackerländer in warmen und temperierten, humiden Gegenden. Diese sind in Abbildung 9 zusammengefasst.

Die Aufteilung in warme und temperierte Gegenden korrespondiert mit Gebieten mit relativ schneller bzw. langsamer Verwitterung. Strefler et al. berechneten standardisierte Verwitterungsraten für die beiden Unterteilungen basierend auf einer Abweichung von  $25^\circ\text{C}$  mit einem Faktor von  $0,95 \pm 0,20$  für warme bzw.  $0,35 \pm 0,22$  für temperierte Gegenden. Die Autoren gehen davon aus, dass etwa 50% der globalen Ackerlandgebiete den minimalen Anforderungen an Temperatur und Humidität genügen.

Mit Formel (3) und der gesamten geeigneten Fläche kann nun ein jährliches CDR-Potential in Abhängigkeit von der Korngröße und der Verwitterungsrate berechnet werden. Für eine Korngröße von  $20 \mu\text{m}$  (Feinsand/Grobschluff) berechneten Strefler et al. ein Potential von  $4,9 \text{ Gt CO}_2/\text{a}$  für Basalt und  $95 \text{ Gt CO}_2/\text{a}$  für Dunit unter der Annahme, dass maximal  $15 \text{ kg}$  Gesteinsmaterial pro Quadratmeter aufgebracht werden kann. Dieser Wert entspricht einer  $8\text{mm}$  dicken Schicht, von welcher anzunehmen ist, dass sie ohne große Probleme durch landwirtschaftliche Maschinen in den Boden eingearbeitet werden kann.

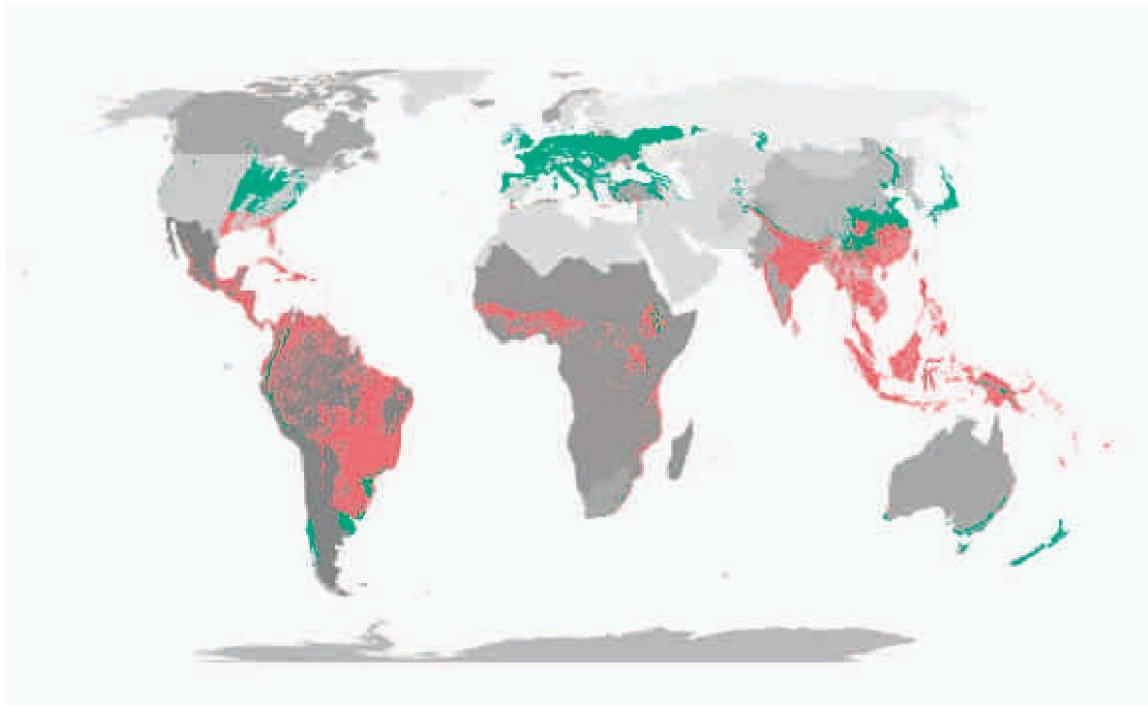


Abbildung 8: Weltweites Ackerland aufgeteilt in warme und temperierte, humide Klimate, was nach Streffler et al. zu zwei unterschiedlichen Faktoren bei der Berechnung des CDR-Potentials führt. Rote Bereiche sind warm, grüne temperiert. (Streffler et al., 2018, S. 5)

Andere Studien gehen von weitaus geringeren Verwitterungsraten aus. So erhalten Streffler et al. mit den von Hartmann et al. (2013) gemessenen Verwitterungsraten nur ein CDR-Potential von 1,9 Gt CO<sub>2</sub>/a für Dunit. Die weite Streuung der angenommenen Raten spricht hier für den Bedarf an mehr Forschung, um Unsicherheiten der Verwitterungsraten besser eingrenzen zu können.

