



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Geoengineering als alternative Lösung zur Bekämpfung
der globalen Erwärmung - Eine Untersuchung der CDR
und SRM Methode.“

Verfasserin

Christina Eichler-Peña

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2015

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 190 333 456

Studienrichtung lt. Studienblatt: UF Geographie und Wirtschaftskunde UniStG
UF Deutsch UniStG

Betreuerin / Betreuer: Univ.-Prof. Dr. Thomas Glade

Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass die ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, Februar 2015

Danksagung

Ein besonderer Dank geht an meinen Betreuer Univ.-Prof. Dr. Thomas Glade, der mich im Laufe eines Seminars in die mir unbekannte Materie des Geoengineerings einführte und somit mein Interesse an diesem Thema weckte.

Weiters möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Oma herzlich bedanken, die mich nicht nur motiviert und unterstützt haben, sondern mir auch immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Ein besonderer Dank gilt auch meinem Mann David, der mich besonders im letzten Abschnitt meines Studiums stets motivierte, emotionell unterstützte und mir bei jeglichem Problem zur Seite stand.

Ich möchte mich bei all meinen Freunden bedanken, die mir sowohl während meines gesamten Studiums, als auch bei der Entstehung meiner Diplomarbeit unterstützt haben. Dieser Dank gebührt vor allem meiner, mich in allen Lebenssituationen unterstützenden, Freundin Birgit.

Vielen Dank!

Abstract

Since the past decades scientist have begun to study the effects that the continuous rising temperatures have on the planet. If the temperature keeps rising at the same rate, it will cause more extreme weather conditions and catastrophic events. An example of this can be seen in an increase in sea level, which would threaten the habitat of many coastal communities.

To counteract these effects, or even to stop global warming, various geoengineering methods are being investigated, which in most cases are carried out with the aid of chemical or physics processes.

Amongst all the scientific literature available, two main Geoengineering principles drive the rationale in contemporary research: the "Carbon Dioxide Removal" (CDR) and the "Solar Radiation Management" (SRM) principles. CDR methods attempt to reduce atmospheric CO₂ by intercepting and storing it. SRM methods focus on increasing the albedo on different surfaces, so as to reflect more solar radiation, which would lower the temperatures on Earth subsequently.

While geoengineering methods are designed as a countermeasure to the devastating effects of global warming, one must keep in mind that some of these methods will also affect the ecosystems. This is mainly due to the chemical and physics processes associated with geoengineering methods. The attempt to balance the benefits versus the collateral damages is the conundrum that scientists face in modern times and will continue to be a focal point in future research. The results from this academic paper suggests that geoengineering methods start to have positive outcomes, governments must engage allocate sufficient resources in Research & Development, to improve this promising solution to global warming.

Zusammenfassung

Seit Jahren kann man auf der Erde einen leichten und dennoch folgenreichen Temperaturanstieg vernehmen. Sollte sich das Klima in Zukunft weiter erwärmen, wird es vermehrt zu Wetterextremen kommen, sowie zu einem Ansteigen des Meeresspiegels, was den Lebensraum vieler Küstenbewohner bedrohen würde.

Um diesen Folgen entgegenzuwirken, beziehungsweise die globale Erwärmung zu stoppen, werden verschiedene Geoengineering-Methoden mit Hilfe der Literaturrecherche untersucht, die meistens mit Hilfe von chemischen oder physikalischen Prozessen durchgeführt werden.

Man kann hierbei zwischen den zwei großen Eckpfeilern des Geoengineerings unterscheiden, der "Carbon Dioxid Removal" (CDR) Methoden und der „Solar Radiation Management“ (SRM) Methoden. Die CDR Methoden, versuchen das atmosphärische CO₂ zu reduzieren, indem sie es abfangen und speichern. Die SRM Methoden versuchen die Albedo auf verschiedenen Untergründen zu erhöhen, um somit mehr Sonnenstrahlen zu reflektieren, was in weiterer Folge die Temperaturen auf der Erde senken würde.

Durch die chemischen und physikalischen Prozesse, die mit den Geoengineering-Methoden einhergehen, können drastische Umweltgefahren drohen. Viele dieser Methoden sind zudem sehr kostspielig, da sie einen hohen technologischen Aufwand erfordern und zudem noch einen weiten Forschungsweg vor sich haben.

Nichtsdestotrotz, weisen die Ergebnisse der untersuchten Methoden auf eine hohe Erfolgsrate hin, was sie zu alternativen Lösungswegen gegen die globale Erwärmung macht.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zugspitze. (Quelle: BERZ, 2010, S. 171)	7
Abbildung 2: Meeresspiegelanstieg (Quelle: HOUGHTON, 1997, S. 102)	7
Abbildung 3: Bangladesch (Quelle: HOUGHTON, 1997, S.105)	8
Abbildung 4: Niederschlagstrends von 1900 bis 2000 (Quelle: UNEP, 2005, S. 16)	10
Abbildung 5: Temperaturveränderung (Quelle: zamg.ac.at)	11
Abbildung 6: Three-part schema of the climate problem (Quelle: KEITH, 2001, S. 248)	16
Abbildung 7: Geoengineering und seine Methoden (Quelle: umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4125.pdf [eingesehen am 25.12.2014])	18
Abbildung 8: Schematischer Vergleich der CO ₂ Produktion von konventionellen und CCS Kraftwerken (Quelle: Vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 20)	23
Abbildung 9: Künstliche Bäume in unterschiedlichen Umgebungen (Quelle: Institution of Mechanical Engineers)	24
Abbildung 10: Emissionsvergleich von Benzin und Biokraftstoffen. (Quelle: Öko – Institut 2010)	25
Abbildung 11: Biologische und physikalische Pumpe (Quelle: UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 25)	32
Abbildung 12: Pumpen der Firma Atmocean (Quelle: UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 27)	35
Abbildung 13: Kühlturm (Quelle:www.hamon.com [eingesehen am 25.01.2015])	36
Abbildung 14: Typische Wassertemperaturprofile (Quelle: ZHOU et al., 2005, S. 210)	37
Abbildung 2: Methoden zur Meerwassereisbildung (Quelle: ZHOU et al., 2005, S. 212)	38
Abbildung 3: Marine Wolkenaufhellung (Quelle: The Royal Society, 2012, S.4243)	45
Abbildung 17: Ballon mit Schwefelaerosolen (Quelle: COOKSON, 2011, o.A.)	48
Abbildung 18: Turm zur SO ₂ -Versprühung (Quelle: ROBOCK et al., 2009, S. 5)	49

Abbildung 19: Solar Sail Ikarus (Quelle: http://www.bbc.co.uk/blogs/legacy/thereporters/jonathanamos/2010/05/heres-the-shipping-forecast-fo.shtml [eingesehen am 15.01.2015])	51
Abbildung 20: Dyson Dot (Quelle: KENNEDY et al., 2013, S. 228)	52
Abbildung 21: Algenblüte vor der Küste Irlands. (Quelle: Alfred Wegener Institut (ESA) In: UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 26)	57

Abkürzungsverzeichnis

BECS	Bioenergy Capture and Sequester
CCS	Carbon Capture and Storage
CDM	Clean Development Mechanism
CDR	Carbon Dioxid Removal
HTC	Hydrothermal carbonization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LEO	Low Earth Object
MCB	Marine Cloud Brightening
NAS	National Academy of Science
SEL 1	Sun-Earth Lagranigan-1 Point
UBA	Umweltbundesamt

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Hypothese und Forschungsfragen	2
2. Theorie	4
2.1 Klimaerwärmungen	4
2.1.1 Klimawandel	4
2.1.2 Globale Erwärmung	5
2.1.3 Expertenmeinung	5
2.2 Auswirkungen der Erwärmung	6
2.2.1 Rückgang der Gletscher	6
2.2.2 Auswirkungen auf die Meere	7
2.2.2.1 Anstieg des Meeresspiegels	7
2.2.2.2 Versauerung der Ozeane	9
2.2.3 Auswirkungen auf das Wetter	9
2.2.3.1 Verstärkung von Dürren und Überschwemmungen	10
2.2.3.2 Wetterextreme	11
a) Hitzewellen	11
b) Stürme und Wirbelstürme	12
2.3 Folgen für den Menschen	12
2.4 Maßnahmen gegen die globale Erwärmung	13
3. Methode	15
4. Ergebnis	16
4.1 Definition Geoengineering	16
4.2 Geschichte des Geoengineerings	19
4.3 Carbon Dioxide Removal (CDR)	21
4.3.1 Terrestrisches Geoengineering	21

4.3.1.1 Carbon Capture and Storage	22
4.3.1.2 Künstliche Bäume	23
4.3.1.3 Methoden mit Biokohle und Biomasse	24
a) Bioenergie und Biokraftstoffe	25
b) Bioenergie mit CO ₂ -Abtrennung und Speicherung	26
c) Speicherung von Biomasse	26
d) Kohlenstoffsinken an Land	26
4.3.1.4 Aufforstung und Wiederbewaldung	28
4.3.1.5 Verwitterungsprozesse	29
a) Vermischung von Silikatmineralien mit Erde	30
b) Karbonatlösungstechnik	30
c) CO ₂ -Anreicherung in der Erdkruste	30
d) Silikatverwitterung mittels Elektrolyse	31
4.3.2 Marines beziehungsweise ozeanisches Geoengineering	31
4.3.2.1 Ozeandüngung	32
4.3.2.2 Veränderung der marinen Schichtung	35
a) Abkühlbecken	36
b) Kühltürme	36
c) Erwärmung des Oberflächenwassers	37
d) Lufteinspritzungen	38
e) Verdickung des Meereises	38
4.3.2.3 Ozeankalkung	39
4.3.2.4 Versenkung von Ernterückständen	40
4.4 Solar Radiation Management (SRM)	41
4.4.1 Erhöhung der Bodenalbedo	42
4.4.1.1 Weiße Dächer.....	42

4.4.1.2 Bio-Geoengineering	43
4.4.1.4 Wüstenreflektoren.....	43
4.4.2 Erhöhung der Wasseroberflächenalbedo	44
4.4.3 Atmosphärisches Geoengineering	45
4.4.3.1 Marine Wolkenaufhellung	45
4.4.3.2 Sulfatinjektionen	46
a) Ballone	47
b) Flugzeuge	48
c) Abschussrampen	49
d) Zukunftsvision: Turm	49
4.4.4 Geoengineering-Methoden im Weltall	50
4.4.4.1 Erdnahe Reflektoren	50
4.4.4.2 Solar Sails	51
4.4.4.3 Dyson Dots	52
4.5 Auswirkungen der Geoengineering-Methoden auf das Leben und die Umwelt	54
4.5.1 Die CCS-Methode	54
4.5.2 Künstliche Bäume	55
4.5.3 Methoden mit Biokohle und Biomasse	56
4.5.4 Aufforstung und Wiederbewaldung	56
4.5.5 Verwitterungsprozesse	56
4.5.6 Ozeandüngung	57
4.5.7 Veränderung der marinen Schichtung	58
4.5.8 Ozeankalkung	58
4.5.9 Versenkung von Ernterückständen	59
4.5.10 Weiße Dächer	59
4.5.11 Bio-Geoengineering	60
4.5.12 Wüstenreflektoren	60

4.5.13 Erhöhung der Ozeanalbedo	61
4.5.14 Marine Wolkenaufhellung	61
4.5.15 Sulfitinjektionen	62
4.5.16 Geoengineering-Methoden im Weltall	63
5. Conclusio und Diskussion	64
5.1 Perspektiven	75
7. Literaturverzeichnis	78
Lebenslauf	83

1. Einleitung

Viele Studien belegen, dass sich das Klima der Erde zunehmend erwärmt. Dies wird einerseits auf einen natürlichen Klimawandel und andererseits auf eine vom Menschen ausgelöste, also eine anthropogene globale Erwärmung zurückgeführt.

Eine Erwärmung des Planeten hat für die Umwelt und das Leben auf der Erde verheerende Auswirkungen. Es wird vermehrt zu Wetterextremen kommen, wie etwa zu massiven Regenniederschlägen, die wiederum zu Überschwemmungen führen können, oder Dürren, die Regionen unbewohnbar machen und Menschen zur Migration zwingen. Durch die steigenden Temperaturen, werden auch Schnee, Eis und die Gletscher schneller schmelzen, die sich durch die wärmeren Temperaturen kaum reproduzieren könnten. Dadurch würde einerseits sehr viel kostbares Trinkwasser verloren gehen und andererseits würde der Meeresspiegel ansteigen. Der Anstieg des Meeresspiegels hätte wiederum verheerende Auswirkungen auf die dicht besiedelten Küstenregionen der Erde.

Auch die Tier- und Pflanzenwelt, insbesondere das sensible Ökosystem der Meere, würde durch die Erwärmung stark leiden. Viele Tierarten würden abwandern, andere zuwandern. Ebenso verhält es sich mit den Pflanzen und Insekten. Dadurch könnten viele indigenen Arten verdrängt werden, oder gar ausstreben (vgl. EICHLER, 2014, S. 1ff.).

Um die globale Erwärmung einzudämmen oder zu stoppen, versuchen Wissenschaftler und Experten verschiedene Techniken und Verfahren zu ermitteln. Einige dieser Projekte werden bereits heute eingesetzt, wie zum Beispiel spezielle Filter in Fabriken. Es gibt allerdings Stimmen, die behaupten, dass die globale Erwärmung durch solche Methoden kaum zu stoppen wäre. Sie schlagen die Einführung von Geoengineering-Methoden vor. Dabei handelt es sich um Methoden, die durch chemische oder physikalische Prozesse gegen die Erwärmung vorgehen.

Allerdings haben diese Methoden oft gravierende Nebenwirkungen, sowie einen hohen technologischen und finanziellen Aufwand. Zudem ist es ungewiss, ob die Geoengineering-Methoden die Klimaerwärmung überhaupt stoppen könnte.

Diese Unklarheiten sollen zum Inhalt dieser Forschungsarbeit werden.

1.1 Hypothese und Forschungsfragen

Das wachsende Interesse am Thema „Klimawandel“ und „globale Erwärmung“ steigt von Jahr zu Jahr. Es gibt dutzende Ratschläge, wie man die globale Erwärmung eindämmen oder stoppen könnte, wie etwa weniger Auto zu fahren, mehr regionale Produkte zu kaufen und dergleichen. Zudem gibt es etliche Berichte, die den Zustand des Klimas protokollieren, wie etwa den IPCC Bericht, oder vertragsähnliche internationale Abkommen die versuchen möchten, den CO₂ Gehalt zu senken und somit die globale Erwärmung zu stoppen, wie etwa das Kyoto Protokoll.

Neben den bereits bekannten Verfahren, die zur Senkung des CO₂ Gehaltes in der Atmosphäre beitragen und somit zu einer Abkühlung der Erde führen sollen, rücken nun die Geoengineering-Methoden, welche zum Teil noch wenig erforscht und große Umweltgefahren mit sich bringen, immer mehr in den Vordergrund.

Hypothese der Arbeit

„Geoengineering-Methoden stellen eine Alternativlösung zur Bekämpfung der globalen Erwärmung dar“

Diese Hypothese wird anhand von drei Forschungsfragen bearbeitet:

Was ist Geoengineering eigentlich?

Bei dieser Frage soll eine Definition zu dem Begriff gefunden, sowie ein Überblick zu dem Thema geschaffen werden. Damit man den Begriff des Geoengineerings richtig erfassen kann, wird hierzu auch ein kurzer historischer Aufriss gegeben.

Was sind die zwei Hauptmethoden des Geoengineerings zur Bekämpfung der globalen Erwärmung und wie funktionieren sie?

Hier soll vor allem auf die zwei großen Eckpfeiler der Geoengineering-Methoden, der „Carbon Dioxid Removal“ und der „Solar Radiation Managment“, sowie auf die Funktionsweisen ihrer jeweiligen Verfahren eingegangen werden.

Wie wirken sich diese Methoden auf die Umwelt und das Leben auf der Erde aus?

Dieser Punkt behandelt die möglichen Gefahren und Risiken, welche die Geoengineering-Methoden mit sich bringen. Zudem sollen auch Folgewirkungen auf das Umweltsystem und das Leben aufgezeigt werden.

Anhand der Ergebnisse, die auf diese Forschungsfragen gefunden werden, sowie den möglichen Perspektiven, die durch diese Methoden ermöglicht werden, soll die Hypothese im Kapitel 5.1 bestätigt oder falsifiziert werden.

2. Theorie

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick zum Thema der globalen Erwärmung gegeben. Es werden hierbei unterschiedliche Begrifflichkeiten erklärt sowie die Auswirkungen der globalen Klimaerwärmung aufgezeigt.

2.1 Klimaerwärmungen

Im Zusammenhang mit dem Terminus „Klimaerwärmung“ hört man öfters die Begriffe „Klimawandel“ und „globale Erwärmung“. Oft werden diese beiden Begriffe inhaltlich gleichgesetzt, jedoch besteht ein gravierender Unterschied zwischen ihnen.

2.1.1 Klimawandel

Der Klimawandel bezeichnet die natürliche Klimaveränderung der Erde, als Beispiel können hier die Eiszeiten mit ihren anschließenden Wärmeperioden genannt werden. Durch Gesteinsuntersuchungen sowie Untersuchungen von Fossilien konnten Wissenschaftler herausfinden, dass die Erwärmung und die Abkühlung der Erde immer mit dem CO₂-Gehalt in der Atmosphäre zusammenhängen. „Aus geologischen Untersuchungen stellten die Wissenschaftler zudem fest, dass geringere CO₂-Konzentrationen mit größeren Eisvorkommen auf der Erde einhergingen und dass die Erde bei hohem CO₂-Gehalt der Atmosphäre weitgehend eisfrei war.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2009a, S. 11)

Der natürliche Klimawandel hängt aber nicht nur vom CO₂-Gehalt ab, sondern auch von sich verändernden Meeresströmungen, die einen großen Einfluss auf die Lufttemperaturen haben (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2009a, S. 12).

Auch Vulkanausbrüche und eventuell große Sonnenflecken könne einen Einfluss auf das Klima haben (vgl. EICHLER, 2014, S. 4).

2.1.2 Globale Erwärmung

Unter globaler Erwärmung versteht man eine Erwärmung, die durch den Menschen verursacht wurde. Man nennt sie deshalb auch anthropogene Erwärmung. Der Mensch erwärmt die Erde durch seinen verschwenderischen Verbrauch an fossilen Brennstoffen. Durch deren Verbrennung gelangen Giftstoffe, treibhausunterstützende Gase sowie vor allem massenhaft CO₂ in die Atmosphäre. Man geht davon aus, dass die anthropogene Erwärmung vor etwa hundert Jahren mit der Industrialisierung begonnen hat (vgl. EICHLER, 2014, S. 4).

Die Vermehrung des anthropogenen Treibhausgases CO₂ geschieht, wie eingangs erwähnt, vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, aber auch durch die Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen, den Verkehr, die Brandrodung von Wäldern sowie das Auftauen der Permafrostböden. Ein weiteres gefährliches Treibhausgas ist das Methan. Dieses entsteht vor allem durch Nutztierhaltungen, beim Reisanbau, auf Mülldeponien sowie bei der Kohle-, Öl- und Erdgasverarbeitung. Einige Industriezweige emittieren vor allem große Mengen an Halogenkohlenwasserstoffen, die weitaus stärker wirken als das CO₂. Aus der industriellen Landwirtschaft werden zusätzlich Lachgas und organische Verbindungen emittiert (vgl. GORE, 2009, S. 34f.).

2.1.3 Expertenmeinung

Durch die beiden Klimaerwärmungstheorien kommt es unter den Experten zu großen Kontroversen. Einige behaupten, dass es keine anthropogene Klimaerwärmung gibt, sondern dies ein ganz natürlicher Prozess sei. Die Vertreter der anthropogenen Erwärmungstheorie hingegen gehen von dem Standpunkt aus, dass ausschließlich der Mensch an dem heutigen Temperaturanstieg schuld sei.