Um mit den von Streffler et al. berechneten Verwitterungsdaten und der angenommenen maximal verteilbaren Masse pro Fläche ein CDR-Potential von 4 Gt CO<sub>2</sub>/a zu erreichen, wäre eine Korngröße von 24 µm für Basalt bzw. 256 µm für Dunit nötig. Abbildung 8 fasst die Ergebnisse für verschiedene Korngrößen und für die berechneten Verwitterungsraten in zwei Plots zusammen.

Hier ist allerdings anzumerken, dass Prozesse wie der Abbau des zu verteilenden Materials, die Zerkleinerung oder die Ausbringung des Materials Energie benötigen, was die tatsächliche Abführung an atmosphärischem CO<sub>2</sub> schmälert. Diese Abzüge wurden in den Berechnungen von Streffler et al. (2018) nicht berücksichtigt. Allerdings sind die CO<sub>2</sub> Emissionen für das Ausbringen mit 0,02 Gt CO<sub>2</sub> pro Tonne Gestein selbst unter der Annahme, dass fossile Rohstoffe verwendet werden relativ gering. Die Emissionen für die anderen Schritte (Abbau und Zerkleinerung) sind nach den Autorinnen und Autoren nochmals geringer. (Streffler et al., 2018 und darin zitierte Verweise)



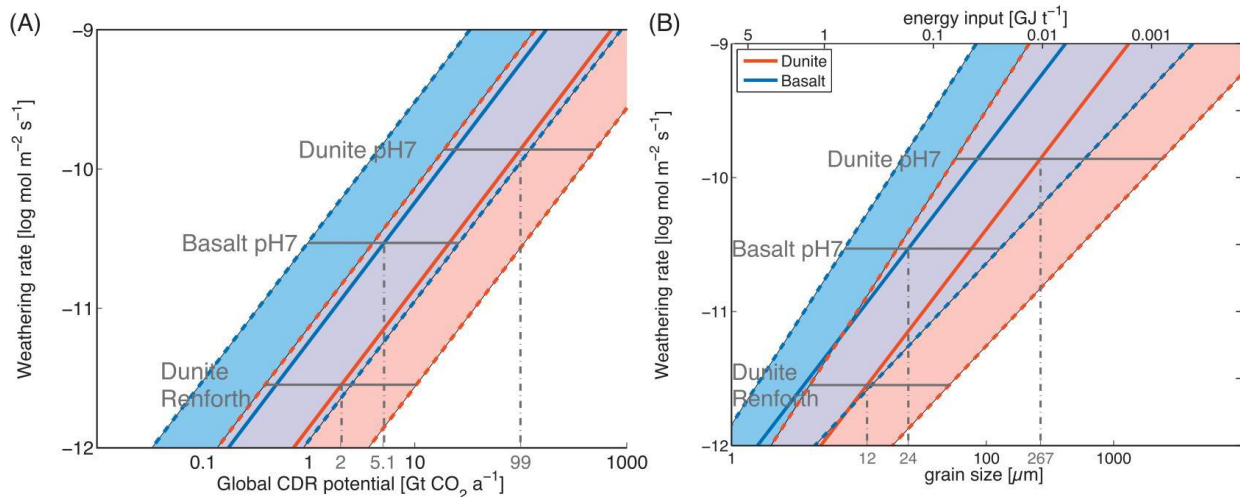


Abbildung 9: Verwitterungsrate im Vergleich zu (A) dem jährlichen CDR Potential für eine Korngröße von 20  $\mu\text{m}$  und (B) der Korngröße für ein jährliches CDR Potential von 4  $\text{Gt CO}_2/\text{a}$ . Die Unsicherheit kommt aus der Umrechnung von der Korngröße in die spezifische Oberfläche. Unsicherheiten der Verwitterungsraten führen zu großen Unsicherheiten des gesamten globalen CDR Potentials, was teils durch die Wahl der Korngröße kompensiert werden kann. (Strefler et al., 2018, S. 6)

#### 4.2.3 Kofaktor: EW zur Bekämpfung der Ozean-Versauerung

Ein uneingeschränkter weiterer Anstieg an atmosphärischem  $\text{CO}_2$  wird nicht nur den Klimawandel und die Erderwärmung vorantreiben, sondern auch die Ozean-Versauerung. Übermäßige Versauerung der Ozeane führt zur Lösung von Carbonatstrukturen mariner Organismen wie die von Korallen, Plankton und mancher Schalenfische (Andrews & Taylor, 2019, S. 254).