Ob die Erwärmung nun tatsächlich aus dem Handeln der Menschheit resultiert oder auch ein Beitrag der natürlichen Klimaerwärmung dahintersteckt, bleibt ungewiss. Klar ist jedoch, dass der Mensch mit seinem verschwenderischen Verhalten im Zusammenhang mit fossilen Brennstoffen sowie dem industriellen Fortschritt der Umwelt immensen Schaden zufügt und sich dies sicherlich in einer gewissen Weise auch auf andere Gebiete auswirken wird.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass der Mensch einen großen Einfluss auf das Klima hat, und somit wird der Begriff der globalen Erwärmung vorherrschend sein.

2.2 Auswirkungen der Erwärmung

Durch die steigende Masse an Treibhausgasen sowie Verschmutzungen in der Atmosphäre kommt es zu einer Erhöhung der Temperatur. „Je höher die Aerosol- und Treibhausgaskonzentration ist, desto geringer ist die Durchlässigkeit für die emittierte terrestrische Strahlung und desto höher ist die atmosphärische Gegenstrahlung. Da die von der Erde aufgenommene Energie nicht mehr vollständig abgeführt werden kann, kommt es zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur der Erde, bis ein neues Gleichgewicht – auf höherem Temperaturniveau – erreicht ist.“ (KROMP-KOLB H. et al., 2014, S. 147)

Diese klimatische Veränderung wirkt sich nun auf viele Bereiche der Erde aus. Besonders an Orten, wo bereits heute extrem heiße Wetterbedingungen vorherrschen, können diese Eigenschaften verstärkt werden und sich somit ausweiten. Andere Gebiete, die momentan noch sehr kalt sowie schnee- und eisreich sind, werden sich durch die Erwärmung stark verändern und globale Folgen auslösen. Andersherum verhält es sich ähnlich. Trockene Gebiete werden noch trockener und es kann in diesen Region zu einer Desertifikation kommen (vgl. EICHLER, 2014, S.9). Diese Auswirkungen gilt es hier nun näher zu betrachten.

2.2.1 Rückgang der Gletscher

Die Gletscher der Erde stellen riesige Trinkwasserspeicher dar. Viele Regionen beziehen ihr Trinkwasser ausschließlich aus Gletscherschmelzwasser. „Der Indus zum Beispiel, der größten Teils durch Pakistan fließt, speist sich bisher zu 80 Prozent aus dem sommerlichen Schmelzwasser der Gletscher.“ (POMREHN, 2007, S. 44) Aufgrund der globalen Erwärmung wird es zu weniger schneereichen Tagen kommen, womit sich weniger Schnee in den Bergen akkumulieren kann und in weiterer Folge der Gletscher den Sonnenstrahlen ungeschützt ausgeliefert ist. Durch die Sonneneinstrahlung und die wärmeren Temperaturen kann ein Gletscher nun in wenigen Jahren bis Jahrzehnten, je nach seiner Größe, komplett abschmelzen (vgl. EICHLER, 2014, S. 13). An der Abbildung 1 kann man die Zugspitze in Deutschland erkennen. In einem Zeitraum von lediglich 23 Jahren hat sich

der gesamte Gletscher aufgelöst. Die kleine rechteckige Stelle am unteren Bild ist wahrscheinlich eine Abdeckplane, mit der versucht wird, einen Gletscher abzudecken und somit sein Schmelzen zu verhindern. Was aus diesem Bild noch ersichtlich wird, ist dass mit dem Gletscher auch die Albedo des Berges verschwindet. Zurück bleibt ein äußerst



Abbildung 1: Zugspitze 1980 (oben) 2003 (unten). (Quelle: BERZ, 2010, S. 171)

dunkles Gestein, welches die Sonnenstrahlen weniger rückstrahlen kann als helle Oberflächen. Somit verstärkt diese Folge der Abschmelzung den Effekt der globalen Erwärmung zusätzlich. Zusätzlich füllt das geschmolzene Gletschereis die oft schmalen Bergflüsse rasch, sodass es zu Überschwemmungen kommen kann. Durch massives Abschmelzen der Gletscher wird auch immer mehr

Süßwasser in die Meere eindringen, was zu einer Erhöhung des Meeresspiegels führen könnte.

2.2.2 Auswirkungen auf die Meere

2.2.2.1 Anstieg des Meeresspiegels

Der Anstieg des Meeresspiegels hat mehrere Ursachen. Zum einen fließt geschmolzenes Gletschereis und Schnee von den Bergen in Flüsse bis zum Meer herab, wo sie schließlich in die Ozeane münden. Eine weitere Ursache ist das Abschmelzen von Landeisflächen. Das Schmelzen von Meereis führt zwar zusätzliches Süßwasser in den Ozean, dennoch wirkt es sich nicht auf dessen

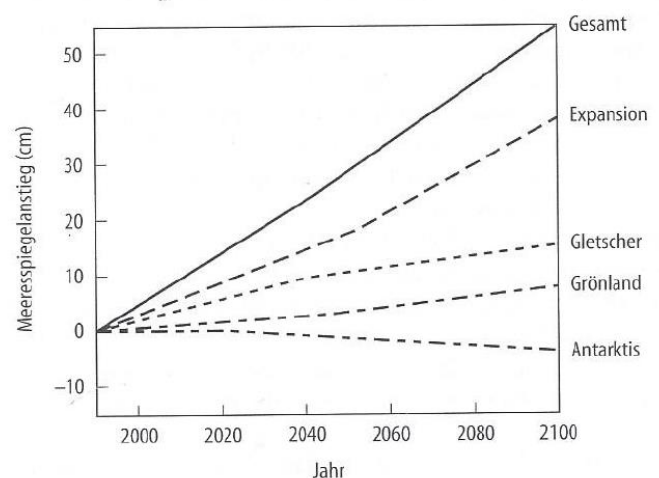


Abbildung 2: Meeresspiegelanstieg (Quelle: HOUGHTON, 1997, S. 102)

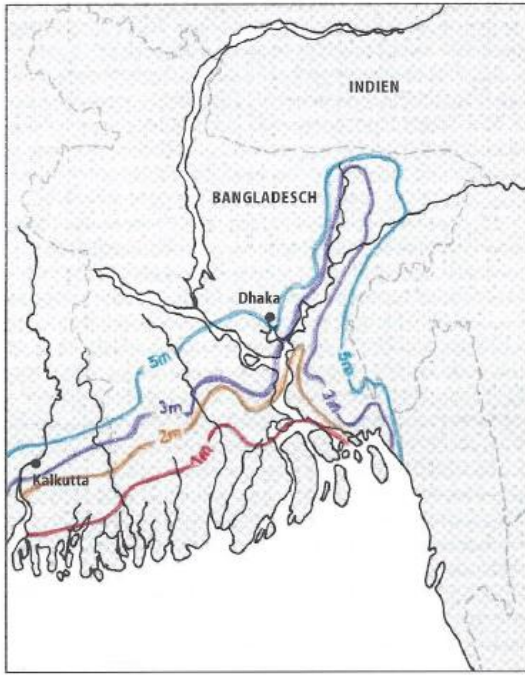


Abbildung 3: Bangladesch (Quelle: HOUGHTON, 1997, S.105)

Anstieg aus, da hier dasselbe Prinzip wie in einem Glas mit Eiswürfeln vorherrscht – das Eis verdrängt bereits die Masse an Wasser, die es füllen würde, wenn es schmilzt. Ähnlich wie bei den Bergen, die von den Gletschern zwangsbefreit werden, wird nun auch die dunkle Fläche des Ozeans offengelegt und es kommt auch hier zu einem Rückkoppelungseffekt. Die dunkle Oberfläche erwärmt sich stetig, da sie nicht so viele Sonnenstrahlen reflektieren kann wie eine helle Oberfläche. In Abbildung 2 erkennt man den Meeresspiegelanstieg dieses Jahrhunderts.

Sieht man sich die Grafik genauer an, stellt man fest, dass „die thermische Ausdehnung des Wassers in den Ozeanen am bedeutendsten ist; wenn sich die Ozeane erwärmen, dehnt sich das Wasser aus und der Meeresspiegel steigt.“ (vgl. HOUGHTON, 1997, S. 102) Die Erwärmung der Ozeane bedeutet aber nicht nur eine Expansion, sondern auch eine Veränderung des sensiblen Meeresökosystems. Viele Fische, Korallen und andere Wasserbewohner reagieren sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen und werden in Folge dessen in andere Gebiete wandern oder sterben. Das Sterben der Fische wird sich auch auf den Menschen auswirken, wie zum Beispiel auf die Fischerei, Lebensmittel- und Tierfutterindustrie.

Falls alle Gletscher und die Antarktis bis 2100 schmelzen, hat dies einen Meeresspiegelanstieg von 15 cm zur Folge. Tritt die Expansion in dem angegebenen Maße ein, steigt der Meeresspiegel um ganze 35 cm. Sollte dies geschehen, wird es zu weltweiten Überschwemmungen der Küstenregionen kommen. „Die Hälfte der Erdbevölkerung lebt jedoch in Küstennähe. Gerade die am tiefsten gelegenen Küstengebiete gehören zu den fruchtbarsten und am dichtesten besiedelten Regionen der Erde. [...] Zu den besonders stark gefährdeten Gebieten gehören u.a. Bangladesch und ähnliche Deltagebiete, die Niederlande und die kleinen, flachen Inseln im Pazifik und in den anderen Ozeanen.“ (HOUGHTON, 1997, S. 105) In der Abbildung 3 ist das Deltagebiet von Bangladesch abgebildet. Man sieht, wie gering das Land dort über dem Meeresspiegel liegt, und kann

sich vorstellen, was passieren wird, wenn der Meereswasserspiegel um etwa 50 cm steigt. Durch starken Wellen- und Windgang wird auch weiter innenliegendes Land unbewohnbar sein. Die Menschen, die in diesen Küstengebieten oder auf kleinen Inseln leben, müssen dann ihren Wohnort aufgeben und es wird zu Massenwanderungen kommen. Ein weiterer Negativfaktor ist der Wegfall von gutem Weide- und Ackerland. Da die meisten guten Flächen der Erde bereits genutzt werden, müssen die Menschen, die an Küstengebieten leben, nicht nur ihre Lebensumwelt aufgeben, sondern auch ihre oft einzige Einnahmequelle.

2.2.2.2 Versauerung der Ozeane

Aufgrund des steigenden anthropogenen CO₂-Gehalts in der Atmosphäre reichert sich auch immer mehr CO₂ in den Ozeanen an. In der Luft wirkt das Gas neutral, es geht keine chemischen Prozesse ein. Im Wasser verhält sich dies allerdings anders. Durch das gelöste CO₂ im Wasser kommt es zu einer Senkung des pH-Wertes, das Wasser beginnt zu versauern. Berechnungen sowie Schätzungen gehen davon aus, dass sich das anthropogene CO₂ bereits in einer Tiefe von 1000 Metern befindet. An Stellen mit kalten Meeresströmungen kann es bereits in eine Tiefe von 3000 Metern vorgedrungen sein, da die kalten Wasserschichten unter die warmen fließen und das CO₂ mitreißen (vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN, 2006, S. 67f.). Die Versauerung kann vor allem Wasserpflanzen sowie Kleinstorganismen der Meere schweren Schaden zufügen. Eine ausführlichere Beschreibung der Auswirkungen erfolgt im Kapitel 4.5.5.

2.2.3 Auswirkungen auf das Wetter

Die steigenden Temperaturen und ihre Folgen haben teilweise gravierende Auswirkungen auf das Wettersystem der Erde. Es kommt zu vermehrten Wetterextremen sowie Wind- und Wirbelsturmgefahren. Auch eine Veränderung der Jahreszeiten ist wahrnehmbar, da sowohl die Sommer als auch die Winter im Mittel immer wärmer werden. In den folgenden Unterkapiteln erfolgt eine kurze Einführung in diese Thematik.

2.2.3.1 Verstärkung von Dürren und Überschwemmungen

Die globale Erwärmung führt in bereits trockenen Gebieten zu einer noch drastischeren Austrocknung sowie in feuchten Gebieten zu vermehrtem Niederschlag, in dessen Folge vermehrt Überschwemmungen auftreten können. In Abbildung 4 kann man den Niederschlagstrend von 1900 bis 2000 erkennen. Dabei sieht man, dass besonders die bereits trockenen Gebiete, wie große Teile Afrikas und der Westen Südamerikas, um bis zu 50 Prozent an Niederschlag verloren haben. Die Gebiete, die eine geringe Niederschlagsabnahme von etwa 10 Prozent aufweisen, könnten in den nächsten Jahren noch trockener werden, hierzu gehören auch Gebiete in Europa.

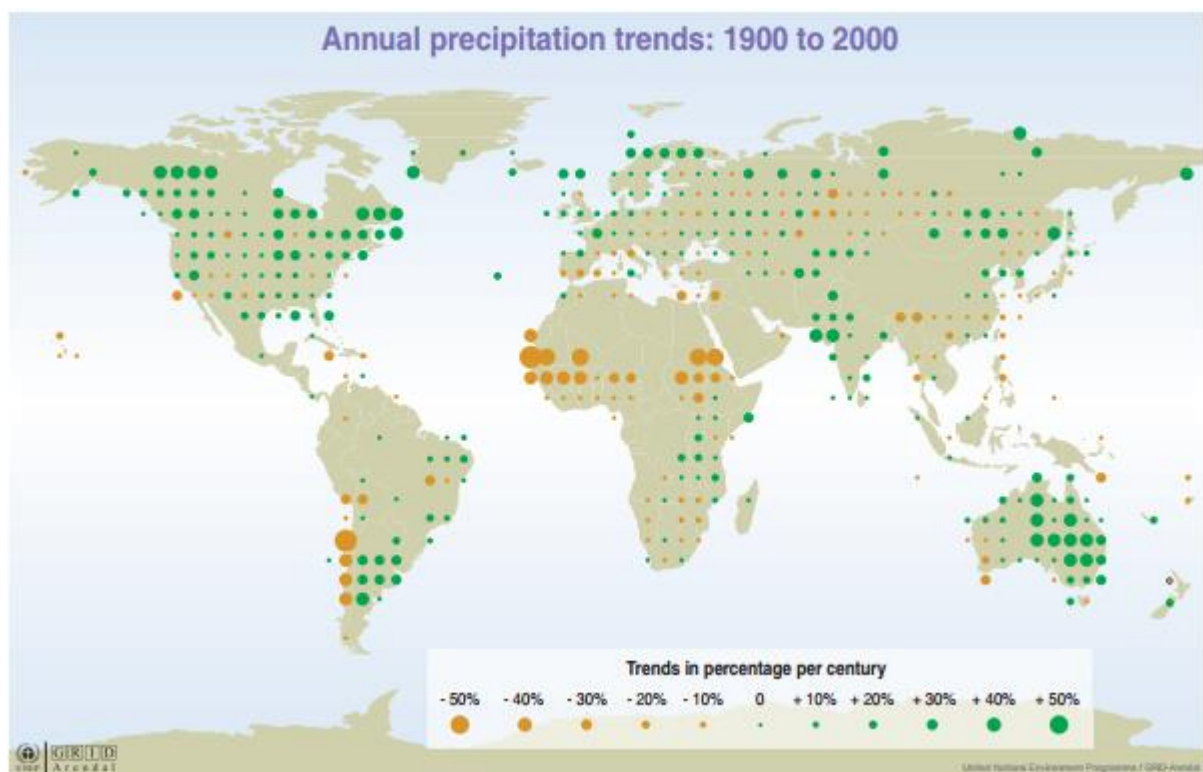


Abbildung 4: Niederschlagstrends von 1900 bis 2000 (Quelle: UNEP, 2005, S. 16)

Die Niederschlagsrate reguliert bis zu einem gewissen Grad auch die Trinkwasserversorgung in diesen Gebieten. „Die Wissenschaftler projizieren bis zur Mitte des Jahrhunderts in hohen Breiten und einigen feuchten Gebieten der Tropen einen Anstieg des mittleren Jahresabflusses in Flüssen und der Wasserverfügbarkeit um 10–40 %. Für einige trockene Gebiete in den mittleren Breiten sowie für trockene Gebiete der Tropen, die derzeit unter Wassermangel leiden, resultiert dagegen eine Abnahme um 10–30 %.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2009a, S. 28)

2.2.3.2 Wetterextreme

„Der vierte Statusbericht des ‚Weltklimarates‘ des ‚Intergovernmental Panel on Climate Change‘ (IPCC, 2007), setzt ein deutliches Alarmzeichen, indem er den direkten Zusammenhang zwischen der globalen Erwärmung und der Häufung bzw. Intensivierung atmosphärischer Extremereignisse herausstellt.“ (BERZ, 2010, S. 163) Im Folgenden soll auf mögliche zukünftige Wetterextreme genauer eingegangen werden.

a) Hitzewellen

Die Sommer der Jahre 2003 und 2013 waren besonders heiß. Nicht nur Mensch und Tier litten unter der starken Hitze, sondern auch die Felder und damit die Ernten. „In den nächsten 37 Jahren sollen sich regelmäßige Hitzewellen auf bis zu 20 Prozent der globalen Landflächen ausweiten. Heute betrifft dies gerade einmal fünf Prozent.“ (green.wiwo.de, eingesehen am 22.12.2014) In Abbildung

5 erkennt man die von der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) errechneten Veränderungen der

Temperaturen in den Sommermonaten Europas. Die Veränderungen erstrecken sich über einen sehr langen Zeitraum, dennoch ist der Temperaturanstieg signifikant und alarmierend. Man kann erkennen, dass selbst das Temperaturminimum im hohen Norden auf bis zu +5°C steigen könnte. Die ZAMG berechnete, dass in Wien die Anzahl an heißen Tagen von 10 % auf 24 % gestiegen ist. Es gibt auch einen Anstieg bei den Sommertagen von 40 % auf 69 %. Unter heißen Tagen versteht man Tage, die eine Temperatur von über 30°C erreichen, Sommertage erreichen eine Höchsttemperatur von über 20°C (vgl. www.zamg.ac.at, eingesehen am 22.02.2014).

Diese Hitzewellen und Anstiege der heißen Tage fügen der Vegetation in Europa und auch vielen anderen Teilen der Welt schweren Schaden zu. Besonders Länder, die keine gute

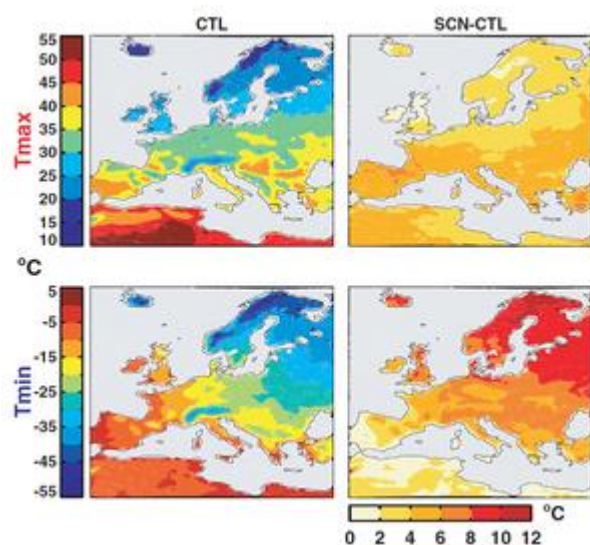


Abbildung 5: Temperaturveränderung (Quelle: zamg.ac.at)
Oben: Temperaturmaxima von 1961-1990 (links) und deren Veränderung für 2071-2100 (rechts).
Unten: Temperaturminima von 1961-1990 (links) und deren Veränderung für 2071-2100 (rechts).