Enhanced Weathering erhöht den Fluss der Alkalinität – also unter anderem den Fluss der durch EW freigesetztem Hydrogencarbonate  $\text{HCO}_3^-$  – und des gelösten anorganischen Kohlenstoffs von Landgebieten in die Ozeane. Diese Erscheinung, zusammen mit der Reduzierung des atmosphärischem  $\text{CO}_2$  kann der Ozean Versauerung entgegenwirken. (Taylor et al., 2016).

Berechnungen von Taylor et al. zeigen, dass die Zugabe von einem Kilogramm silikatischem Gestein (Basalt und Harzburgit – Harzburgit ist ein ultramafisches Peridotitgestein mit einem hohen Olivinegehalt, siehe auch Abbildung 6) auf tropische Gebiete mit einer hohen natürlichen Verwitterung die zukünftige Ozean Versauerung um etwa 0,1 auf der pH Skala reduzieren könnten (siehe Abbildung 10). Höhere Applikationsraten kehren die Versauerung unter Bedingungen des RCP4.5 sogar teilweise um, was den durchschnittlichen pH der Ozean Oberfläche auf einen Wert von 2000 zurückbringen könnte. Unter dem RCP8.5 würde die Ozean Versauerung immerhin um 2/3 bis 2100 reduziert werden. Die RCP-

Szenarien sind „repräsentative Konzentrationspfade“, wobei der RCP8.5 ein Szenario mit steigenden Emissionen im höheren Bereich darstellt und RCP4.5 ein Szenario mit mittleren zukünftigen Emissionen. RCPs stellen also mögliche Verläufe zukünftiger CO<sub>2</sub> Emissionen und deren Auswirkungen dar. (Taylor et al., 2016)

Abbildung 9 fasst die Ergebnisse der durch Taylor et al. durchgeführten Berechnungen zusammen.