Wasserversorgung haben, werden durch solche Wetterextreme einen Großteil ihrer Ernten verlieren. Zudem steigt auch das Risiko von Wald- und Wiesenbränden an.

b) Stürme und Wirbelstürme

„Some recent scientific articles have reported a large increase in tropical cyclone energy, numbers, and wind-speeds in some regions during the last few decades in association with warmer sea surface temperatures.” (www.wmo.int, eingesehen am 01.01.2015)

Wirbelstürme entstehen bei einer Oberflächenwassertemperatur von über 26°C, da bei diesen Temperaturen eine starke Konvektion und Verdunstung stattfinden, die den Antrieb für Wirbelstürme darstellen (vgl. STORCH et al., 1999, S. 189). Besonders in den Jahren von 2004 bis 2006 konnten etliche heftige Stürme verzeichnet werden. „10 landfalling tropical cyclones in Japan in 2004, five tropical cyclones affecting the Cook Islands in a five-week period in 2005, Cyclone Gafilo in Madagascar in 2004, Cyclone Larry in Australia in 2006, Typhoon Saomai in China in 2006, and the extremely active 2004 and 2005 Atlantic tropical cyclone seasons - including the catastrophic socio-economic impact of Hurricane Katrina.” (www.wmo.int, eingesehen am 01.01.2015)

Sollten sich die Meere nun in Folge der globalen Klimaerwärmung weiter erhitzen, kann es vermehrt zu Stürmen und Wirbelstürmen kommen, die aufgrund der höheren Verdunstung und Konvektion, die ihnen als Antrieb dienen, in ihrer Intensität steigen könnten.

2.3 Folgen für den Menschen

Die globale Erwärmung wird einen großen Einfluss auf das Habitat des Menschen nehmen. Besonders jene Menschen, die bereits in extremen Klimalandchaften, wie etwa den Wüsten oder den arktischen Gebieten, leben, werden in ihrer Lebensqualität stark eingeschränkt werden. Da die trockenen Gebiete noch trockener werden, werden die Trinkwasserversorgung und die Landwirtschaft in diesen Gebieten unmöglich sein. Der Permafrostboden in arktischen Gebieten wird auftauen, so könnten auf ihm erbaute Häuser einstürzen. Die Menschen aus diesen Gebieten müssten sich einen neuen Wohnraum suchen. Auch feuchtere Gebiete werden in Zukunft mit den Dürreperioden zu kämpfen

haben. Dies beeinflusst auch hier vor allem den landwirtschaftlichen Sektor stark. Kommt es zu einer globalen Erwärmung, könnte es in einigen Jahren zu einer Nahrungsmittelknappheit kommen. Zudem wird auch die Anzahl der Klimaflüchtlinge zunehmen, die ihren Lebensraum aufgrund der klimatischen Veränderungen verlassen müssen (vgl. EICHLER, 2014, S. 15).

Zudem rechnen Experten auch mit gesundheitlichen Folgen. Aufgrund der steigenden Hitze könnte es vermehrt zu Sterbefällen kommen, dies betrifft vor allem kranke und alte Menschen sowie Kleinkinder. Durch die wärmeren Temperaturen würden sich tropische Insekten auch in heute noch kühleren Regionen ansiedeln, diese können wiederum gefährliche Krankheiten übertragen, wie zum Beispiel Malaria. Durch die schlechteren Ernten aufgrund der Erwärmung käme es auch zu einer massiven Zunahme an unterernährten Menschen (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2009a, S. 32). Es ist zu beachten, dass dies nur ein paar wenige ausgesuchte Beispiele sind, welche Folgen die globale Erwärmung auf die Menschen hätte.

2.4 Maßnahmen gegen die globale Erwärmung

Es gibt viele Maßnahmen, die man ergreifen kann, die gegen die globale Erwärmung wirken. Dabei gehen Experten auf gewisse Sektoren ein. Beim Sektor Energie soll in Zukunft möglichst nur noch saubere Energie benutzt werden, das heißt solche, die aus Wind-, Sonnen- oder Wasserkraft erzeugt wird. Der Sektor Wald- und Forstwirtschaft fordert zur Bekämpfung der globalen Erwärmung einen Stopp der Waldrodung sowie eine vermehrte Aufforstung. Im landwirtschaftlichen Sektor liegt das Augenmerk auf den Ackerböden, die rekultiviert werden sollen, ohne das hierbei viel gespeichertes CO₂ verloren gehen soll. Der Sektor Verkehr setzt auf mehr Hybridautos sowie Fahrgemeinschaften. Kurze Strecken sollten prinzipiell zu Fuß erledigt werden. Auch Gebäude sollen effizienter gebaut werden, sodass sie nicht mehr so viel Energie, zum Beispiel zum Heizen, benötigen. Der Industriesektor sollte auf umweltfreundlichere Geräte umrüsten sowie seine Emissionen senken (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2009, S. 47).

Die soeben genannten Maßnahmen gegen die globale Erwärmung erscheinen lediglich wie ein Tropfen auf dem heißen Stein. Viele Experten sind sich einig, dass selbst diese einfachen Vorkehrungen nicht im großen Stil umsetzbar sind oder umgesetzt werden und

sie somit nahezu wirkungslos seien.

Deshalb wird in der Forschung der Begriff „Geoengineering“ immer relevanter und bedeutender. Die Methoden des Geoengineering versuchen mit verschiedenen Verfahren die globale Erwärmung zu stoppen, wobei diese viel aggressiver vorgehen als die genannten Alternativmethoden. Um was es sich hierbei konkret handelt, wie die Geoengineering-Methoden funktionieren, welche Auswirkungen sie haben und vor allem welche Perspektiven sie der Menschheit bieten, ist ein Teil der Untersuchung dieser Arbeit und wird in Kapitel 4 gelöst.

3. Methode

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird die Methode der Literaturrecherche angestrebt.

Da die Methoden des Geoengineerings erst seit Kurzem einen wichtigen Forschungsbereich einnehmen, findet man diese Thematik meist nur in Form von Fachartikeln vor.

Für die Literaturrecherche werden vor allem die Onlineplattformen „Scopus“ und „web of science“ verwendet.

Bei der Auswahl der Literatur wird vor allem auf ihre Aktualität geachtet.

Zudem werden auch renommierte Zeitschriftenausgaben der „The Royal Society“ herangezogen, sowie Ausarbeitungen des Umweltbundesministeriums, die sich mit der Thematik des Geoengineerings besonders genau befasst haben.

4. Ergebnis

4.1 Definition Geoengineering

Prinzipiell kann man unter dem Begriff „Geoengineering“ eine Veränderung beziehungsweise eine Manipulation des Klimas verstehen. „Geoengineering is the intentional large-scale manipulation of the environment, particularly manipulation that is intended to reduce undesired anthropogenic climate change.“ (KEITH, 2000, S. 245) Man unterscheidet zwischen zahlreichen Geoengineering-Methoden, welche dabei helfen, die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu senken und in Folge dessen das Abtauen von marinem und terrestrischem Eis zu verlangsamen oder gar zu stoppen.

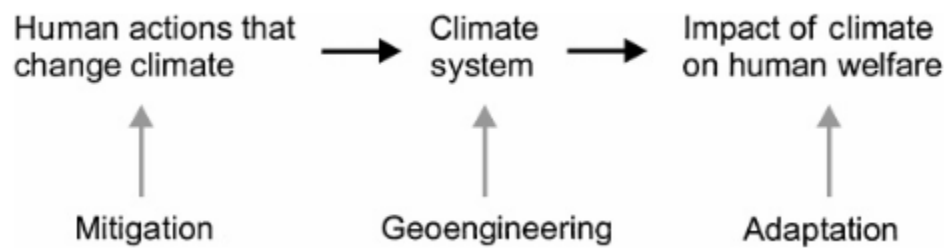


Abbildung 6: Three-part schema of the climate problem (Quelle: KEITH, 2001, S. 248)

In der Abbildung 6 erkennt man in der oberen Reihe die kausalen Probleme der anthropogenen Klimaprobleme. Die untere Reihe zeigt die einzelnen Interventionsmöglichkeiten. Man erkennt zudem, dass sich die Methoden des Geoengineerings nicht auf die Ursachen der globalen Erwärmung konzentrieren, sondern direkt auf das Klimasystem der Erde einwirken, wie man auch dem IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)-Bericht vom Jahr 2001 entnehmen kann „Geo-engineering involves efforts to stabilize the climate system by directly managing the energy balance of the earth.“ (IPCC, 2001, S. 328)

Im Unterschied zum Geoengineering, greift der herkömmliche beziehungsweise traditionelle Klimaschutz bei den menschlichen Ursachen der Klimaprobleme an.

Manche dieser zum Einsatz kommenden Geoengineering-Methoden sind relativ kostengünstig und risikofrei, wie etwa die Aufforstung von Wäldern, andere Methoden sind ebenfalls sehr effektiv im Kampf gegen die globale Erwärmung, jedoch sind diese sehr kostenintensiv und weisen zudem auch unangenehme Nebenwirkungen für die Umwelt auf.

Man unterscheidet zwischen vier Arten der Anwendung des Geoengineerings, nämlich dem Land-based, Ocean-based, Atmosphere-based und Space-based Geoengineering (vgl. ZHANG et al., 2014, S. 2).

Innerhalb dieser Anwendungsschemata kristallisieren sich allerdings zwei große Unterschiede innerhalb ihrer Ausführung heraus. Eine Methode arbeitet mit chemischen, biologischen und physikalischen Mitteln, welche dazu dienen, das überschüssige CO₂ aus der Atmosphäre einzufangen und zu speichern. Man nennt diese Methode „Carbon Dioxid Removal“ (CDR). Um das Kohlendioxid zu verringern beziehungsweise zu entfernen, wird die CDR-Methode sowohl an Land als auch im Wasser eingesetzt. Ihre Prämisse ist es, das aufgenommene Kohlendioxid zu speichern und im Idealfall in ein für die Atmosphäre ungefährliches Element oder Verbindung umzuwandeln und in einer geeigneten Materie zu speichern. Hierfür verwendet die CDR-Methode verschiedene Herangehensweisen, wie etwa die Ozeandüngung, Ozeankalkung, Aufforstung von Wäldern und so weiter. Die CDR-Methode wird zwar oft als umweltschonend beschrieben und sollte somit bevorzugt werden, allerdings können ihre Methoden nur einen gewissen Anteil an CO₂ aus der Atmosphäre binden, welcher im Gesamtbild als eher gering angesehen werden kann. Die CDR-Methode wird Berechnungen nach kaum in der Lage sein, einem bevorstehenden Temperaturanstieg von rund 3,5°C entgegenzuwirken (vgl. KELLER, 2014, S. 4). Einen größeren Erfolg bei der Bekämpfung der globalen Erwärmung stellt das „Solar Radiation Management“ (SRM) dar. Diese Methode zielt darauf ab, die auf die Erde treffenden Sonnenstrahlen mit verschiedenen Hilfsmitteln zu reflektieren und die Albedo zu erhöhen, was ebenfalls zu einer zusätzlichen Rückstrahlung führt und schließlich eine Abkühlung der Atmosphäre zur Folge hätte. „Most SRM techniques act by increasing the albedo of the atmosphere through methods such as the injection of sulfate aerosols into the stratosphere where they would reflect some solar energy back to space, lowering the global temperature.“ (MERCER et al., 2001, S. 1) Weitere Methoden des SRM sind zum Beispiel Schwefel- und Aluminiuminjektionen in die Atmosphäre sowie die Anbringung von Sonnensegeln, Spiegeln und dergleichen im Weltall. Die Methoden des SRM werden für Einsätze an der Erdoberfläche, in der Atmosphäre und vom Weltall aus geplant. „Compared with CDM, SRM has the largest potential for preventing warming. However, SRM also has some large side effects and cannot be discontinued without causing rapid climate change.“ (KELLER et al., 2014, S. 4) SRM sind schnell wirkende Mechanismen, welche Überschreitungen von sogenannten „kipping points“ (Kippunkten) ausgleichen können beziehungsweise möglichst schnell wieder zurückkippen könnten, falls der kritische Punkt

schon überschritten wurde. SRM-Methoden müssen langfristig eingesetzt werden, da ihr plötzliches Absetzen zu einer Umkehrwirkung führen könnte und die klimatische Ausgangsposition wieder schnell erreicht wäre. Es wäre zum Beispiel wenig effektiv, ein sich im Weltall befindliches Sonnensegel nur einmal im Monat aufspannen zu lassen. Um eine dauerhafte Abkühlung der Erde durch solch ein Sonnensegel erreichen zu können, müsste dieses permanent über der Erde aufgespannt sein, um so einen lang anhaltenden Schatten auf den Planeten werfen zu können.

Die unterstehende Abbildung 7 gibt einen Überblick über die Methoden des SRM und der CDR.

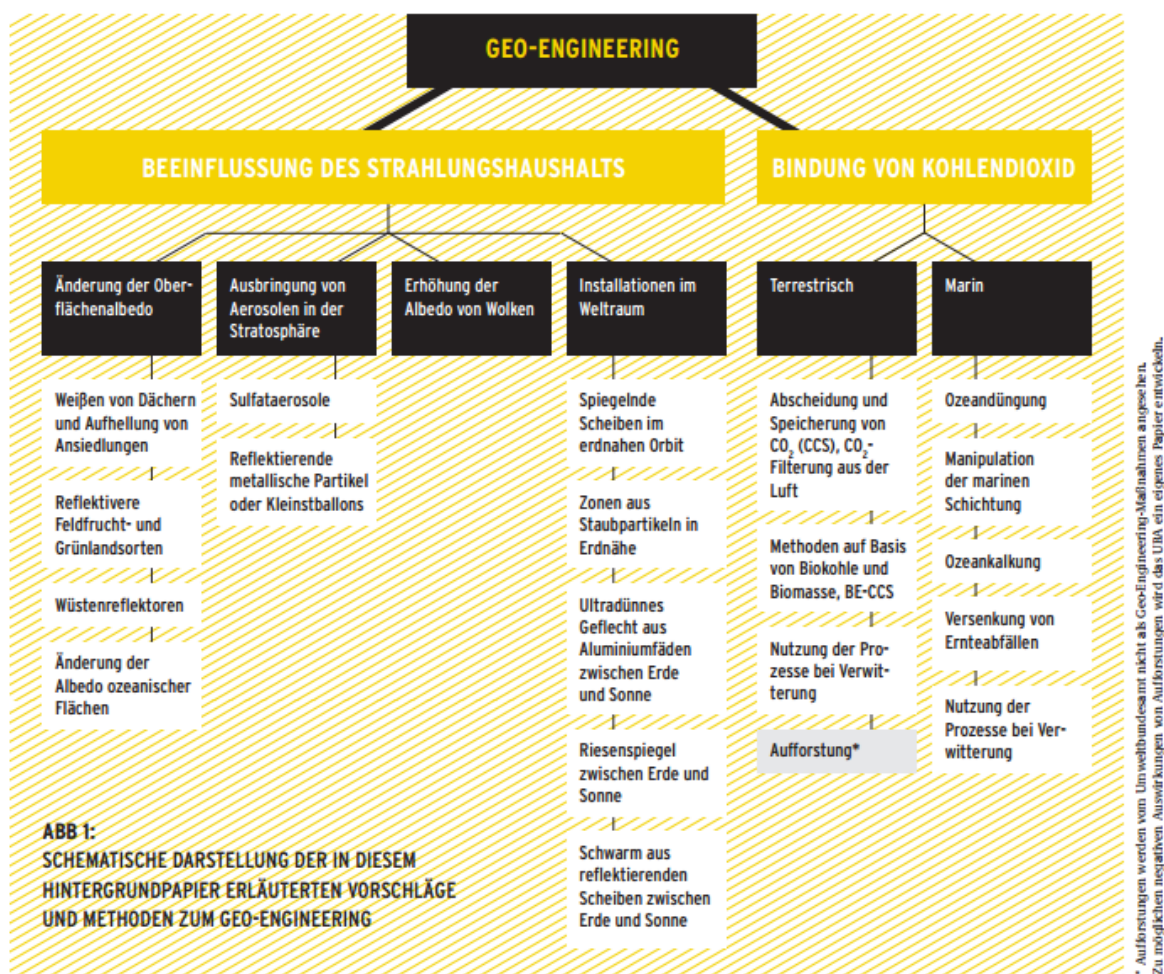


Abbildung 7: Geoengineering und seine Methoden (Quelle: umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4125.pdf [eingesehen am 25.12.2014])

Beide genannten Methoden des Geoengineerings haben das gemeinsame Ziel der langfristigen Abkühlung der Erde, welches sie mit unterschiedlichen Mitteln und Vorgehensweisen verfolgen.

4.2 Geschichte des Geoengineerings

Bereits im Jahre 1932 wurde in der damaligen UDSSR das „Institute of Rainmaking in Leningrad“ eröffnet. Das war der Startschuss des Geoengineerings. Es wurde an verschiedenen Möglichkeiten, wie etwa dem sogenannten Cloudseeding, gearbeitet um das Wetter zu beeinflussen und zu manipulieren. Im Winter 1960 gelang es der UDSSR den Himmel eines 20.000km² großes Areal mit Hilfe eines einzigen Experiments wolkenlos zu machen.“ (KEITH, 2001, S. 250)

Russland hatte nicht nur ein großes Interesse daran gefunden, das Wetter zu kontrollieren, sondern das Hauptaugenmerk sollte von nun an auf der nationalen, aber auch internationalen Klimakontrolle liegen. „Independent proposals in 1958 and 1960 called for the injection of metallic aerosols into near-earth orbit to form rings.“ (KEITH, 2001, S. 251) Diese Methode hätte vermehrt Licht auf die arktischen Gebiete Russlands geworfen, sodass das Eis, welches sich über Jahrtausende aufgebaut und gefestigt hat, irreversibel geschmolzen wäre. Ein weiterer Effekt dieser Ringe könnte sein, dass sie einen Schatten auf äquatoriale Gebiete werfen und somit die Temperatur dort gesenkt wird. Die UDSSR hätte durch diese Methode in ihrem Land ein gemäßigtes Klima erreichen können, dass ihr einen klaren wirtschaftlichen Vorteil gegenüber anderen Ländern geschaffen hätte.

In den USA wurde die Methode der Wolkenimpfungen 1946 entdeckt. Man etablierte ein privates Cloudseeding-Unternehmen, das bereits in den ersten fünf Jahren eine beachtliche Millioneneinnahme zu verzeichnen hatte. Durch den kalten Krieg rückte die Wichtigkeit des Geoengineerings für die USA in den Hintergrund, sie konzentrierten sich nun auf die Entwicklung von atomaren Waffen. Die Methode der Wolkenimpfung wurde von den Amerikanern während des Vietnamkriegs wieder aufgegriffen und als militärische Waffe gegen den Vietkong benutzt. Dieses Programm löste eine so große Empörung aus, dass es 1972 zu einem Vertrag kam, dass wetterverändernde Methoden weder zu militärischen Zwecken noch zu sonstigen feindseligen Nutzungen eingesetzt werden dürfen (vgl. KEITH, 2001, S. 253).

Erst 1992, als die National Academy of Science (NAS) einen Bericht über die möglichen Auswirkungen der globalen Erwärmung veröffentlichte, las man erstmals wieder über die Möglichkeiten des Geoengineerings. In dieser Studie erfuhr man erstmals etwas über die

beiden Bereiche des Geoengineerings und wurden auch erstmals namentlich genannt, nämlich das Solar Radiation Management und die Methode der Carbon Deoxide Reduction (vgl. NAS, 1992, o.A.).

Heutzutage wird Geoengineering oft als eine Verschwörungstheorie angesehen, dessen Existenz man nicht wahrhaben möchte. Sollte es tatsächlich Geoengineering-Experimente im öffentlichen Bereich geben, von denen das gemeine Volk nichts erfahren darf, kann das daran liegen, dass man die Auswirkungen und Nebenwirkungen, welche oft sehr schädlich für den menschlichen Organismus sein können, nicht zur Gänze kennt. In manchen Regionen der Vereinigten Staaten von Amerika wurden Geoengineering-Versuche, wie etwa jene des Cloudseedings, durch Bodenproben nachgewiesen, die dort lebende Bevölkerung wird allerdings nicht über diese Einsätze informiert.

Dennoch gibt es seit den letzten Jahren ein paar wenige Berichte, welchen über den Einsatz von Geoengineering-Methoden referieren und diese auch analysieren.