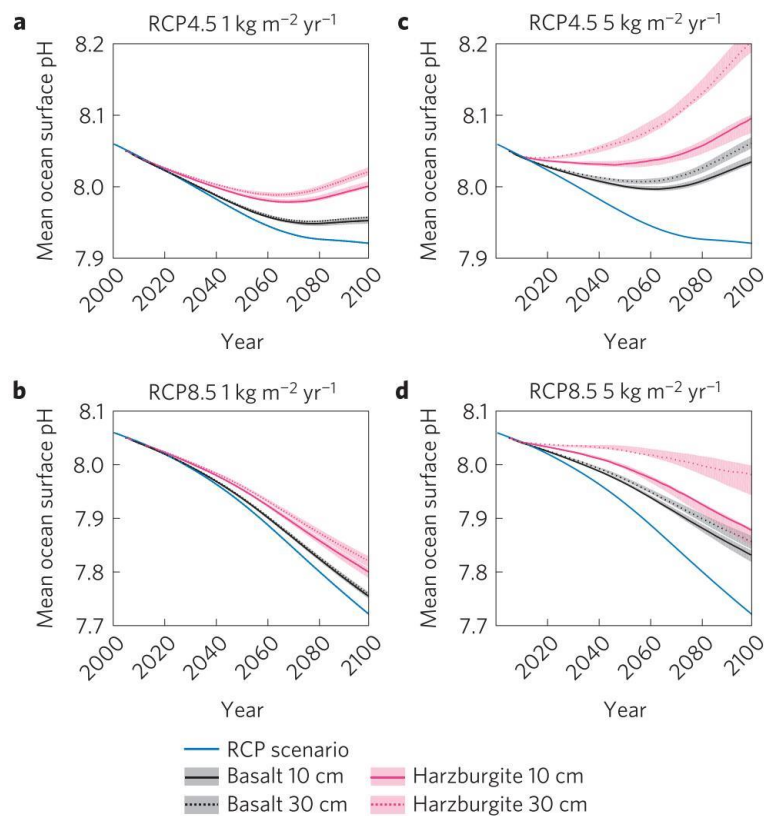


Abbildung 10: Enhanced Weathering verringert ansteigende Ozean Versauerung durch zukünftige CO<sub>2</sub> Emissionen. a,b) Effekte von erhöhten Alkalinitätsflüssen resultierend aus der Zugabe von 1 kg m<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> Silikat über Fläche von 20Mkm<sup>2</sup> der tropischen VW Hotspots vermischt in zwei Bodentiefen (10cm und 30cm) auf den globalen Ozean Oberflächen pH Wert für (a) RCP4.5 (mittlere Anstrengung) und (b) RCP8.5 (weiter wie bisher). c,d) Effekte von erhöhten Alkalinitätsflüsse resultierend aus erhöhten Beigaben von Silikaten für (c) RCP4.5 und (d) RCP8.5 (Taylor et al., 2016)

#### **4.2.3.1 Verteilung im offenen Ozean**

Würde man das Gesteinsmaterial direkt im offenen Ozean verteilen, so würde dies zu einem schnelleren Anstieg des pH-Wertes des oberflächennahen Ozeans führen. Der Effekt der Verringerung der Ozean Versauerung könnte somit erhöht bzw. beschleunigt werden. Außerdem kann eine mögliche Limitierung der Anwendung von EW, welche durch die nötige Vermeidung drastischer pH Änderungen in sensiblen Süßwassersystemen zustande kommt verringert werden.

Der pH-Wert der Ozeane liegt allerdings aktuell bei etwa 7.8-8.3, was eine deutlich langsamere Lösungsrate des Materials als Konsequenz hat. Um mit der terrestrischen Anwendung vergleichbare Lösungsraten zu erreichen, müsste das Material zu deutlich geringeren Korngrößen gemahlen werden. Außerdem müssten mögliche weitere Komplikationen, wie das Absinken der Körner in den tiefen Ozean vor kompletter Auflösung beachtet und sorgsam beurteilt werden. (Hartmann et al., 2013, S. 122)

#### **4.2.4 Mögliche Nebeneffekte und Risiken**

Ein Nebeneffekt, welcher bereits im vorherigen Kapitel diskutiert worden ist, ist die Erhöhung des pH-Wertes der Oberflächenwässer. Neben dem positiven Effekt der Bekämpfung der Ozean Versauerung haben veränderte pH-Werte der Böden und der Oberflächengewässer einen Einfluss auf terrestrische und aquatische Ökosysteme. Während geringe Veränderungen vermutlich nicht sehr weitreichende negative Folgen haben – und im Fall der Bekämpfung der Ozean Versauerung sogar wünschenswert sind –, ist es wichtig extreme Veränderungen des pH-Wertes gerade in sensiblen Ökosystemen zu vermeiden. Dies limitiert gegebenenfalls die Menge an Olivin bzw. anderem silikatischem Gestein, welche für Enhanced Weathering problemlos eingesetzt werden kann. (Hartmann et al., 2013, S. 122)

Durch die Verwitterung von Gesteinsmaterial kommt es zur Freisetzung von für die Mineralzusammensetzung des verwendeten Gesteins spezifischen Metallen (vor allem Nickel, Mangan und Chrom). So ist zum Beispiel die Lösung von Olivin mit der Freisetzung von Nickel und der darauffolgenden Aufnahme durch Pflanzen verbunden. In hohen Mengen könnte dies negative Auswirkungen auf die Umwelt mit sich führen. Andererseits dienen manche dieser Metalle als wichtige Mikronährstoffe für Pflanzen, was bedeutet, dass die Freisetzung von diesen Metallen in Maßen auch vorteilhaft sein kann (Haque et al., 2020, S. 167). Bisher gibt es allerdings nicht sehr viele Studien, inwieweit dies in Bezug auf die durch Enhanced Weathering freigesetzten Mengen problematisch oder positiv sein könnte.

Haque et al stellten 2020 ein Berechnungsmodell auf, mit welchem in Zukunft Risikoabschätzungen zu dieser Problematik durchgeführt werden können.

Auch können von sehr fein gemahlenem Gesteinspulver gesundheitliche Gefahren für den Menschen ausgehen. Sollten problematisch kleine Korngrößen eingesetzt werden, müssten diese Gefahren durch technische Maßnahmen minimiert werden. (Strefler et al., 2018, S. 6)

Tabelle 2 fasst einige mögliche Nebeneffekte, welche durch Enhanced Weathering auftreten können zusammen.

<p><u>Mögliche positive Nebeneffekte:</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• pH Erhöhung der Ozeane als Gegenspieler der CO<sub>2</sub>-induzierte Ozean Versauerung</li><li>• Versorgung von terrestrischen und küstennahen ozeanischen Ökosystemen mit Si und anderen Nährstoffen (v.a. Eisen, Mangan, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium).<ul style="list-style-type: none"><li>○ führt ggf. zur „Ozean Düngung“, was zu einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Sequestrierung führen kann</li><li>○ kann ggf. terrestrische Produktivität erhöhen und zu einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Sequestrierung durch terrestrische Biomasse führen</li><li>○ kann ggf. Nutzpflanzenenertrag erhöhen</li></ul></li></ul>
<p><u>Mögliche negative Nebeneffekte / Risiken:</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Veränderung des pH-Wertes der Böden und der Oberflächengewässer hat Einfluss auf terrestrische und aquatische Ökosysteme</li><li>• Veränderung der Si-Konzentration der Oberflächengewässer hat Einfluss auf Ökosysteme durch veränderte Nährstoffverhältnisse</li><li>• Freisetzung von Metallen und Schwermetallen (v.a. Nickel, Mangan und Chrom)</li><li>• Staubentwicklung</li></ul>

Tabelle 2: Zusammenfassung potenzielle Nebeneffekte durch Enhanced Weathering (Hartmann et al., 2013, S. 136)

## 5 Diskussion und Schlussfolgerung

Um weitreichende und fatale Auswirkungen der Erderwärmung zu minimieren, muss der Bekämpfung des anthropogenen Klimawandels höchste Priorität zugeschrieben werden. Klar ist, dass die Reduzierung anfallender klimawirksamer Treibhausgase, insbesondere CO<sub>2</sub>, vorangetrieben werden muss, um wichtige Klimaziele zu erreichen. Es scheint in naher Zukunft allerdings an vielen Stellen nicht realistisch Treibhausgasemissionen ausreichend zu reduzieren oder gar ganz zu eliminieren.

Aus diesem Grund wird der Einsatz von Methoden zur Kohlenstoffdioxid Entfernung ein wichtiger Zusatz eines klimapolitischen Rahmens sein, um anfallende Emissionen auszugleichen und im besten Fall netto-negative Emissionen zu erreichen. Enhanced Weathering stellt eine CDR-Methode mit einem vergleichsweise geringem technischen Aufwand, einem hohem geochemischen Potential und weiteren Vorteilen gegenüber anderen Methoden dar. Bei der Kohlenstoffdioxidentfernung mittels Enhanced Weathering wäre zum Beispiel keine massenhafte Langzeitspeicherung von CO<sub>2</sub> in der schwer zu kontrollierenden und potenziell gefährlichen Gasphase nötig (Hartmann et al., 2013). Es handelt sich bei EW lediglich um eine künstlich beschleunigte Variante eines natürlich stattfindenden Prozesses. Als positiver Nebeneffekt bekämpft EW zudem die Ozean Versauerung.

Wie anfänglich erwähnt beinhaltet jedes Szenario des Weltklimarates, in welchem das 1,5°C Ziel nur gering oder nicht überschritten wird die Entfernung von CO<sub>2</sub> im Bereich von 100 bis 1000 Gt während des 21. Jahrhunderts. Selbst das geringe, in Kapitel 4.2.2 besprochene CDR-Potential durch Enhanced Weathering von 1,9 Gt CO<sub>2</sub>/a könnte also einen Beitrag leisten dieses Ziel zu erreichen. Bis 2100 wäre – dieses CDR-Potential angenommen – theoretisch eine Sequestrierung von knapp 150 Gt CO<sub>2</sub> möglich.

Ein großräumiger Einsatz dieser Technologie würde allerdings auch zu Veränderungen biogeochemischer Prozesse führen, deren Auswirkungen noch nicht vollständig verstanden sind. Zudem werden Schwermetalle freigesetzt. Um festzustellen, ob Enhanced Weathering eine sinnvolle CDR-Methode sein kann, müssen folglich weitere Untersuchungen zu möglichen negativen Folgen durchgeführt werden.

Nach Hartmann et al. könnte es in den nächsten Jahren bis Jahrzehnten allerdings unweigerlich zu dem Einsatz von Enhanced Weathering kommen – wenn nicht primär als CDR-Methode, dann um Ernteerträge zu stabilisieren und zu steigern. Durch das

kontinuierliche Wachstum der Weltbevölkerung steigt auch der Bedarf an Nahrungsmitteln stark an. Um diesem gerecht zu werden, wird es möglicherweise nötig sein mehr Mineralpulver als Düngemittel einzusetzen, um Dürre- und Krankheitsresistenz von Nutzpflanzen zu erhöhen.