Im Jahr 2010 wurde in Großbritannien ein Experiment mittels Meersalzaerosolen durchgeführt. Dies sollte neuen Erkenntnissen dienen, wie diese Methode des Geoengineerings eigentlich wirkt. Auf Druck der Bevölkerung wurde dieses Experiment allerdings nicht weitergeführt (vgl. ZHANG et al., 2014, S. 2).

2012 wurde an der kanadischen Westküste, rund 200 Kilometer von der Insel Haida Gwaii, ein Geoengineering-Experiment durchgeführt. Es wurden 100 Tonnen Eisensulfat von einem Fischerboot ins Meer geschüttet. Dieses Eisensulfat sollte dem Plankton mehr Nährstoffe bieten, sodass es sich rasch vermehren und in weiterer Folge viel CO₂ speichern und in den Boden des Ozeans ablagern kann (vgl. ZHANG et al., 2014, S. 2).

Auch die Aufforstung der Wälder stellt eine Geoengineering-Maßnahme dar, welche allerdings wesentlich umweltfreundlicher als manche anderen Maßnahmen ist. Die Aufforstungsprogramme werden vor allem in Europa, Asien und Amerika stark gefördert. Viele Methoden des Geoengineerings können im Labor oder an Modellen getestet werden. Da ihre Bedeutung mit zunehmender Erdtemperatur höchstwahrscheinlich steigen wird, wird eine Testung und Anwendung im freien Raum unumgänglich sein.

4.3 Carbon Dioxide Removal (CDR)

Die CDR-Methode soll das sich in der Atmosphäre befindliche Kohlendioxid herausfiltern und speichern. Es gibt hierbei zahlreiche Methoden, das CO₂ permanent oder für eine gewisse Zeit zu speichern. Bei den langfristigen Methoden sind vor allem jene Modelle sehr bekannt: „the net method, the average storage method, the discounting method and the equivalence method. The net method, for example, measures the overall effect of OIF for a given period of time, generally 100 years no matter when the carbon fluxes take place within that period.” (GÜSSOW et al., 2009, S. 6) Der Unterschied zwischen den permanenten und den temporären Speichermethoden ist jener, dass die temporären Speicher mit der Zeit ersetzt, gereinigt oder entleert werden müssen. Da die CDR-Methode sowohl an Land als auch im Wasser verwendet wird, eignen sich für den marinen Einsatz vor allem die langfristigen Speichermethoden, die temporären Methoden werden somit eher im terrestrischen Bereich eingesetzt.

Im folgenden Kapitel, werden sowohl terrestrische als auch marine Geoengineering-Methoden vorgestellt werden. Für viele dieser Methoden gibt es bereits Computerprogramme, welche diese Verfahren simulieren können. Durch diese Programme und durch Berechnungen kann bereits bestimmt werden, wieviel CO₂ diese Methoden absorbieren werden. Hierfür gelten folgende Einheiten: „1 Gigatonne Kohlenstoff (Gt C) entspricht 109 Tonnen Kohlenstoff (t C). 1 Tonne Kohlenstoff entspricht 3,67 Tonnen Kohlendioxid. Oft findet man auch die Einheit Petagramm (Pg), wobei 1 Pg = 10¹⁵ Gramm = 1 Gt. Da beim Kohlenstoff-Kreislauf nicht nur das gasförmige Kohlendioxid betrachtet wird, sondern alle Verbindungen, in denen Kohlenstoff vorkommt, beziehen sich diese Angaben immer auf Gt Kohlenstoff.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 20)

In der Atmosphäre befinden sich derzeit etwa 750Gt Kohlenstoff (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 24).

4.3.1 Terrestrisches Geoengineering

Die CDR-Methoden des terrestrischen Geoengineerings befinden sich, wie der Name bereits vermuten lässt, am Boden. Es wurden hierbei verschiedene technische Verfahren entwickelt, welche durch chemische oder physikalische Prozesse das CO₂ aus der Atmosphäre oder direkt aus schädlichen Abgasen herausfiltern und dieses an einem

spezifischen Ort, wie etwa riesige natürliche oder künstliche Speicher unter der Erde, sammeln und speichern. Diese Methode der Speicherung birgt natürlich Gefahren, da die Speicher Risse oder Löcher bekommen könnten und somit das CO₂ in einer gebündelten Menge wieder an die Oberfläche und somit in die Atmosphäre eintreten könnte. Trotz dieser Gefahr ist das terrestrische Geoengineering wahrscheinlich die sicherste und umweltschonendste Geoengineering-Methode.

4.3.1.1 Carbon Capture and Storage

Bei der CCS-Methode handelt es sich um ein, derzeit noch fiktives, Verfahren, dass die CO₂-Emissionen in der Atmosphäre verringern soll. Damit ist vor allem jenes CO₂ gemeint, welches beim Verbrennen fossiler Brennstoffe entsteht. Mit dieser Methode sollen 65-80 Prozent des sich in der Atmosphäre befindlichen CO₂ dauerhaft entfernt werden (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2009b, S. 2). Das CCS-Prinzip würde in drei Schritten verlaufen, wobei der erste Schritt die Abtrennung des CO₂ von den restlichen Abgasen ist. Das CO₂ könnte dabei mit Hilfe von chemischen oder physikalischen Verfahren von den restlichen Stoffen getrennt werden, wie es zum Beispiel auch bei der Abtrennung von Erdgas mit Schwefelwasserstoff und CO₂ passiert. Der zweite Schritt wäre es nun, einen passenden Transportweg für das CO₂ zu finden. Dies stellt die Wissenschaftler vor ein leicht zu lösendes Problem, da bereits heute der Gastransport über Pipelines und Tankschiffe gang und gäbe ist. Der dritte und zugleich schwierigste Schritt ist jener der Lagerung des CO₂-Gases. Zur Speicherung des CO₂ orientiert man sich an Pilotprojekten in Kanada, Norwegen und Algerien, welche circa 1 Million Tonnen an CO₂ pro Jahr im Untergrund speichern (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2009b, S. 2). Das Bundesumweltamt (2009b, S. 2) berechnet, dass mindestens 1,5 Milliarden Tonnen pro Jahr gespeichert werden müssten, um einen signifikanten Effekt wahrnehmen zu können. Dazu seien allerdings etwa 1500 Speicher nötig. Diese unterirdischen Speicherstätten können allerdings der ökologischen Umwelt schaden, falls sie undicht werden würden. Daher müssen potenzielle Lagerstätte auf ihre Dichtigkeit überprüft werden. Dabei gibt es bereits vorhandene unterirdische Formationen, die für eine CO₂-Speicherung besser geeignet sind als andere. „Erdöl- und Erdgaslagerstätten können gegenüber anderen Formationen – wie Salzwasser führenden tiefen Aquiferen – günstigere CO₂-Speicherstandorte sein, weil sie, neben ihrer Dichtigkeit, besser untersucht sind und weniger Nebenwirkungen (verdrängtes Wasser) haben können.“

(UMWELTBUNDESAMT, 2009b, S. 5) Zudem benötigen sie auch sehr viel Platz. „Das Potenzial von CCS und weiteren Verfahren mit CO₂-Speicherung ist durch die Konkurrenz zu anderen Nutzungen des Untergrundes, wie die Energiespeicherung für Erd-/Biogas oder Wasserstoff, ferner Rohstoffgewinnung und Geothermie eingeschränkt.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 20) Das BUA (2009b, S. 2f.) empfiehlt hierzu, dass die nachhaltige Nutzung gegenüber der CCS-Methoden Vorrang haben sollte.

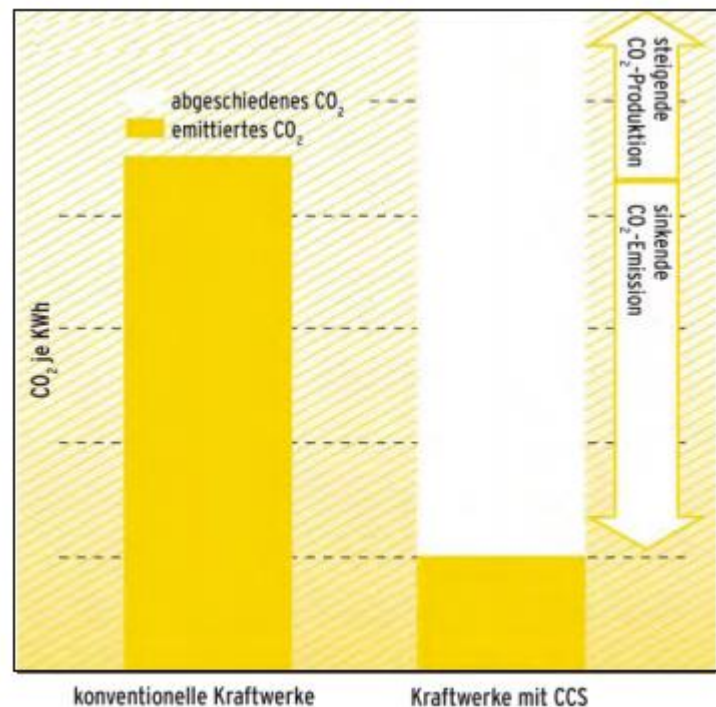


Abbildung 8: Schematischer Vergleich der CO₂ Produktion von konventionellen und CCS Kraftwerken (Quelle: Vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 20)

Da die Prozesse der Abtrennung und Speicherung des CO₂ zusätzliche Energie brauchen werden, wird so auch der CO₂-Ausstoß steigen. In Abbildung 8 wird der Vergleich zwischen konventionellen Kraftwerken und Kraftwerken mit der CCS-Methode sichtbar gemacht. Man kann erkennen, dass der freigesetzte CO₂-Gehalt bei den Kraftwerken mit der CCS-Methode zwar drastisch gesenkt werden würde, es dort aber zu einer steigenden CO₂-Produktion kommen würde, welches man wiederum speichern müsste. „Der Einsatz der CCS-Technik erhöht den Verbrauch begrenzt verfügbarer fossiler Rohstoffe um bis zu 40%.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2009b, S. 4) Dieser zusätzliche Energieverbrauch sowie die Unklarheiten über die Speicherung und die daraus möglichen resultierenden Gefahren machen die CCS-Methode zu einem langandauernden Forschungsprojekt.

4.3.1.2 Künstliche Bäume

Wie der Name bereits vermuten lässt, stecken hinter dieser Methode Filteranlagen, welche die Aufgaben der Baume, nämlich die Filterung des CO₂ aus der Atmosphäre, unterstützen sollen. Diese Filteranlagen oder künstlichen Bäume könnten sowohl am Festland als auch

im Wasser angebracht werden. Das Prinzip funktioniert ähnlich wie bei der CCS-Methode. Das CO₂ wird hier aus der Luft gefiltert und anschließend in einen unterirdischen Speicher weitergeleitet, der sich in unmittelbarer Nähe befinden könnte. Allerdings ist die CO₂-Konzentration in der Luft 300-mal geringer als in den Rauchabgasen eines Kraftwerks (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 20).

In Abbildung 9 kann man die künstlichen Bäume sowohl in einer landschaftlichen als auch marinen Gegend erkennen. Die Windmühlen, die neben den Filteranlagen stehen, sind wohl als Energiegewinner für die künstlichen Bäume gedacht. Denn auch die benötigen, wie die



Abbildung 9: Künstliche Bäume in unterschiedlichen Umgebungen (Quelle: Institution of Mechanical Engineers)

CCS-Methode, viel Energie und würden ebenfalls zusätzlich halb so viel CO₂ produzieren, wie sie der Atmosphäre entziehen könnten (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 20). Die Filteranlagen sollen tendenziell an stark verschmutzten Orten, wie Autobahnen und gegebenenfalls auch in Städten, aufgestellt werden.

4.3.1.3 Methoden mit Biokohle und Biomasse

Pflanzen filtern während der Photosynthese viel CO₂ aus der Atmosphäre und binden diesen Stoff in sich. Insgesamt können Landökosysteme so bis zu 11Gt Kohlenstoff aufnehmen. Sterben die Pflanzen ab oder werden sie vom Menschen abgeholzt oder entfernt, so entweicht das CO₂ wieder in die Atmosphäre. (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 21). Alleine durch die Rodung des Regenwaldes werden jährlich rund 1,5Gt

Kohlenstoff, was etwa 16% der globalen Emissionen entspricht, freigesetzt (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S. 10).

Es gibt vier Methoden, mit welchen das Wachstum an Biomasse gesteigert und somit die Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre gedämpft werden kann. Das Magazin „The Royal Society“ (2009, S. 11ff.) hat die vier Methoden genauer analysiert, welche hier kurz dargestellt werden sollen.

a) Bioenergie und Biokraftstoffe

Pflanzen geben bei ihrer Zersetzung exakt die Menge an CO₂ frei, welche sie während der Photosynthese aufgenommen haben. Somit bleibt die CO₂-Bilanz in diesem Rahmen neutral. Deshalb ist die Idee entstanden, aus geeigneten Pflanzen oder Pflanzenresten Bioenergie und Biokraftstoffe herzustellen, da sie im Vergleich zu fossilen Brennstoffen wesentlich weniger CO₂ freilassen. Bei der Erzeugung fossiler Brennstoffe wird wesentlich mehr CO₂ freigesetzt, als im Vorfeld gebunden werden konnte, es kommt somit zu einer negativen CO₂-Bilanz (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S.11). Die Abbildung 10 zeigt

Kraftstoff	Rohstoff	Wirkung	Emissionen
Benzin	Vergleichsgröße	fossil	316
Ethanol	Stroh, aus Lignozellulose (2020)	(Abfall)	24
BioCNG	Gülle	(Abfall)	86
Ethanol	Zuckerrohr (Brasilien)	ohne Landnutzungsänderung	111
Ethanol	Weizen	ohne Landnutzungsänderung	138
Ethanol	Zuckerrohr (Brasilien)	mit direkter Landnutzungsänderung des Grünlandes	161
BioCNG	Mais	ohne Landnutzungsänderung	184
BioCNG	Mais	mit direkter Landnutzungsänderung des Grünlandes	248
Ethanol	Zuckerrohr (Brasilien)	mit direkter Landnutzungsänderung der Savanne	449
BioCNG = aufbereitetes und komprimiertes Biogas			

Abbildung 10: Emissionsvergleich von Benzin und Biokraftstoffen. (Quelle: Öko – Institut 2010)

den Vergleich der CO₂-Emissionen zwischen Benzin und Biokraftstoffen. Man kann somit deutlich erkennen, dass die Produktion von Biokraftstoffen wesentlich CO₂-freundlicher als jene von Benzin ist. Die Ausnahmen bilden jene Felder, welche zuvor Grünländer oder Savannen waren. Durch ihre Aufbereitung zur Feldnutzung wurden Unmengen an CO₂ freigesetzt. Somit ist die Gewinnung des Kraftstoffes aus brasilianischem Zuckerrohr rund ein Viertel schädlicher als der fossile Brennstoff Benzin. Diese Methode wird allerdings in den meisten Fachbereichen nicht als Geoengineering-

Methode angesehen (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S.11).

b) Bioenergie mit CO₂-Abtrennung und Speicherung

Die sogenannte CCS-Methode, kurz auch BECS-Methode, baut direkt auf der Erzeugung von Bioenergie und Biomasse auf. So soll zum Beispiel das CO₂ aus Pflanzenresten für die Biokraftstoffherstellung abgetrennt und das daraus resultierende CO₂ in geologischen Formationen gespeichert werden. Damit ist vor allem der CO₂-Transport in tiefer liegende Erdschichten gemeint, wie es zum Beispiel auch bei der CCS-Methode vorgestellt wurde. „Compared with other geoengineering proposals, Bio-Energy with Carbon Storage (BECS) can provides a powerful tool for reducing CO₂ levels that is fast and risk-free.“ (ZHANG et al., 2014, S. 4). Diese Methode existiert im Moment noch nicht in der Realität. Es ist allerdings geplant, dass diese Maßnahme vor allem an großen CO₂-Strömen eingesetzt werden soll, wie zum Beispiel an Biomassekraftwerken oder Bioethanolraffinerien (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 23).

c) Speicherung von Biomasse

Bei dieser Methode der Speicherung soll die natürliche CO₂-Bilanz, die durch das Absterben der Pflanzen entsteht, unterbrochen werden. Eine Möglichkeit, dies zu tun, wäre Erntereste und Holz zu verbrennen, diese zu Ballen zusammenzupressen und sie auf den Meeresgrund sinken zu lassen. Diese Methode wird in Kapitel 4.3.2.4 genauer beleuchtet.

d) Kohlenstoffsinken an Land

Dabei soll das CO₂-Gas in den Boden gepumpt werden, wo es sicher verschlossen werden kann, wie etwa bei der CCS-Methode. Eine weitere Möglichkeit, das CO₂ zu speichern, ist, die Pflanzenreste zu einer Biomasse zu vermengen, welche in Landsenken abgelagert werden können. (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S.11).

Die beschriebenen Methoden zielen demnach auf eine Speicherung des CO₂ in den Pflanzen selbst oder in Produkten, die aus ihnen produziert werden, ab. Zudem werden Möglichkeiten der unterirdischen Speicherung sowohl an Land als auch unter Wasser angegeben.

Allerdings ist die Verfügbarkeit an Biomasse, welche zur Speicherung des CO₂ genutzt

werden soll, beschränkt. Man müsste Felder bestellen, die ausschließlich zur Weiterverarbeitung von Biomasse genutzt werden würden.

Biokohle oder Pflanzenkohle entsteht natürlich, indem sich organisches Material in einer warmen, sauerstoffarmen Umgebung zersetzt. Dadurch entsteht aber nicht nur Kohle, sondern auch Gase und Öle, welche wiederum als Kraftstoff genutzt werden könnten. Die Kohle entsteht allerdings nicht nur natürlich, sie kann auch künstlich, mit Hilfe der sogenannten Pyrolyse, hergestellt werden. Es gibt noch eine weitere Methode, Kohle künstlich herzustellen, nämlich hydrothermale Karbonisierung, auch HTC genannt (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 22). „Dabei soll Biomasse unter hohem Druck in Wasser erhitzt und auf diese Weise verkohlt werden. Abhängig vom Ausgangsmaterial soll es möglich sein, durch Pyrolyse bis zur Hälfte und durch HTC zwischen 70 und 80 % des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs in Biokohle umzuwandeln.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 22)

Da die Kohle durch die Zersetzung und die Komprimierung viel kompakter geworden ist, kann sie nun auch mehr CO₂ aufnehmen als die pflanzlichen Zellen. Durch diese Komprimierung ist die Kohle auch vor einer Zersetzung durch Mikroorganismen besser geschützt und kann das CO₂ nun für mehrere hundert oder gar tausend Jahre speichern (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S.12).

The Royal Society (2009, S. 12) hat nun versucht abzuwägen, ob es für die Umwelt günstiger wäre, das pflanzliche Material direkt in einem Kraftwerk zu verbrennen, wo das CO₂ abgespalten und gespeichert werden könnte, oder Kohle mittels Pyrolyse herzustellen und diese anschließend zu vergraben. Dabei kam heraus, dass die beiden Methoden in einer engen Konkurrenz zueinander stehen. Die lange Speicherzeit der Kohle könnte aber den entscheidenden Vorsprung geben. Zudem wird auch der positive Effekt zur Produktivitätssteigerung der Ernteerträge hervorgehoben, welcher durch eine Mischung der Kohle mit Erde hervorgerufen werden kann. Befürworter der Biomasse zur Bindung des CO₂ widersprechen allerdings mit dem Argument, dass bei großen Mengen an Biomasse mehr CO₂ gespeichert werden könnte als es die Biokohle überhaupt könnte (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S.12). Somit wird die Klärung der Frage noch einige Forschungsarbeit in Anspruch nehmen.