Bestehender Forschungsbedarf für Enhanced Weathering – Ausschnitt:

- Besseres Verständnis über Lösungsraten und deren Parametrisierung (siehe 4.2.2)
- Entwicklung von Techniken, um Lösungsprozesse über große Gebiete akkurat zu beobachten und zu messen
- Identifikation wichtiger Mineralvorkommen und Verteilungen
- Verständnis über grundsätzliche Nebeneffekte entwickeln (siehe 4.2.4 und Tabelle 2)
- Rückkopplungseffekte verstehen und quantifizieren:
  - Einfluss eines veränderten Nährstoffzustandes auf die (pflanzliche) Bioaktivität
  - Veränderungen der Produktivität landwirtschaftlicher und terrestrischer Ökosysteme und Effekte auf den hydrologischen Kreislauf
  - Alkalinitätsflüsse zu den Ozeanen und deren Effekt (siehe 4.2.3)

Tabelle 3 Bestehender Forschungsbedarf zum besseren Verständnis von Enhanced Weathering (Hartmann et al., 2013, S. 137)

Es ist also durchaus von Bedeutung, den zugrundeliegenden Prozessen des Enhanced Weatherings näher auf den Grund zu gehen und durch ausgereifte Feldexperimente und Studien unbekannte Parameter besser einzugrenzen. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt gilt es zu verstehen – auch unter Einbeziehung möglicher Rückkopplungseffekte. Tabelle 3 fasst abschließend den bestehenden Forschungsbedarf in Bezug auf Enhanced Weathering zusammen.

## 6 Literaturverzeichnis

- 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>
- Berner, R. A., Lasaga, A. C. & Garrels, R. M. (1983). The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *American Journal of Science*, 283(7), 641–683.
- de Coninck, H., Revi, A., Babiker, M., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., Dong, W., Ford, J., Fuss, S., Hourcade, J.-C., Ley, D., Mechler, R., Newman, P., Revokatova, A., Schultz, S., Steg, L. & Sugiyama, T. (2018). Strengthening and Implementing the Global Response. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor & T. Waterfield (Hrsg.), *Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. World Meteorological Organization.
- 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>
- Hartmann, J., West, A. J., Renforth, P. [Phil], Köhler, P., La Rocha, C. L. de, Wolf-Gladrow, D. A., Dürr, H. H. & Scheffran, J. (2013). Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. *Reviews of Geophysics*, 51(2), 113–149. <https://doi.org/10.1002/rog.20004>
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor & T. Waterfield (Hrsg.), *Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. World Meteorological Organization.

- Kasting, J. F. & Catling, D. (2003). Evolution of a Habitable Planet. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1), 429–463. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.071601.170049>
- Power, I. M., Harrison, A. L., Dipple, G. M., Wilson, S. A., Kelemen, P. B., Hitch, M. & Southam, G. (2013). Carbon Mineralization: From Natural Analogues to Engineered Systems. In D. J. DePaolo, D. R. Cole, A. Navrotsky & I. C. Bourg (Hrsg.), *Reviews in mineralogy and geochemistry: volume 77. Geochemistry of geologic CO<sub>2</sub> sequestration*. Mineralogical Society of America; Geochemical Society.
- Renforth, P [Philip], Strandmann, P. P. von & Henderson, G. M. (2015). The dissolution of olivine added to soil: Implications for enhanced weathering. *Applied Geochemistry*, 61, 109–118.
- 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>
- 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>

## 6.1 Weiterführende Literatur

- Cipolla, G., Calabrese, S., Noto, L. V. & Porporato, A. (2021). The role of hydrology on enhanced weathering for carbon sequestration II. From hydroclimatic scenarios to carbon-sequestration efficiencies. *Advances in Water Resources*, 103949.
- Hamilton, J. L., Wilson, S. A., Turvey, C. C., Morgan, B., Tait, A. W., McCutcheon, J., Fallon, S. J. & Southam, G. (2021). Carbon accounting of mined landscapes, and deployment of a geochemical treatment system for enhanced weathering at Woodsreef Chrysotile Mine, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 220, 106655. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106655>
- Spence, E., Cox, E. & Pidgeon, N. (2021). Exploring cross-national public support for the use of enhanced weathering as a land-based carbon dioxide removal strategy. *Climatic Change*, 165(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03050-y>



- Tan, R. R. & Aviso, K. B. (2021). On life-cycle sustainability optimization of enhanced weathering systems. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125836>
- Terlouw, T., Bauer, C., Rosa, L. & Mazzotti, M. (2021). Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review. *Energy & Environmental Science*, 14(4), 1701–1721. <https://doi.org/10.1039/d0ee03757e>
- Verbruggen, E., Struyf, E. & Vicca, S. (2021). Can arbuscular mycorrhizal fungi speed up carbon sequestration by enhanced weathering? *Plants, People, Planet*.
- Beerling, D. J., Kantzas, E. P., Lomas, M. R., Wade, P., Eufrazio, R. M., Renforth, P [Phil], Sarkar, B., Andrews, M. G., James, R. H., Pearce, C. R., Mercure, 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. (2020). Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583(7815), 242–248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>
- Haque, F., Santos, R. M. & Chiang, Y. W. (2020). CO<sub>2</sub> sequestration by wollastonite-amended agricultural soils - An Ontario field study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103017>
- Haque, F., Santos, R. M. & Chiang, Y. W. (2020). Optimizing Inorganic Carbon Sequestration and Crop Yield With Wollastonite Soil Amendment in a Microplot Study. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01012>
- Kelemen, P. B., McQueen, N., Wilcox, J., Renforth, P [Phil], Dipple, G. & Vankeuren, A. P. (2020). Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO<sub>2</sub> removal from air: Review and new insights. *Chemical Geology*, 550, 119628. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119628>
- McQueen, N., Kelemen, P., Dipple, G., Renforth, P [Phil] & Wilcox, J. (2020). Ambient weathering of magnesium oxide for CO<sub>2</sub> removal from air. *Nature communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16510-3>
- Myers, C. & Nakagaki, T. (2020). Direct mineralization of atmospheric CO<sub>2</sub> using natural rocks in Japan. *Environmental Research Letters*, 15(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc217>
- Power, I. M., Dipple, G. M., Bradshaw, P. M. & Harrison, A. L. (2020). Prospects for CO<sub>2</sub> mineralization and enhanced weathering of ultramafic mine tailings from the Baptiste

- nickel deposit in British Columbia, Canada. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 94, 102895. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102895>
- Rana Vinita, R. (2020). *The potential and environmental implications of enhanced olivine weathering as negative CO<sub>2</sub> emission technology in Europe* [Masterarbeit]. Utrecht University, Utrecht.
- Wagner, d. O. G. (2020). *Assessment of enhanced silicate rock weathering feasibility as a soil ameliorant and its influence on other terrestrial negative emission technologies* [Dissertation]. Universität Hamburg, Hamburg.
- Bach, L. T., Gill, S. J., Rickaby, R. E. M., Gore, S. & Renforth, P [Phil] (2019). CO<sub>2</sub> Removal With Enhanced Weathering and Ocean Alkalinity Enhancement: Potential Risks and Co-benefits for Marine Pelagic Ecosystems. *Frontiers in Climate*, 1, Artikel 7. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00007>
- Haque, F., Santos, R. M., Dutta, A., Thimmanagari, M. & Chiang, Y. W. (2019). Co-Benefits of Wollastonite Weathering in Agriculture: CO<sub>2</sub> Sequestration and Promoted Plant Growth. *Acs Omega*, 4(1), 1425–1433. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02477>
- Lefebvre, D., Goglio, P., Williams, A., Manning, D. A., Azevedo, A. C. de, Bergmann, M., Meersmans, J. & Smith, P. (2019). Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 233, 468–481. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099>
- Lyngfelt, A., Johansson, D. J. A. & Lindeberg, E. (2019). Negative CO<sub>2</sub> emissions - An analysis of the retention times required with respect to possible carbon leakage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 87, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.04.022>
- Renforth, P [Phil] (2019). The negative emission potential of alkaline materials. *Nature communications*, 10(1), 1401. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09475-5>
- Tan, R. R. & Aviso, K. B. (2019). A linear program for optimizing enhanced weathering networks. *Results in Engineering*, 3, 100028.
- Rigopoulos, I., Harrison, A. L., Delimitis, A., Ioannou, I., Efstathiou, A. M., Kyratsi, T. & Oelkers, E. H. (2018). Carbon sequestration via enhanced weathering of peridotites and basalts in seawater. *Applied Geochemistry*, 91, 197–207.
- Beerling, D. J. (2017). *Enhanced rock weathering: biological climate change mitigation with co-benefits for food security?* The Royal Society.