4.3.1.4 Aufforstung und Wiederbewaldung

Wie die Nutzpflanzen auf den Äckern, nehmen auch Bäume große Mengen an CO₂ auf. Diese Speicherung entsteht während der Photosynthese, wobei das CO₂ von den Blättern bis tief in die Wurzeln aufgenommen und eingelagert wird. Die Wälder der Erde nehmen rund 30 % des CO₂ auf, welches bei der Abholzung von Wäldern und der Verbrennung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre freigesetzt wird. Zudem befindet sich bereits doppelt so viel gebundenes CO₂ in den Wäldern wie in unserer Atmosphäre. Seit einigen Jahren besteht allerdings der Trend der massiven Waldrodung, vor allem im Regenwaldgebiet. Dadurch werden Unmengen an bereits gespeichertem CO₂ wieder in die Atmosphäre entlassen. Allein die Abholzung der Wälder im tropischen Gebiet ist für 16 Prozent der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S.10).

Es gilt nun, die bestehenden Wälder wieder aufzuforsten sowie waldlose Flächen zu bewalden. Die United Nations Framework Convention in Climate Change (UNFCCC) hat hierfür ein Projekt namens „Clean Development Mechanism“, kurz CDM, ins Leben gerufen. Bei diesem Projekt können Industrieländer, welche einen hohen CO₂-Bestand aufweisen, einen Teil ihrer CO₂-Emission durch CDM-Projekte, also Projekte zur Kohlenstoffentfernung, in Entwicklungsländern ausgleichen. Allerdings laufen diese Projekte nur sehr schleppend voran, da es oft an finanziellen Mitteln sowie dem Know-how in den Entwicklungsländern scheitert (vgl. ZHANG et al., 2014, S. 3). Es können sich natürlich auch Länder freiwillig zu einer Kompensation der Treibhausgase melden, die ebenso unter die CDM-Projekte fallen und finanziell unterstützt werden. Die Länder, die an den CDM-Projekten teilnehmen, müssen eine gesetzliche Definition für den Begriff „Wald“ festlegen. Dabei gilt zumindest:

- „Überschirmungsgrad: Mindestüberschirmung zwischen 10% und 30%.
- Mindestwaldfläche: Als Mindestgröße für einen Wald ist ein Wert zwischen 0,05 und 1 Hektar zu definieren.
- Mindestbaumhöhe: Mindestwert für die Höhe eines „Baumes“ muss zwischen 2 und 5 Meter liegen (im Stadium der Reife).“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011b, S.11)

Die CDM-Methode unterscheidet zudem auch zwischen den Begriffen der Aufforstung und der Wiederbewaldung. Unter „Aufforstung“ werden jene Flächen verstanden, welche seit mindestens 50 Jahren keine bewaldete Fläche mehr waren. Bei der Wiederaufforstung müssen die Flächen seit mindestens 20 Jahren waldfrei sein. Diese Regelungen wurden ins

Leben gerufen, damit es zu keiner Ausnutzung der CDM-Projekte kommt, indem man kurzfristig bestehende Waldbestände abholzt, um sie dann im Rahmen der CDM-Projekte wieder aufzuforsten (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011b, S.11).

Die Aufforstung und Wiederbewaldung kommen in den meisten Geoengineering-Publikationen zwar vor, eigentlich können sie aber nicht wirklich zu den Geoengineering-Maßnahmen gezählt werden. Aber sie können mit den Geoengineering-Methoden in Verbindung gesetzt werden, da es oft zu einheitlichen Plantagenbepflanzungen kommt oder gentechnisch manipulierte Pflanzen ausgesät werden (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 23). Jede Pflanze beziehungsweise jeder Baum hat nur eine begrenzte Aufnahmefähigkeit von CO₂-Gasen. Die Experten müssen nun ermitteln, welche Baumarten besonders viel CO₂ aufnehmen können, und diese vervielfältigen. Es kann auch dazu kommen, dass schnell wachsende Pflanzenarten derart gentechnisch manipuliert werden, dass sie wesentlich mehr CO₂ aufnehmen können, als sie es in ihrer ursprünglichen Art hätten können.

4.3.1.5 Verwitterungsprozesse

Nicht nur Pflanzen und Bäume können große Mengen an CO₂ aufnehmen und speichern. Auch bei den Verwitterungsprozessen, die durch Regen, Wind, Frost und Sonneneinstrahlung ausgelöst werden, löst sich CO₂ aus der Atmosphäre. „Bei der Verwitterung werden Silikatgesteine unter Einwirkung von Kohlensäure, die durch Lösung von CO₂ in Regen- oder Bodenwasser gebildet wird, aufgelöst. Dabei entsteht lösliches Kalziumkarbonat, das über die Flüsse ins Meer gelangt. Die Verwitterung beeinflusst in erheblichem Maße die CO₂-Konzentration der Atmosphäre und der Ozeane.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 29) Allerdings ist der Prozess der Verwitterung sehr langwierig, schätzungsweise wird lediglich 0,1Gt Kohlenstoff pro Jahr aus der Atmosphäre gefiltert (Vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S. 13). Wissenschaftler haben daher Methoden gefunden, wie man ihn beschleunigen oder künstlich herstellen kann. Diese Methoden, wie sich auch in The Royal Society (2009, S. 13ff.) vorgestellt werden, sollen hier nun in aller Kürze dargestellt werden, wobei bei allen gilt, dass ein Molekül ein anderes ersetzt. Mineralien und Karbonate wiegen etwa doppelt so viel wie ein Molekül des CO₂. Somit wären zwei Tonnen Gestein notwendig, um eine Tonne CO₂ zu entfernen und zu speichern (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S. 13).

a) Vermischung von Silikatmineralien mit Erde

Dabei wird vor allem an das Silikatmineral Olivin gedacht. Das Mineral wird mit Erde vermischt und auf Ackerflächen verstreut. Dabei müssten allerdings riesige Mengen an Olivinmineralien abgebaut werden. Man geht davon aus, dass man pro Jahr 7km³ der Silikatmineralien benötigen würde, damit so viel CO₂ aufgenommen werden kann, wie die Menschheit gerade emittiert. Nach der Vermischung mit der Erde bindet sich das Mineral mit dem CO₂ zu festem karbonhaltigen Mineralien und zu löslichen Bikarbonaten, welche in weiterer Folge verwittern (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S. 13f.).

b) Karbonatlösungstechnik

Bei dieser Methode soll Kalkgestein bearbeitet und mit CO₂-Abgasen von Geoengineering-Anlagen, wie etwa jenen der CCS-Methode, vermengt werden. Dadurch würde es zu einer Reaktion kommen und lösliches Bikarbonat würde entstehen. Die daraus resultierende Biokarbonatlösung würde anschließend in den Ozean entlassen werden. Die Einleitung in die Ozeane könnte mit der Zeit zu einer Versauerung führen, die die Meereswelt schädigen könnte. Diese Versauerung würde aber Berechnungen nach sechs Mal geringer ausfallen als jene, die durch den Klimawandel ausgelöst werden würde. Damit diese Methode zu einem Erfolg führt, benötigt man etwa 2,3 Tonnen Kalkstein und 0,3 Tonnen Wasser, um eine Tonne CO₂ zu binden (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 30). Vorteilhaft wären Kalkklippen in Küstennähe, wo die Biokarbonatlösung ohne große Transportkosten direkt ins Meer geleitet werden kann.

c) CO₂-Anreicherung in der Erdkruste

Es gibt bestimmte Gesteinsarten, die besonders schnell verwittern und zugleich viel CO₂ aufnehmen können, darunter fallen insbesondere jene Gesteine, die Olivin enthalten (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 30). „Diese Verwitterung könnte man dadurch beschleunigen, dass man heißes CO₂-Gas unter hohem Druck über Bohrungen ins Gestein einbringt. Dieser Prozess könnte mehr als 1 Gt CO₂ (0,27 Gt C) pro Jahr speichern und würde ohne den Transport großer Mengen an Gestein auskommen.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 30) Der Vorteil an dieser Methode ist, dass es keine hohen Transportkosten geben würde, da nicht schweres Gestein, sondern lediglich das CO₂-

Gas transportiert werden müsste.

d) Silikatverwitterung mittels Elektrolyse

Es besteht die Möglichkeit, die Silikatverwitterung durch Elektrolyse zu beschleunigen, um Meeressalze in starke Basen und Säuren zu spalten. Die erzeugten starken Basen können nun CO₂ aufnehmen und speichern. Die abgespaltene Säure kann wiederum zur Verwitterung von Silikaten genutzt werden. In Folge der Silikatverwitterung würde diese die Säure wiederum neutralisieren und ein Salz erzeugen, welches von den Ozeanen gut aufgenommen werden könnte (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S.14).

Alle diese vorgestellten Methoden sind auch in der Realität umsetzbar. Allerdings würden dabei hohe Kosten sowie hohe CO₂-Emissionen aufgrund der Abbautechniken und des Transportes anfallen. Zudem ist auch der Mengenverbrauch an Gestein und Mineralien gigantisch. Wie bereits eingangs erwähnt, bräuchte man zwei Tonnen Gestein, um eine Tonne CO₂ zu entfernen und zu speichern.

4.3.2 Marines beziehungsweise ozeanisches Geoengineering

Rund 70 % der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt. Diese haben Berechnungen zufolge wahrscheinlich 50-mal mehr CO₂ gespeichert, als sich momentan in der Atmosphäre befindet. Die jährliche Aufnahme der Ozeane von CO₂ ist mit etwa 100 Petagramm sehr beträchtlich und somit bietet das marine Geoengineering eine potenzielle Möglichkeit zur Verringerung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre und in weiterer Folge zu einer Abkühlung der Erde (vgl. ZHANG et al., 2014, S. 6). Berechnungen zu Folge, soll der Ozean um die 40.000Gt Kohlenstoff gespeichert haben (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S.24).

Aufgrund dieses hohen Potenzials wurden verschiedene marine Geoengineering-Methoden entwickelt, welche das in der Atmosphäre befindliche CO₂ sichern und verschließen sollen. Dieser Prozess findet vor allem im Oberflächenwasser statt, wobei kleinste Algen- und Planktonorganismen das CO₂ aufnehmen und speichern. Diese Organismen dienen anschließend anderen Meeresbewohnern als Nahrungsmittel, oder sterben ab und sinken

mit dem gespeicherten CO₂ auf den Meeresgrund ab, wo es für einige Jahrhunderte verweilen wird (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 26f.). Dieser Prozess wird „die biologische Pumpe genannt“ und ist in Abbildung 11 ersichtlich. Das Ziel der Geoengineering-Experten ist es nun, den Effekt dieser biologischen Pumpe zu verstärken, zum Beispiel mittels der Ozeandüngung. Könnte die Leistung der biologische Pumpe um

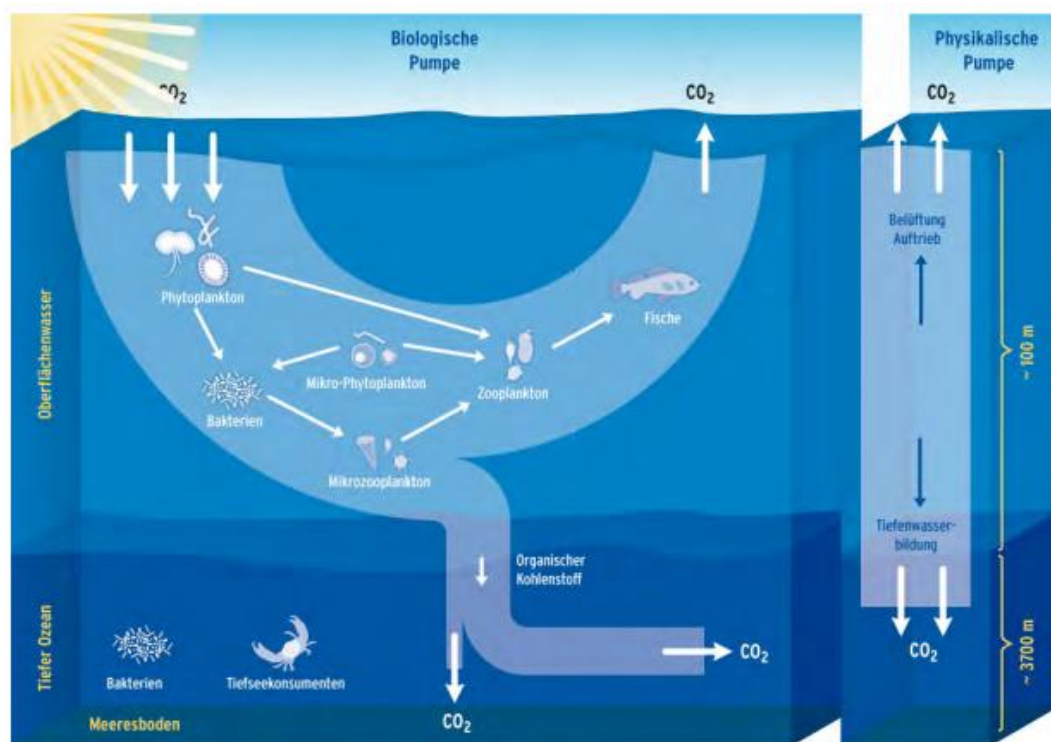


Abbildung 11: Biologische und physikalische Pumpe (Quelle: UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 25)

nur 10% gesteigert werden, könnte bis zu 1Gt Kohlenstoff pro Jahr zusätzlich aus der Atmosphäre aufgenommen werden. Auch die in Abbildung 11 dargestellte physikalische Pumpe führt zu einer Verringerung des CO₂-Gehaltes, indem eine kalte Strömung mit dem CO₂ in tiefere Lagen absinkt und nach einigen hundert Jahren wieder an einer wärmeren Stelle aufsteigt. „Diese zweite Pumpe wird auch ‚Löslichkeitspumpe‘ genannt, denn sie beruht auf der Abhängigkeit der CO₂-Löslichkeit von der Temperatur.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 26) Geoengineering-Experten versuchen auch diese Pumpe zu verändern und ziehen dabei eine Manipulation der marinen Schichtung in Erwägung.

4.3.2.1 Ozeandüngung

„Beginning with the experimental work of Martin and Fitzwater (1988), iron has been recognized for more than two decades as important micronutrient regulating marine

productivity and associated biogeochemistry over large ocean areas.” (GÜSSOW et al., 2009, S. 4) Eisen bestärkt ein vermehrtes Wachstum von Plankton, welches maßgeblich zur Verminderung des Klimawandels beitragen kann, da es verschiedene Stoffe aufnehmen und speichern kann. „Photosynthesis by marine phytoplankton not only consumes CO₂ but also nitrogen (N), phosphorus (P), and iron (Fe).” (ZHANG et al., 2014, S. 6) Um diesen positiven Effekt des Planktons zu verstärken, kann man bestimmte Bereiche der Ozeane mit Eisen düngen, welches nicht nur das Wachstum des Planktons anregt, sondern auch dessen Photosynthese, welche wiederum für die Aufnahme von CO₂ und anderen Stoffen maßgeblich ist. Nachdem das Plankton genügend CO₂ aufgenommen hat, sinkt es langsam auf den Meeresgrund ab. Hierzu werden seit 1993 Experimente durchgeführt, die allerdings bislang nur wenig Daten geliefert haben, um eine eindeutige Prognose und Wirkung der CO₂-Verringerung durch Plankton nachweisen zu können (vgl. BUESSELER et al., 2008, S. 162). Eines hatten alle Experimente allerdings gemeinsam, nämlich dass sie den CO₂-Gehalt im Oberflächenwasser reduzierten. „All experiments have revealed a significant increase in phytoplankton biomass and an associated decrease in the partial pressure of CO₂ (pCO₂) in the surface water, with enhanced particle export being observed at the end of one experiment.” (GÜSSOW et al., 2009, S. 4) Ein wesentliches Problem bei der Bestimmung der Funktionalität stellt die natürliche Meeresströmung dar. Sie verteilt die Eisenpartikel in einem großräumigen Gebiet, sodass eine punktuelle Bestimmung der Wirkung nur sehr vage ausfällt. Allerdings gibt es auch Computermodelle, welche die Ozeandüngung virtuell nachstellen und so eine ungefähre Analyse bieten können. „Modeling studies have addressed sequestration more directly and have suggested that OIF in areas of persistent high nutrients (so-called high-nutrient, low-chlorophyll areas) would be unlikely to sequester more than several hundred million tons of carbon per year.“ (BUESSELER et al., 2008, S. 162)

Die Ozeandüngung wäre somit eine optimale Geoengineering-Methode. Um ihre Wirkung besser zu erforschen und auch mehr Ergebnisse zu erreichen, werden in Zukunft vermehrt Studien, Tests und computergesteuerte Modelle durchgeführt werden. Dabei müssen aber nach Buesseler et al. (2008, S. 162) mehrere Faktoren beachtet werden, die hier nun in einer verkürzten Version zusammengefasst werden:

- Feldstudien über einen längeren Zeitraum durchgeführt, um so die ökologischen Auswirkungen sowie die CO₂-Verringerung zu untersuchen.
- Detaillierte Messungen im Meeresgrund, um die Menge des gespeicherten CO₂ zu überprüfen und zu beobachten.

- Testung der Ozeandüngung in nährstoffreichen und nährstoffarmen Gebieten, um die Wechselwirkungen des Eisens mit seiner Umgebung besser verstehen zu können, wie etwa der Stickstoffspeicherung.
- Verbesserte Modellstudien, um bessere Ergebnisse über die Ozeandüngung und ihre Folgen zu erhalten.
- Eine Kosten-Nutzen-Abschätzung. Es soll somit abgewogen werden, ob das Ergebnis der Ozeandüngung so zielführend sein kann, um hohe Investitionen zu tätigen. (vgl. BUESSELER et al., 2008, S. 162).

Eine weitere wichtige Frage, die es zu beantworten gilt, ist die Frage nach der Menge an CO₂, die der Atmosphäre entzogen werden kann, und ob diese Menge überhaupt gespeichert werden kann, da die Ergebnisse gewissen Richtwerten entsprechen müssen, die im Kyoto-Protokoll festgehalten wurden. (vgl. GÜSSOW et al., 2009, S. 6). „The Kyoto Protocol (KP) established such criteria for Clean Development Mechanism (CDM) and Joint Implementation (JI) projects. The projects have to be measured by an approved methodology, the storage has to be additional, the credits have to be verified by a third party, the storage has to be permanent, and the number of carbon credits has to take into account leakage.” (GÜSSOW et al., 2009, S. 6) Um eine groß angelegte Feldstudie über einen längeren Zeitraum, wie es von Buessler et al. (2008, S. 163) vorgeschlagen wurde, durchzuführen, müsste ein internationales Interesse bestehen sowie private Firmen und Länder teilnehmen, welche zugleich als die vom Kyoto-Protokoll geforderte dritte Partei agieren würden.

Nach der Seerechtskonvention und der Londoner Konventionen sind Verschmutzungen beziehungsweise Belastungen der Ozeane durch Abfälle und Schadstoffe verboten. 2008 wurde allerdings ein neuer Beschluss gefasst, welcher die Experimente der Ozeandüngung erlaubt, allerdings nur unter dem Kriterium, dass ein Experiment tatsächlich notwendig ist. Zudem wurde 2010 ein Bewertungskonzept ausgearbeitet, welches die Auswirkungen auf die Umwelt protokollieren soll (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 35).

4.3.2.2 Veränderung der marinen Schichtung

Die Ozeane bestehen aus einer warmen Oberflächenwasserschicht und einer kalten Tiefenwasserschicht. Das kalte Tiefenwasser ist sehr nährstoffreich und könnte durch eine Geoengineering-Methode dazu verstärkt genutzt werden, die biologische Pumpe (Abbildung 11) zu verstärken. Das nährstoffreiche Wasser würde dazu dienen, dass sich mehr Algen und Plankton bilden können, sodass mehr CO₂ gebunden werden kann. Um diesen gewünschten Effekt zu erreichen, könnten Pumpen verwendet werden, welche das Tiefenwasser ansaugen und in das Oberflächenwasser abgeben, wie es in Abbildung 12 ersichtlich ist. Die Firma Atmocean hat bereits ein Pumpensystem entworfen, welches zur Energie- und Trinkwassergewinnung hergestellt wurde. Das Pumpensystem wird hierbei mit Hilfe der Wellenenergie angetrieben und erzeugt somit einen sauberen Strom. Das System könnte nun ummodifiziert werden, indem die Pumpen das aus der Tiefe geförderte Wasser nicht an Land zur Weiterverarbeitung pumpen, sondern im wärmeren Oberflächenwasser auslassen, um so eine höhere Nährstoffdichte zu erreichen. Allerdings muss man bedenken, dass sich auch am Meeresgrund und auch im Tiefenwasser sehr viel abgestorbenes Plankton mit in sich gespeichertem CO₂ befindet. Pumpt man nun dieses Wasser an die Oberfläche, könnte auch das CO₂ wiederum in die höheren Wasserschichten gelangen oder sogar zurück an die Atmosphäre abgegeben werden (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 27). Zudem müsste eine Fläche von rund 1000km² mit Pumpen ausgestattet werden, damit zumindest 1Gt Kohlenstoff pro Jahr zusätzlich aufgenommen werden kann (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 27).

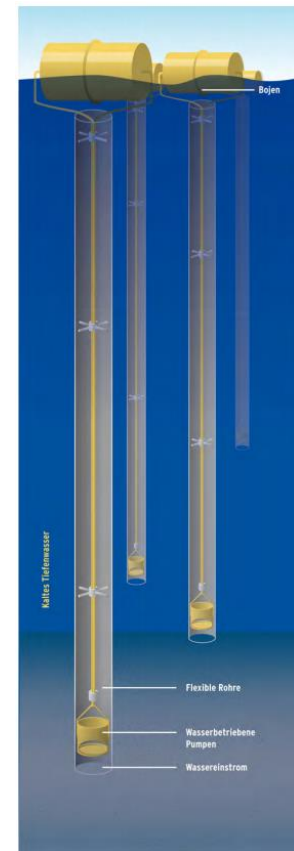


Abbildung 12: Pumpen der Firma Atmocean (Quelle: UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 27)

Die zweite Möglichkeit, die marine Schichtung zu verändern, ist den Effekt der physikalischen beziehungsweise Löslichkeitspumpe zu verstärken. „The solubility pump is the name given to the transport of carbon rich cold water into the deep ocean from downwelling currents that form in areas of low temperature and high salinity (thermohaline

circulation).“ (ZHOU und FLYNN, 2005, S. 204). Durch diesen Effekt reichert sich das CO₂ in tiefen Wasserschichten sowie am Meeresboden an.

Es gibt nun mehrere Möglichkeiten, die physikalische Pumpe mittels Geoengineering zu verstärken. Gemeinsam haben sie, dass sie entweder versuchen die Konzentration des CO₂-Gehaltes in den Wassermassen zu erhöhen, oder das absinkende Wasservolumen zu steigern (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 28). Zhou und Flynn (2005, S. 207ff.) haben diverse Methoden genauer beschrieben, von denen hier nun ein paar in einer verkürzten Version vorgestellt werden.

a) Abkühlbecken

Die Überlegung hinter dieser Methode ist, dass es einen täglichen Zyklus gibt, welcher mit dem morgendlichen Befüllen des Beckens mit Wasser beginnt und mit dessen Ablassen am Abend endet. Das Wasser hätte unter Tags genügend Zeit, um mittels Maschinen abgekühlt zu werden oder an Orten mit einer niedrigen Temperatur automatisch abzukühlen. Das Wasser wird am Abend komplett in den Ozean abgelassen, damit sich in dem Abkühlbecken keine Eisschicht bilden kann. Allerdings wäre für dieses Unterfangen ein Becken notwendig, dessen Größe unrealistisch ist. „This case was rejected without further analysis based on the preliminary assessment that the area required would exceed the area of Iceland and be the equivalent of about one third of the ice free area of Greenland.“ (ZHOU und FLYNN, 2005, S. 207ff.)

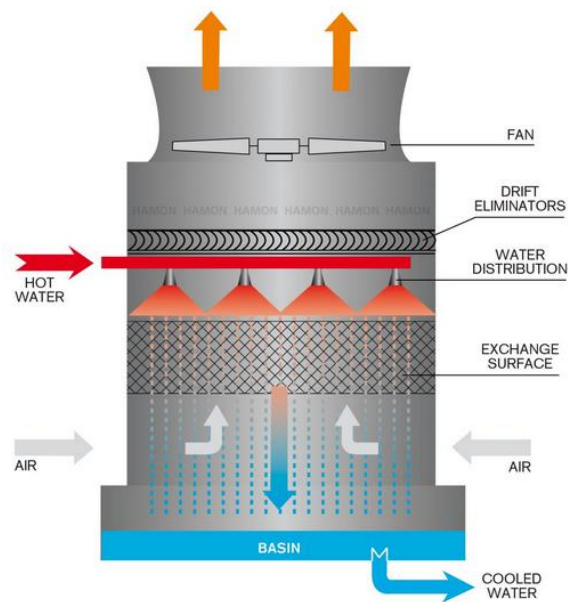


Abbildung 13: Kühlturm (Quelle: www.hamon.com [eingesehen am 25.01.2015])

b) Kühltürme

Diese Methode wird heutzutage in vielen Fabriken eingesetzt und sollte so auch zur Abkühlung des Ozeanwassers verwendet werden. In Abbildung 13 sieht man einen Kühlturm, wie er in Fabriken eingesetzt wird. Würde dieses Prinzip als Geoengineering-Methode zum Einsatz kommen, würde an der „Hot-water“-Stelle das wärmere

Ozeanwasser mit Hilfe des Ventilators angesaugt werden, gegen kalte Luftschichten tropfen und sich schließlich als kaltes Wasser in einem Bassin sammeln, welches anschließend wiederum in den Ozean geleitet wird, wo es in tiefere Schichten absinken kann. Der Ventilator zum Ansaugen des Wassers wurde in Betracht gezogen, da ein Aufwärtspumpen des Wassers noch mehr Energie verbraucht hätte als der Ventilator (vgl. ZHOU und FLYNN, 2005, S. 207).

c) Erwärmung des Oberflächenwassers

Meistens sinkt die Temperatur des Wassers mit steigender Tiefe. In manchen Fällen, wie in der linken Grafik der Abbildung 14 zu sehen, ist das Oberflächenwasser relativ kühl und

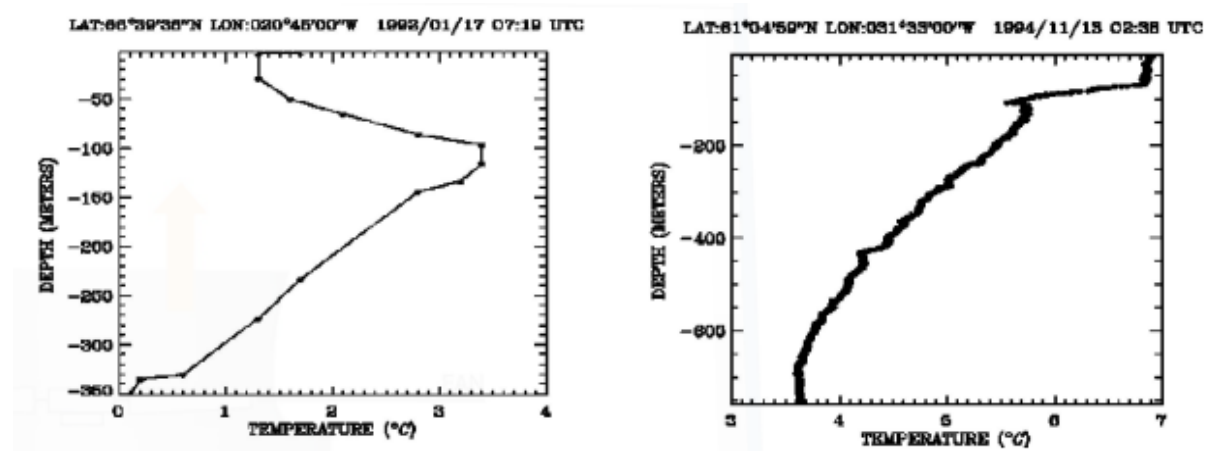


Abbildung 14: Typische Wassertemperaturprofile (Quelle: ZHOU und FLYNN, 2005, S. 210)

erwärmt sich sogar in den ersten hundert Metern, bis es dann schließlich zunehmend abkühlt. Damit dieser natürliche Effekt unterbrochen wird, soll mit Hilfe einer Pumpe, welche auf einem Schiff befestigt ist, eine warme Wasserschicht auf das Oberflächenwasser gepumpt werden, sodass ein regelmäßiger Abstieg der Temperatur, wie in der rechten Grafik der Abbildung 14, eintreten kann (vgl. ZHOU und FLYNN, 2005, S. 209f.). Allerdings wurde diese Methode wieder schnell verworfen. „Two factors led to rejecting this case without further analysis: areas of inversion are too infrequent to make the case practical, and temperature gradients are too small to have a significant impact. An assessment of 83 winter ocean temperature profiles drawn over the period 1990–2000 from NODC data showed inversions in 16% of samples, with an average inversion gradient (the difference between the surface temperature and the point of warmest water) of 2.4 °C.“ (ZHOU und FLYNN, 2005, S. 210)

d) Lufteinspritzungen

Bei dieser Methode wird mit Hilfe eines riesigen Föhns, welcher an Land montiert ist, Luft aus einer Fallhöhe von zwei Metern auf das Ozeanwasser geblasen. Die dabei entstehende Kompressionswärme wird mit Hilfe von Rohrkühlern absorbiert. Die Luft wird mit einer Temperatur von -10°C in einer Tiefe von 1,5 Metern unter der Wasseroberfläche eingespritzt (vgl. ZHOU und FLYNN, 2005, S. 209). Somit wird das Wasser gekühlt, mit CO_2 angereichert und kann in tiefere Schichten absinken. Leider ist auch bei dieser Methode der Energieverbrauch sehr hoch.

e) Verdickung des Meereises

Ziel dieser Methode ist, das Meereis durch verschiedene Hilfsmittel aufzubauen und zu stärken. In Abbildung 15 kann man die unterschiedlichen Mittel erkennen, mit welchen man versuchen möchte, das Meereis zu stärken. Dabei kommt vor allem den Wind-Power-

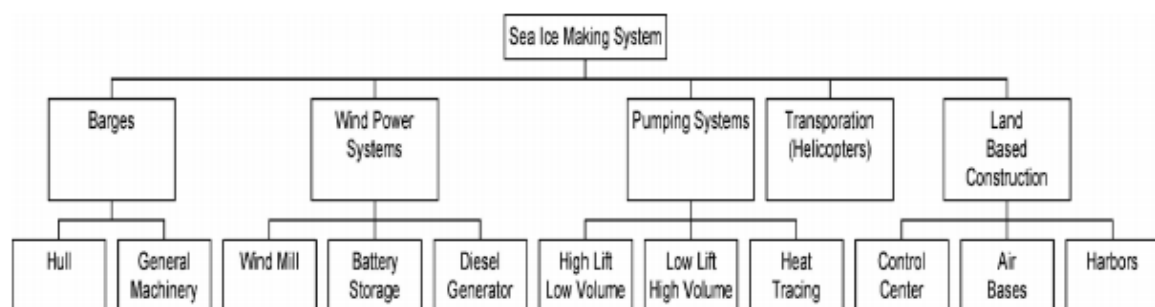


Abbildung 4: Methoden zur Meerwassereisbildung (Quelle: ZHOU und FLYNN, 2005, S. 212)

Systemen und den Pump-Systemen eine tragende Bedeutung zu. Die Windsysteme versuchen das Oberflächenwasser derart abzukühlen, dass sich mit der Zeit eine Eisschicht ausbildet. Andererseits hilft das Windsystem auch eine bereits vorhandene Eisschicht kühl zu halten, sodass sie nicht schmilzt. Diese Methode wird vor allem für den Frühling und teilweise auch den Sommer in Betracht gezogen. Bei den Pumpsystemen unterscheidet man zwischen hohen und niedrigen Pumpen. Die hohen Pumpen versprühen Meerwasser über der Wasseroberfläche, sodass sie stark abkühlt und sich mit der Zeit eine Eisdecke über dem besprühten Gebiet bildet. Die niedrigen Pumpen werden eingesetzt, wenn bereits eine Eisschicht vorhanden ist. Dabei wird Meerwasser auf die Eisschicht gepumpt, sodass sie immer größer und dicker werden kann. Hierbei könnte es allerdings zu einem Problem kommen, da sich das Salz aus dem Meerwasser in dem Eis ablagern würde. Bei einem

natürlichen Gefrierprozess würde sich das Salz unter der Eisschicht binden. Könnte die Salzlake im Winter vom Eis abrinnen und ins Meer tropfen, so würde der erhöhte Salzgehalt das Wasser nochmals abkühlen und so den Abwärtsstrom begünstigen (vgl. ZHOU und FLYNN, 2005, S. 212).

Die genannten Methoden zur Umschichtung der Meeresschichtung erscheinen durchaus plausibel und wurden bereits an einigen kleinräumigen Orten getestet. Doch auch hier sind die Testversuche in einem derart kleinen Rahmen verlaufen, dass man eine 100-prozentige Prognose nicht aufstellen darf. Zudem muss man auch beachten, dass die Abwärtsströmung des kalten Wassers mit dem CO₂ wieder an einer anderen Stelle mit wärmeren Wasser an die Oberfläche gelangen wird. Auch die Intensität dieses Ausgleiches kann man nur schwer vorhersagen.

4.3.2.3 Ozeankalkung

Bei dieser Methode soll versucht werden, Kalk in Wasser zu lösen, um so das CO₂ aus der Luft aufzunehmen und zu speichern. Um den Kalk für diesen Prozess zu gewinnen, muss zunächst Kalkstein auf eine sehr hohe Temperatur erhitzt werden, bis er sich zu Kalk und Kohlendioxyd spaltet. Bei diesem Prozess wird demnach viel Energie zum Erhitzen des Steines benötigt sowie zusätzliches CO₂ aus dem Stein freigelassen. Dieses dabei entstehende CO₂ kann allerdings gespeichert oder zu Dünger weiterverarbeitet werden. Experten meinen zudem auch, dass die Menge an CO₂, welche mit Hilfe der Ozeankalkung gebunden wird, doppelt so hoch ist als jene Menge, die bei der Erhitzung entweicht (vgl. www.cquestrate.com/ [eingesehen am 26.01.2015]). Nun kann man das Kalkpulver in Wasser lösen, wo es sich an das dort befindliche CO₂ heftet und es speichert. Damit dieser Effekt eintritt, muss aber eine bestimmte Menge an Kalk in den Ozean gekippt werden. „If the calculations are correct, 1.5 km³ of limestone would be enough to sequester 1 billion tonnes of carbon dioxide. Working at the rate of 1 km³ per year, it would therefore take 750 years alone to take current levels of CO₂ in the atmosphere back to historic levels.“ (BOREL, 2008, o.A.) Diese große benötigte Menge würde eine enorme Summe an Abbau- und Transportkosten verursachen sowie extrem viel Energie verbrauchen. Neben dem Kalk kann man bei diesem Prozess auch auf Dolomit oder Magnesit zurückgreifen, auch sie können CO₂ binden und spalten sich sogar bei einer niedrigeren Temperatur – Dolomit bei 350°C, Magnesit zunächst bei 350°C und dann nochmals bei 850°C, Kalkstein bei 850°C (vgl. www.cquestrate.com/ [eingesehen am 26.01.2015]).).

Diese CDR-Methode hat allerdings noch einen weiteren positiven Effekt. „The process would also turn back the clock on ocean acidification, which is caused by excess CO₂ in the water, and poses a threat to the growth of corals and other shelled marine life.“ (BOREL, 2008, o.A.). Durch die Kalkung wird der pH-Wert gesenkt. Allerdings geschieht dies lediglich kleinräumig, da die Kalkung nur in vereinzelten Gebieten stattfindet.

4.3.2.4 Versenkung von Ernterückständen

Die sogenannte „Crop-Residue-Oceanic-Permanent-Sequestration“-Methode, bezeichnet einen Vorgang, bei dem Ernterückstände in Bündeln gesammelt und auf dem Meeresgrund versenkt werden. Man geht davon aus, dass die Bauern mehr Reste auf ihren Feldern liegen lassen, als diese für ihre natürliche Regeneration benötigen, und somit bei ihrer Zersetzung viel CO₂ an die Atmosphäre abgeben.

Um diese Versenkungen vorzunehmen, müsste man eine gute Logistik planen. Man würde Sammelstellen benötigen, an welchen die Erntereste gesammelt und gebündelt werden. Anschließend müssen diese Bündel zu einem Hafen transportiert werden, wo sie anschließend mit einem Schiff ins offene Meer ausgeschifft werden, um dort in die Tiefen des Meeres entlassen zu werden. Damit die Ballen sinken, werden sie mit Steinen beschwert (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 29).

Sind die Ballen erst einmal versenkt, tritt ein natürlicher Recyclingprozess ein. „Terrestrial photosynthesis fixes atmospheric carbon, some of which is fossil fuel-derived, into biomass, which would be sunk in the ocean and eventually buried by sedimentation, in a process analogous to that by which fossil fuels were formed eons ago. Most carbon in our biosphere lies in such deep sediments, where it has migrated.“ (STRAND und BENFORD, 2009, S. 1002)

Die Entwickler dieser Methode setzen auf ihre Zuverlässigkeit, da es in den Tiefen, wo die Biomasse versenkt wird, kaum zu Vermischungen mit der wärmeren Wasserschicht oder der Atmosphäre kommt und somit kein CO₂ aufgewirbelt und ausgesondert wird. Zudem bauen sich die Erntereste in den kalten und sauerstoffarmen Schichten nur sehr langsam ab, was schließlich die CO₂-Speicherung wieder positiv beeinflusst. Strand und Benford (2009, S. 1002ff.) haben zudem auch eine Rechnung angestellt, welche aussagen sollte, ob diese Methode überhaupt effizient genug ist. Sie sind zu dem Resultat gekommen, dass durch die marine Versenkung bis zu 92 Prozent des in den Ernteresten vorhandenen CO₂

festgehalten werden kann. Bei anderen Prozessen, wie etwa der Gewinnung von Ethanol, würden nur 32 Prozent festgesetzt werden. Das Vergraben der Erntereste im Boden würde mit 14 Prozent CO₂-Rückhaltung am schlechtesten abschneiden (vgl. STRAND und BENFORD, 2009, S. 1002ff). Experten gehen davon aus, dass mit dieser Methode 0,6-0,8Gt Kohlenstoff pro Jahr aus der Atmosphäre aufgenommen werden könnte (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 29). Dieser hohe Anteil an der CO₂-Speicherung spricht zweifelsohne für die Befürwortung dieser Methode, allerdings ist auch zu beachten, dass man über die Langzeitauswirkungen in den Tiefseeebenen nicht viel sagen kann.

4.4 Solar Radiation Management (SRM)

Die Sonnenstrahlen erreichen die Erde nach einer 149,6 Millionen Kilometer langen Reise in nur acht Minuten. Durch verschiedene Oberflächen, wie etwa Eis und Schnee, aber auch Wolken und helle Pflanzenarten, wird ein Großteil der Sonnenstrahlen wieder ins Weltall reflektiert. Ein weiterer Teil der Sonnenstrahlen wird in Wärmestrahlung umgesetzt, wovon auch ein großer Teil wieder reflektiert wird. Die Energiebilanz ist somit ausgeglichen. „Die ankommende Sonnenstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils der Sonnenstrahlung ist gleich der von der Erde in den Weltraum abgegebenen Wärmestrahlung.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 9) Allerdings kann diese Energiebilanz nun durch einige Faktoren gestört werden. Einen großen Beitrag zu dieser Veränderung liefern die Treibhausgase. Durch sie kommt es zu einer verminderten Abstrahlung der Sonneneinstrahlung, weshalb sich die Atmosphäre in weiterer Folge erwärmt.