- 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. *Biology letters*, 13(4), 20160715.
- Griffioen, J. (2017). Enhanced weathering of olivine in seawater: The efficiency as revealed by thermodynamic scenario analysis. *The Science of the total environment*, 575, 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.008>
- Jenkyns, H. C., Dickson, A. J., Ruhl, M. & van den Boorn, S. H. (2017). Basalt-seawater interaction, the Plenus Cold Event, enhanced weathering and geochemical change: deconstructing Oceanic Anoxic Event 2 (Cenomanian–Turonian, Late Cretaceous). *Sedimentology*, 64(1), 16–43.
- Kantola, I. B., Masters, M. D., Beerling, D. J., Long, S. P. & DeLucia, E. H. (2017). Potential of global croplands and bioenergy crops for climate change mitigation through deployment for enhanced weathering. *Biology letters*, 13(4). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0714>
- Lawford-Smith, H. & Currie, A. (2017). Accelerating the carbon cycle: the ethics of enhanced weathering. *Biology letters*, 13(4). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0859>
- Montserrat, F., Renforth, P. [Phil], Hartmann, J., Leermakers, M., Knops, P. & Meysman, F. J. R. (2017). Olivine Dissolution in Seawater: Implications for CO<sub>2</sub> Sequestration through Enhanced Weathering in Coastal Environments. *Environmental science & technology*, 51(7), 3960–3972. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05942>
- Pidgeon, N. F. & Spence, E. (2017). Perceptions of enhanced weathering as a biological negative emissions option. *Biology letters*, 13(4). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0024>
- Quednau, M. (2017). *Grundlagen*. De Gruyter Studium. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110426779>
- Taylor, L. L., Beerling, D. J., Quegan, S. & Banwart, S. A. (2017). Simulating carbon capture by enhanced weathering with croplands: an overview of key processes highlighting areas of future model development. *Biology letters*, 13(4), 20160868.
- Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 22(3), 1315–1324. <https://doi.org/10.1111/gcb.13178>
- Köhler, P., Hauck, J., Völker, C. & Wolf-Gladrow, D. (2015). *The role of iron during the open ocean dissolution of olivine in a simulated CO<sub>2</sub> removal experiment—enhanced weathering, ocean alkalinization, ocean fertilization*. *Climate Engineering Research Symposium 2015*. <https://epic.awi.de/38447>

- Renforth, P [P.], Pogge von Strandmann, P. & Henderson, G. M. (2015). The dissolution of olivine added to soil: Implications for enhanced weathering. *Applied Geochemistry*, 61, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.05.016>
- Moosdorf, N., Renforth, P [Phil] & Hartmann, J. (2014). Carbon dioxide efficiency of terrestrial enhanced weathering. *Environmental science & technology*, 48(9), 4809–4816. <https://doi.org/10.1021/es4052022>
- Köhler, P., Abrams, J. F., Völker, C., Hauck, J. & Wolf-Gladrow, D. A. (2013). Geoengineering impact of open ocean dissolution of olivine on atmospheric CO<sub>2</sub> surface ocean pH and marine biology. *Environmental Research Letters*, 8(1), 14009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014009>
- Renforth, P [P.] (2012). The potential of enhanced weathering in the UK. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10, 229–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.011>
- Schuiling, R. D [Roelof D.], Wilson, S. A. & Power, L. M. (2011). Enhanced silicate weathering is not limited by silicic acid saturation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(12), E41; author reply E42. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019024108>
- 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 of the United States of America*, 107(47), 20228–20233. <https://doi.org/10.1073/pnas.1000545107>
- Hangx, S. J. & Spiers, C. J. (2009). Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: A critical analysis of viability. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(6), 757–767. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.07.001>
- Lenton, T. M. & Britton, C. (2006). Enhanced carbonate and silicate weathering accelerates recovery from fossil fuel CO<sub>2</sub> perturbations. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(3).
- Schuiling, R. D [R. D.] & Krijgsman, P. (2006). Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester Co<sub>2</sub>. *Climatic Change*, 74(1-3), 349–354. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-3485-y>
- RIDGWELL, A. & ZEEBE, R. (2005). The role of the global carbonate cycle in the regulation and evolution of the Earth system. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(3-4), 299–315. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.006>

- Berner, R. A. (2001). GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO<sub>2</sub> over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 301(2), 182–204. <https://doi.org/10.2475/ajs.301.2.182>
- Berner, R. A. (1990). Atmospheric carbon dioxide levels over phanerozoic time. *Science (New York, N.Y.)*, 249(4975), 1382–1386. <https://doi.org/10.1126/science.249.4975.1382>