Die Solar-Radiation-Management-Methoden versuchen nun die Sonneneinstrahlung mittels einer Vergrößerung der Albedo vermehrt zu reflektieren. „The aim of SRM methods is to produce a reduced (possibly near zero) net radiative forcing by balancing the positive forcing of greenhouse gases with a negative forcing introduced by reducing absorbed solar radiation.“ (THE ROYAL SOCIETY, 2009, S. 23) Hierfür wurden verschiedene SRM-Geoengineering-Methoden entwickelt.

„Terrestrial forms of SRM include land use changes such as increasing reflective vegetation, increasing the number of white roofs and surfaces, and desert reflectors. More

technologically involved forms of SRM include stratospheric sulfate injections, cloud brightening via tropospheric cloud seeding and space-based reflective surfaces. All forms of SRM involve intentionally manipulating our climate on a global scale.” (HARTZELL-NICHOLS, 2012, S. 143)

4.4.1 Erhöhung der Bodenalbado

Je heller ein Objekt ist, desto mehr Sonnenstrahlen kann es reflektieren. Somit wurden Methoden entwickelt, wie man die Albedo am Boden erhöhen kann. Es ist zu bedenken, dass der Großteil der Erde mit Ozeanen bedeckt ist, welche eine sehr dunkle Oberfläche aufweisen und somit wenig Sonnenstrahlen reflektieren. Umso effektiver müssen nun die Albedoreflektoren an Land sein. Doch auch hier gibt es Einschränkungen, denn nicht jeder Boden ist für Geoengineering-Methoden geeignet, da er zum Beispiel vulkanisch, mit Mooren und Sümpfen bedeckt oder nicht stabil genug ist. Die SRM-Methoden können auch zu Interessenkonflikten führen, wie zum Beispiel in der Agrar- oder Forstwirtschaft. In den folgenden Unterpunkten sollen nun Methoden zur Erhöhung der Bodenalbado vorgestellt werden.

4.4.1.1 Weiße Dächer

Man geht davon aus, dass Städte prinzipiell wärmer sind als ihre bepflanzte Umgebung, in der sich nur wenige Häuser befinden. Die Produktion von weißen Dächern, oder einfach nur das Überstreichen der Dächer mit einer weißen Farbe, stellt eine sehr günstige Methode dar. Zudem sollte dieses Verfahren vor allem in Regionen angewendet werden, die eine hohe Anzahl an Sonnentagen aufweisen. Ein Computersystem hat berechnet, dass eine weltweite Umstellung auf weiße Dächer die Temperatur in den Städten senken könnte, die Erde insgesamt aber erwärmen würde (vgl. JACOBSON et al., 2011, S. 1028). Zu diesem Effekt kommt es, da die Sonnenstrahlen gleich von den weißen Dächern reflektiert werden würde, es in weiterer Folge zu keinerlei Verdampfung kommen könnte und somit zu keiner aufsteigenden Feuchtigkeit, die es zur Wolkenbildung benötigen würde. In Folge dessen würden aufgrund der verminderten Wolkenbildung mehr Sonnenstrahlen den Erdboden erreichen. Somit ergibt sich, dass die Verwendung von weißen Dächern als Geoengineering-Methode wohl eher kaum zu einer Minderung der globalen Erwärmung

führen würde. Andere Experten, wie etwa in The Royal Society (2009, S. 25), vertreten allerdings die Ansicht, dass eine Weißelung der Dächer, Straßen und anderen Verkehrsflächen sehr wohl eine globale Abkühlung schaffen könnte, diese aber sehr gering ausfallen würde.

4.4.1.2 Bio-Geoengineering

Bei dieser Methode sollen auf Feldern Pflanzen kultiviert werden, die eine besonders hohe Albedo haben und somit viel Sonnenstrahlen reflektieren können. Dabei müssten geeignete Albedopflanzen und Nutzpflanzen nicht einmal in Konkurrenz zueinander stehen. Es könnten solche Nutzpflanzen vermehrt angebaut werden, die von Natur aus eine hohe Albedo aufweisen. Eine weitere Möglichkeit, Nutzpflanzen mit einer geringeren Albedo dennoch zu nutzen, wäre eine gentechnische Manipulation. Studien fanden heraus, dass eine flächenhafte Nutzung von Nutzpflanzen mit einer hohen Albedo, die Sommertemperaturen in Europa und Nordamerika um 1°C senken könnte (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S. 25).

„In addition to crop plantations, the development of the livestock sector also changes land surface albedo, for example: Since the late 1970s, the impact of over-grazing and trampling reindeer has caused the gradual decrease of lichen cover in Fennoscandia and West Siberia, which results in an increase in coniferous forest and a decrease in land surface albedo. So the management of livestock can also be considered as a potential biogeoengineering.“ (ZHANG et al., 2014, S. 4) Dieses angeführte Beispiel beweist demnach, dass man die Albedo der Landschaften soweit beeinflussen kann, dass man mit ihr die Temperatur der Erde regulieren könnte.

4.4.1.3 Wüstenreflektoren

Die Wüste bietet eine immens große Fläche an, die zur Sonnenreflexion genutzt werden könnte. Dabei sind vor allem zwei Geoengineering-Methoden vorreitend: Die erste Methode wäre es, die Wüstenflächen zu bepflanzen. Ornstein et al. (2009, S. 410f.) sehen hierfür vor allem die Wüstenregion in Australien sowie die Sahara vor. Damit die Erfolge schnell sichtbar werden, sollen an diesen Orten schnell wachsende Pflanzen, wie etwa Eukalyptus, kultiviert werden. Damit die Pflanzen in dieser trockenen Region auch

genügend Wasser bekommen, schlagen Ornstein et al. (2009, S. 411f.) ein hocheffizientes Bewässerungssystem vor. Dieses System soll lediglich die Feuchtigkeit in der Atmosphäre ersetzen, dadurch kann die Pflanze genug Wasser aufnehmen. Somit entsteht kein Verlust durch einen Oberflächenabfluss oder ein zu schnelles Versickern durch die Wurzelzone (vgl. ORNSTEIN et al., 2009, S. 412). Allerdings muss man beachten, dass diese Bepflanzung ein immenser Eingriff in das jeweilige Ökosystem ist und zudem auch hoher Aufwand an bautechnischem Know-how und ein großes Budget gegeben sein müssen. Zudem kommt der Wasserverbrauch in einer Region, in der dieses Gut nur sehr rar vorkommt.

Eine weitere Methode, die Wüste als Sonnenreflektor zu nützen, ist Rückstrahler aufzustellen. Dabei könnte in den Wüstenregionen eine Fläche von bis zu 11,6 Millionen km² genutzt werden. (vgl. ZHANG et al., 2014, S. 5). Bei dieser Rückstrahlmethode kann man zwischen zwei Anwendungssystemen unterscheiden: Zum einen kann man den Wüstenboden mit einer reflektierenden Polyethylen-Aluminium-Oberfläche abdecken. Dabei muss allerdings darauf geachtet werden, dass diese Flächen nahezu unverstaubt bleiben, was in einer Wüste zu einem unlösbaren Problem werden würde. Zudem ist der Sand in den Wüsten sehr grob und würde die Folie mit der Zeit zerkratzen, sodass sie nicht mehr optimal genutzt werden kann. Zum anderen können Solarparks errichtet werden, wie man sie bereits heute kennt. Hierfür werden Photovoltaikanlagen großflächig aufgestellt und zur Stromnutzung verwendet. Auch diese Flächen müssen natürlich sauber bleiben, durch technische Innovationen lassen sich die meisten Photovoltaikzellen drehen und somit kann der gröbste Schmutz herunterrieseln. Die Photovoltaikanlagen zählen allerdings nicht zu den Geoengineering-Maßnahmen, dennoch können sie einen großen Teil der Sonnenstrahlen reflektieren und fördern zugleich eine saubere Energie, was den Verbrauch fossiler Brennstoffe mindert und somit auch die CO₂-Emissionen (vgl. ZHANG et al., 2014, S. 4f.).

4.4.2 Erhöhung der Wasseroberflächenalbedo

Im Zuge der Überlegungen zu Geoengineering-Methoden kam der Gedanke auf, die weiten Flächen der Ozeane mit Reflektoren auszustatten. Die Reflektoren müssten aber über eine geraume Fläche zusammenhängen und fest im Meeresgrund verankert sein. Dies bringt einige Nachteile mit sich, wie etwa verringerte Sonneneinstrahlung auf die

Wasseroberfläche. Zudem müssen die Reflektoren, ähnlich wie jene der Wüste, von Schmutz und Bewuchs freigehalten werden, damit sie einwandfrei funktionieren können. Hierfür könnten verschiedene Chemikalien verwendet werden, was sich allerdings äußerst ungünstig auf die Wasserwelt auswirken könnte, wenn diese Chemikalien ins Wasser gelangen (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 13). Da diese Geoengineering-Methode äußerst aggressiv und umweltschädigend erscheint, sollte sie nicht als Option in Erwägung gezogen werden.

4.4.3 Atmosphärisches Geoengineering

Die Methoden des atmosphärischen Geoengineerings finden in verschiedenen Höhenlagen der Atmosphäre statt. Dabei werden unterschiedliche Substanzen in der Luft versprüht oder verteilt, die das Sonnenlicht reflektieren sollen. Diese Substanzen, wie etwa Salzaerosole oder Schwefel, können die Sonnenstrahlen zwar reflektieren, gelangen sie allerdings zurück auf den Boden, können sie in einer großen Zahl umweltschädlich wirken. Die einzelnen atmosphärischen Geoengineering-Methoden sollen nun im Einzelnen vorgestellt werden.

4.4.3.1 Marine Wolkenaufhellung

Die marine Wolkenaufhellung, oder auch marine cloud brightening (MCB), ist eine Methode, bei der Meersalzaerosole in ausgesuchte Wolken gesprüht werden, um somit die Tröpfchenkonzentration in den Wolken zu steigern. Die versprühten Partikel dürfen allerdings nicht zu groß sein, da sie sonst Regen auslösen könnten. Durch die Tröpfchen könnten die Wolken über ihr natürliches Ausmaß hinauswachsen und somit eine größere Albedo ausbilden (vgl. NEUKERMANS et al., 2014, S. 159). Das dafür benötigte Salz beziehungsweise das Salzwasser sollten keinen langen Transportweg zurücklegen müssen. In Abbildung 16 wird eine Art Schiff gezeigt, welches das Salzwasser in die Luft versprüht. Die Trichter, welche auf dem Floß befestigt sind, könnten Pumpen sein, welche die Meersalzaerosole Meter bis Kilometer hoch in den Himmel versprühen können. Die Versprühung geschieht nur nach



Abbildung 5: Marine Wolkenaufhellung
(Quelle: The Royal Society, 2012, S.4243)

bestimmten Berechnungen, wobei die Windeigenschaften und die Eigenschaften der Wolken überprüft und für tauglich befunden werden müssen, sodass der Wind die Partikel bis in die ausgewählten Wolken hochtransportieren kann, damit sie sich dort festsetzen können (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2012, S. 4243). Wie man an der Abbildung weiters erkennen kann, ist das Floß mit einem Antrieb ausgestattet, dem sogenannten Flettner-Propeller, der eine Innovation in der Schifffahrt darstellt. „A Flettner rotor (named after its inventor, Anton Flettner) is a vertically mounted cylinder that may be rotated about its axis by an external power supply. When air flows past it, the cylinder rotation creates a force (the Magnus force) at right angles to the air flow that propels the vessel on which the cylinder is mounted. The rotor thus plays the same role as the sails on a yacht but the thrust levels attainable are far greater than for a sail of the same area; moreover, the control of such vessels is very much simpler (without the complex rigging of a sail and with far superior manoeuvrability).“ (THE ROYAL SOCIETY, 2012, S. 4242) Durch den Flettner-Rotor kann man das Floß nun auch unbemannt manövrieren und spart somit hohe Kosten ein.

Die MCB-Methode könnte relativ rasch zu einer Abkühlung der Atmosphäre führen, allerdings kann man nicht alle Parameter steuern, die man für die MCB benötigen würde, wie etwa die idealen Wind- und Wolkeneigenschaften.

Bislang wurde 53 Experimente mit meersalzsprühenden Düsen vollzogen. Viele von ihnen misslangen allerdings, da es zu Leckagen kam, die Temperatur nicht richtig gesteuert werden konnte oder die Tröpfchen nicht richtig ausgesondert werden konnten. Somit wurde die MCB-Methode bislang als unwirksam deklariert (vgl. NEUKERMANS et al., 2014, S. 165ff.).

4.4.3.2 Sulfatinjektionen

Die Idee Sulfate, also Salze oder Ester der Schwefelsäure, in die Atmosphäre zu injizieren, ist ein Resultat aus den Folgen des Vulkanausbruchs auf den Philippinen. Als der Pinatubo 1991 ausbrach, katapultierte er tonnenweise Gestein, Asche sowie Schwefelpartikel in die Atmosphäre. „Die Asche und die Rußpartikel des Vulkans gelangten bis in die zweitunterste Schicht der Atmosphäre, die so genannte Stratosphäre. Die Aschewolke des Pinatubo ließ die Menge der Aerosole in der Stratosphäre zeitweise um den Faktor 20 ansteigen. Da Aerosole – also mikroskopisch kleine, feste Partikel in der Luft – das Sonnenlicht teilweise absorbieren, kühlte sich die Erde nach dem Ausbruch des Pinatubo

für etwas mehr als ein Jahr um ein halbes Grad ab. Die Staubpartikel des Pinatubo dezimierten außerdem das Gas Ozon in der Stratosphäre, das dort schädliche ultraviolette Strahlung abfängt.“ (KEHSE, 2011, oA.)

Man geht davon aus, dass man die globale Erwärmung mittels dieser Geoengineering-Methode stoppen könnte. „The amount of cooling depends on the amount of aerosols and how long the aerosol cloud is maintained in the stratosphere.“ (ROBOCK et al., 2009, S. 2) Um diesen Effekt mittels Geoengineering-Methoden nachzustellen, wurden drei Verfahren entwickelt sowie eine als Zukunftsvision deklariert, welche von Robock et al. (2009, S.4ff) beschrieben werden:

a) Ballone

Da man die Schwefelaerosole in der Stratosphäre, sprich in mindestens 20 km Höhe, platzieren muss, benötigt man hierfür ausgeklügelte Systeme. Man hat überlegt, dass man Wetterballone für diesen Zweck umrüsten könnte, da sie ohnehin in sehr hohe Höhen der Atmosphäre aufsteigen können. Robock et al. (2009, S. 5) würden hierfür Ballons vorschlagen, die aus Plastik gefertigt sind, da Gummiballons in kalten Temperaturen zerbersten würden. Zudem sollten sie auch mit Wasserstoff anstatt des üblichen Heliums befüllt werden, da dies günstiger und sicherer sei. Nun gilt es die Frage zu klären, wie die Schwefelaerosole in dem Ballon transportiert werden sollen. Eine Befüllung des Ballons scheidet aus, da die aufnehmbare Menge viel zu gering wäre, um damit einen Effekt zu erzielen. Es gibt die Idee, dass der Ballon an einer kilometerlangen Pipeline angeschlossen wäre, deren Station sich am Erdboden befindet und die Schwefelaerosole nach oben pumpt. In Abbildung 17 kann man ein solches Modell erkennen. Zugleich erkennt man an der Abbildung auch, dass trotz der Versprühung der Aerosole noch Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche und die Wolken gelangen, sodass zum Beispiel die Regenbildung nicht drastisch beeinflusst wird. Die Bepumpung des Ballons mit Schwefelpartikeln muss nicht unbedingt aus einem Schiff geschehen, dies kann auch auf einer Basis an Land passieren.

Es gibt zu dieser Geoengineering-Methode bislang keine Experimente, da sie sehr teuer und bauaufwändig wären. Sicher ist allerdings, dass die Schwefelinjektionen über einen langen Zeitraum hinweg durchgeführt werden müssten, um einen merklichen Effekt zu erzielen.

b) Flugzeuge

Normale Passagierflugzeuge erreichen eine maximale Flughöhe um die 10 Kilometer. Diese Höhe ist allerdings zur Anbringung der Aerosole viel zu gering. Verschiedene militärische Flieger hingegen schaffen mühelos eine Höhe von 20 Kilometern und mehr. Die Schwefelpartikel würden mit dem Kerosin vermischt und anschließend mit den Abgasen ausgesondert werden. Allerdings könnte es bei den Fliegern an der Transportmöglichkeit der Sulfate scheitern, da sie nur limitiert beladen werden können (vgl. ROBOCK et al., 2009, S. 4f.). Robock et al. (2009, S. 5) nennen hierfür zwei Lösungsvorschläge: Zum einen könnte ein Tankflugzeug den militärischen Flieger

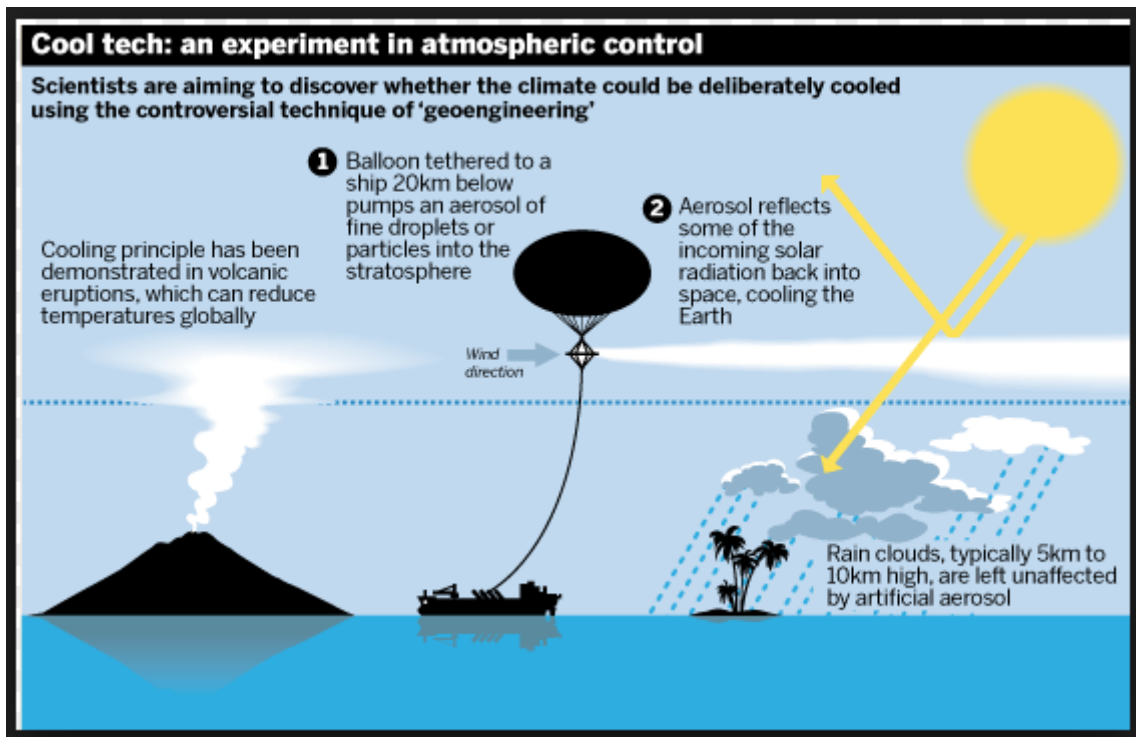


Abbildung 17: Ballon mit Schwefelaerosolen (Quelle: COOKSON, 2011, o.A.)

begleiten, der ihm immer wieder Schwefelpartikel eintanken kann. Zum anderen könnte ein militärischer Tanker direkt bis in die Troposphäre steigen und die Sulfid-Partikel mittels eines Schlauches entlassen.

Allerdings kann es auch bei dieser Methode zu Komplikationen kommen. Nach dem Vulkanausbruch des Pinatubo flogen zwei Flugzeuge durch seine Aschewolke. Dabei konnten sich Ruß- und Schwefelpartikel in den Turbinen absetzen und verklebten diese so, dass sie ausfielen. Erst nach einer längeren Abkühlungszeit, was mit einem unfreiwilligen Sinkflug einherging, härteten die Partikel aus und wurden aus den Turbinen

hinausgeblasen. Die Flugzeuge konnten sicher landen. Diese Gefahr besteht für nachkommende Flieger nicht, da die Schwefelflieger keine Asche in die Stratosphäre sprühen. Doch der Schwefel kann Verätzungen auslösen, was die Fenster und andere Teile des Fliegers verätzen und trüben würde (vgl. ROBOCK et al., 2009, S. 5). Hierzu müssen noch verschiedene Tests und Studien durchgeführt werden.

c) Abschussrampen

Eine weitere Methode, die Robock et al. (2009, S.5) vorstellen, sind militärische Abschussrampen, die normalerweise zur Verteidigung oder als Flugabfanggeräte dienen. Sie könnten die Schwefelaerosole mit Kanonen in die Stratosphäre schicken und dort auf den Punkt genau explodieren lassen. Allerdings erscheint diese Methode eher ineffizient, da man äußerst viele solcher Kanonen und Raketen benötigen würde und diese auch nicht von überall einsetzbar wären.

d) Zukunftsvision: Turm

Bei dieser Methode soll ein Turm mit einer Höhe von etwa 114 Kilometern errichtet werden. In seiner Mitte soll anschließend ein Schlauch verlaufen, welcher das SO_2 an die Spitze des Turmes pumpt, wo es anschließend versprüht wird. Der Turm soll zudem am Äquator stehen, da dort die Troposphäre früher aufhört und die Stratosphäre somit leichter erreichbar wäre. Zudem gibt es in dieser Region auch keine Hurrikans, welche den Turm treffen könnten. Dennoch kann der Turm in einer gewissen Höhe einfrieren, was besonders schlecht für den Transportschlauch wäre (vgl. ROBOCK et al., 2009, S. 6f.). Ein Entwurf eines solchen Turmes ist in Abbildung 18 zu erkennen.

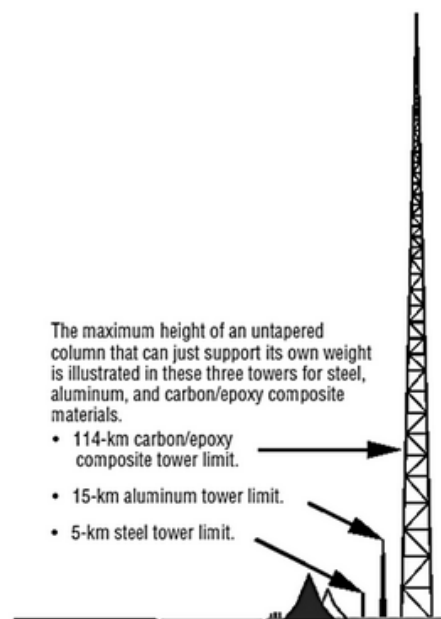


Abbildung 18: Turm zur SO_2 -Versprühung
(Quelle: ROBOCK et al., 2009, S. 5)

Zwar gibt es noch keine veröffentlichten Studien über Experimente zu den drei Hauptverfahren der Schwefelinjektion, dennoch wäre eine Durchführung sowohl finanziell

als auch aus technischer Sicht durchaus vorstellbar.

Neben den Salzaerosolen und dem SO₂ gibt es noch weitere Substanzen und Chemikalien, bei denen in Betracht gezogen wird, dass man sie einsetzt, da sie ebenfalls eine erhöhte Rückstrahlwirkung aufweisen. Eine davon wären zum Beispiel Aluminiumpartikel oder Aluminiumschnipsel, die durch Passagierflugzeuge in der Troposphäre verteilt werden könnten. Doch auch diese Methode hätte große Nebenwirkungen auf die Mensch-, Tier- und Pflanzenwelt.

4.4.4 Geoengineering-Methoden im Weltall

Ähnlich wie beim atmosphärischen Geoengineering werden die Methoden hierfür auf unterschiedlichen Höhen beziehungsweise Distanzen zur Erde geplant. Das Ziel ist es, mittels Weltalltechniken zwar einen Großteil der Sonnenstrahlen zu reflektieren, aber dennoch eine ausreichende Sonneneinstrahlungsversorgung auf der Erde zu garantieren. Die zu den Weltall-Geoengineering-Methoden gehörende Varianten sollen nun im Folgenden näher erklärt werden.

4.4.4.1 Erdnahe Reflektoren

Die sogenannten LEOs oder auch „Low Earth Objects“ befinden sich, wie der Name bereits vermuten lässt, von allen Weltall-Geoengineering-Methoden am nächsten zur Erde. Diese Nähe zur Erde würde für die Methode sprechen, da sie leicht zu installieren wäre. Allerdings sind die LEOs wiederum so erdnah, dass sie einen starken Schatten auf die Erde werfen würden, den man auch wahrnehmen könnte (vgl. KENNEDY et al., 2013, S. 229). Dies könnte sich auf den Biorhythmus von Tieren und Pflanzen auswirken. Zudem wären die LEOs auf ihren Positionen im Orbit fixiert, das bedeutet, dass sie in der Nacht komplett nutzlos wären, was die Kosten-Nutzen-Abwägung sehr stark beeinflussen dürfte. Der größte Nachteil der LEOs ist allerdings ihre Nähe zu den erdnahen Satelliten, sie könnten leicht kollidieren. Zudem können die LEOs auch von Weltraumschrott getroffen werden und in dessen Folge zu noch mehr Weltraumschrott beitragen. Kontinuierliche Reparaturen wären somit vorprogrammiert (vgl. KENNEDY et al., 2013, S. 229).

4.4.4.2 Solar Sails

Die Solar Sails würden sich bereits etwas weiter von der Erde entfernt befinden. Je nach ihrer Größe kann die Distanz bis zu einigen hundert oder gar tausend Kilometern betragen. Diese Methode hat einen entscheidenden Vorteil gegenüber den LEOs. Nicht nur, dass sie vor Kollisionen mit Satelliten oder Weltraumschrott sicher ist, die Solar Sails stehen auf keinem fixen Punkt. Sie werden natürlich über Photonen angetrieben. „When light hits an object, the photon imparts some of its momentum to that object, like one billiard ball hitting another. The momentum of a photon is very, very small. But in space, without air and wind and in situations where the pull of gravity from Earth or Sun is also small, the tiny push [...] from sunlight, multiplied by area and/or time, can be a significant factor in making a spacecraft move.“ (KENNEDY et al., 2013, S. 229)

Japanische Forscher haben bereits ein Solar Sail, das auf den Namen Ikarus getauft wurde,

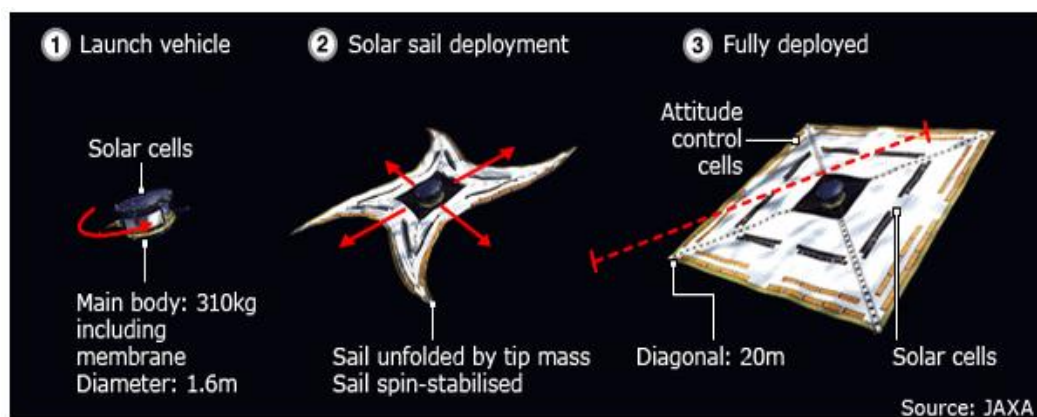


Abbildung 6: Solar Sail Ikarus (Quelle: <http://www.bbc.co.uk/blogs/legacy/thereporters/jonathanamos/2010/05/heres-the-shipping-forecast-fo.shtml> [eingesehen am 15.01.2015])

entwickelt, welches für astronomische Zwecke und Forschungen genutzt werden sollte. In Abbildung 19 kann man den Mechanismus dieses Solar Sails erkennen. Das Segel würde mit Hilfe einer Rakete ins Weltall geschossen werden, wo es sich selbstständig entfalten würde. Dieses Sonnensegel ist allerdings mit seiner Spannweite von 20 Metern wesentlich kleiner als jene, die man als SRM-Methode anwenden würde.

4.4.4.3 Dyson Dots

Die Dyson Dots sind jene Methode, welche sich am weitesten weg von der Erde befindet. Es handelt sich um eine Konstruktion, die sechs Mal kleiner als der Mond und vier Mal weiter von der Erde entfernt wäre. Der Dyson Dot hätte eine Größe von rund 700.000 km² und würde sich am sogenannten „Sun-Earth Lagranigan-1 Point“, kurz auch SEL 1

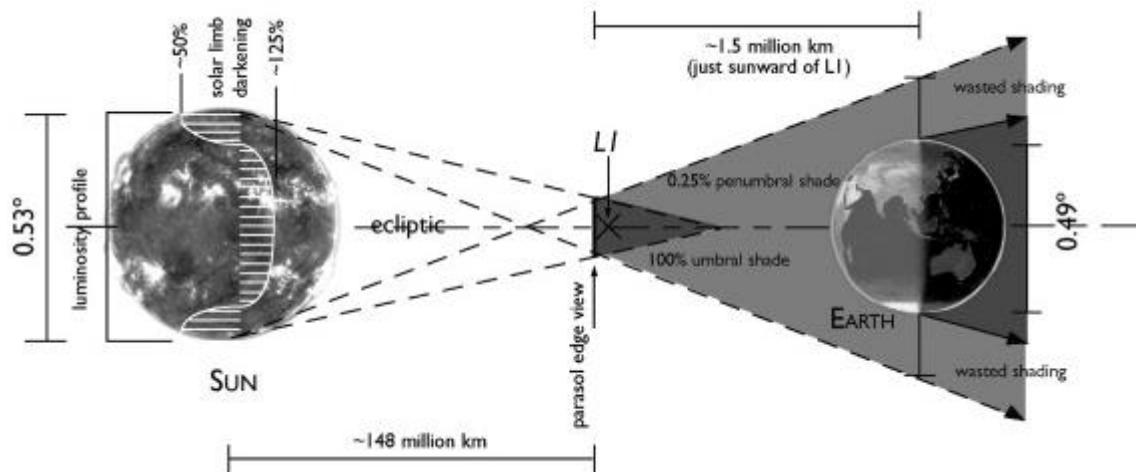


Abbildung 20: Dyson Dot (Quelle: KENNEDY et al., 2013, S. 228)

genannt, befinden. Der SEL-1-Punkt wurde aus einem entscheidenden Grund gewählt: Nur an dieser Stelle herrscht ein Gleichgewicht zwischen der Erd- und der Sonnenanziehungskraft (vgl. KENNEDY et al., 2013, S. 227). In Abbildung 20 kann man einen Dyson Dot erkennen. Der Abbildung kann man ebenfalls entnehmen, dass der SEL-1-Punkt wesentlich näher zur Erde ist als zur Sonne, das liegt an der geringeren Masse und somit der geringeren Anziehungskraft der Erde. Weiters sieht man, dass der Dyson Dot aufgrund seiner immensen Entfernung keinen völligen Schatten auf die Erde werfen würde. Es würde genügend Sonnenlicht auf die Erde treffen, sodass ein normaler Zyklus im Ökosystem fortbestehen könnte. Dennoch wäre der Schatten so effektiv, „it would reduce insolation on Earth by at least one-quarter of a percent (0.25%), same as that which caused the 1.8 °C cooling during the “Little Ice Age” (~1550–1850 AD).“ (KENNEDY et al., 2013, S. 226f.) Würde man seine Fläche nochmals vergrößern, könnte der Dyson Dot für eine noch höhere Abkühlung sorgen.

Da sich die Erde um die Sonne dreht und der Dyson Dot seine eigene Umlaufbahn hätte, auf der er sich bewegen würde, würde der Dot immer zwischen der Erde und der Sonne stehen und somit einen konstanten Schatten werfen. Der Dyson Dot könnte sich zudem selbst erhalten, indem er die Sonnenstrahlen, die auf ihn

treffen, in Energie umwandelt und dadurch seine Computer versorgt. Die Vision der Wissenschaftler ist nicht nur die selbsterhaltende Möglichkeit der Dyson Dots, sondern auch die Möglichkeit der Speicherung von Sonnenenergie und deren Abtransport auf die Erde. Sie gehen davon aus, dass dies eine weltweite Versorgung mit Elektrizität ermöglichen könnte, selbst wenn ein großer Teil an Energie auf dem Weg verloren gehen würde. Die Sonnenenergie könnte direkt am Dyson Dot umgewandelt werden und in Form von Mikrowellen über einen sogenannten Maser zur Erde gebeamt werden (vgl. KENNEDY et al., 2013, S. 232).

4.5 Auswirkungen der Geoengineering-Methoden auf das Leben und die Umwelt

4.5.1 Die CCS-Methode

Die Carbon-Capture-and-Storage-Methode kann eine hohe unterirdische Speicherung von CO₂ erreichen, allerdings könnte dieses Vorhaben fatale Folgen für den Menschen und die Umwelt haben. Das CO₂-Gas ist in einer gewissen Konzentration für den Menschen ungefährlich, würde sich aber einer der CO₂-Speicher plötzlich entleeren, könnte dies für umliegenden Siedlungen sehr gefährlich werden. Dieser Gefahr ist man sich spätestens seit dem Unglück in Afrika am Nyos See, 1986, bewusst. „1746 Menschen und mehr als 2000 Tiere starben innerhalb kürzester Zeit. Der nahe gelegene Nyos-See hatte eine Wolke von geschätzten 1,7 Millionen Tonnen Kohlendioxid ausgespuckt, die sich, da schwerer als Luft, am Boden entlang in bis zu 20 Kilometer entfernte Dörfer wälzte. Die Bewohner hatten keine Chance: Sie wurden bewusstlos und starben.“ (www.spiegel.de, eingesehen am 15.01.2015) Beachtet man die Menge an freigesetztem CO₂, so erkennt man, dass zu den Pilotprojekten in Kanada, Algerien und Norwegen mit etwa 1 Million Tonnen an gespeichertem CO₂ kaum ein Unterschied besteht. Die Pilotprojekte verwenden im Moment eher kleinere Speicher, für die Umsetzung der CCS-Methode werden weit größere benötigt. Es ist also auf alle Fälle darauf zu achten, dass die Speicher in einer ruhigeren Erdschicht liegen, wo es kaum zu schwereren Erdstößen kommt, und dass sie vor allem sehr weit weg von jeglicher Zivilisation geplant werden.

Auch bereits kleine Risse in den Speichern können dazu führen, dass CO₂ ausweichen kann, was sich vor allem negativ auf das Wurzelwerk der Pflanzen auswirken und in weiterer Folge zu einem Absterben der Pflanzen führen würde. Doch nicht nur die Pflanzen hätten unter dem austretenden CO₂ zu leiden. „Austretendes CO₂ senkt nicht nur den pH-Wert des Grund-, Kapillar- und Sickerwassers, sondern kann auch geochemische Prozesse und Reaktionen auslösen (z.B. Freisetzung von Calcium aus Kalkstein; Mobilisierung von Schwermetallen; Bodenversauerung). Die Folgen sind toxische Wirkungen auf Bodenorganismen und Pflanzen, deren Auftreten jedoch eher lokal und kleinräumig zu erwarten ist.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2009b, S. 3)

Ein weiteres umweltschädliches Problem könnten die Folgen des Transports des CO₂ in die

Speicher darstellen. Das CO₂ würde mit einem massiven Druck, vermutlich durch ein Pumpsystem, in den Speicher gedrückt werden. Durch diesen Druck kann allerdings Wasser, das sich noch in den Speichern befindet, von dem Gas nach außen gedrückt werden. Dies kann einerseits zu Rissen im Speicher führen, durch welche CO₂ austreten könnte. Zum anderen kann das verdrängte Wasser auch der Umwelt schaden, vor allem, wenn es sich um Salzwasser handeln würde. Würde dieses salzhaltige Wasser bis ins Grundwasser hinabdriften, könnte es unter der Erde zu Versalzungen kommen, die zum Teil auch oberirdisch durch Wasseraustritt kommen. Das Salz würde die Böden angreifen und diese unfruchtbar machen. Viele Pflanzen, Kleinstorganismen und Bodeninsekten könnten an der Versalzung sterben (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2009b, S. 3). Um die Planungen der CCS-Methode zu verwirklichen, müssten im Vorfeld viele Untersuchungen und Messungen sowie Prognosen erstellt werden, welche das Risiko dieser Umweltfolgen minimieren würden.

4.5.2 Künstliche Bäume

Da diese Filteranlagen ähnliche unterirdische Speicher wie die CCS-Methode verwenden würden, bestehen hier dieselben Gefahren wie in Punkt 4.5.1 angeführt. Da die Speicherräume allerdings in der Nähe der Filteranlagen sein sollen, um unter anderem den Transportweg zu minimieren, kommen hierfür tendenziell eher künstlich angelegte Speicher in Frage. Da die künstlichen Bäume vor allem in Gegenden mit einer hohen CO₂-Belastung aufgestellt werden sollen, wie etwa bei stark befahrenen Straßen oder gar in Städten, müssen diese Speicher mit einer 100-prozentigen Sicherheit dicht bleiben, um eine Katastrophe zu verhindern. Auch die Verwendung der Filteranlagen auf den Meeresflächen könnte durch die Speicherung des CO₂ im Meeresboden zu dramatischen Folgen führen, falls Risse im Speicher entstehen. Das austretende CO₂ könnte das Wasser versauern und damit vielen Meeresbewohnern schaden. Zusätzlich kommt hier auch noch eine mögliche Lärmbelästigung durch die Filteranlagen hinzu. Diese Lärmbelästigung könnte die Lebenswelt der Tiere stark beeinträchtigen und diese zum Fortwandern zwingen.

4.5.3 Methoden mit Biokohle und Biomasse

Biokohle und Biomasse sind natürlich vorkommende Größen, allerdings sind beide nur in begrenzten Mengen vorhanden. Um die Biomasse und die Produktion von Biokohle steigern zu können, könnten zu diesem Zweck mehr Pflanzen angebaut werden. Allerdings würden diese Pflanzen ausschließlich diesem Zweck dienen und könnten nicht für die Nahrungsmittelproduktion verwendet werden. Dies könnte zu einem starken Konflikt führen. Da nicht alle Pflanzen zu einem hohen Biomassenertrag führen würden, könnte es zu Monolandwirtschaften kommen, welche das Land auslaugen und so unfruchtbar machen. Dies würde sich im Endeffekt auf den Menschen auswirken, da seine Anbauflächen immer mehr zurückgedrängt werden würden.

4.5.4 Aufforstung und Wiederbewaldung

Prinzipiell sind dieser Methode nur positive Auswirkungen auf die Umwelt und die Lebenswelt der Tiere, Insekten und auch der Menschen zuzuschreiben. Die Vergrößerung der Waldflächen führt nicht nur zu einem vermehrten Abbau der CO₂-Gase in der Atmosphäre, sondern sie bietet auch vielen Tieren ein neues Heim. Allerdings benötigt eine Aufforstung beziehungsweise Wiederbewaldung sehr viel Platz. Oft werden hierfür Ackerländer oder Weideland zu Gunsten dieser Projekte umgeformt.

4.5.5 Verwitterungsprozesse

Die Methoden der Verwitterungsprozesse nutzen beinahe ausschließlich natürlich vorkommende Ressourcen und produzieren auch natürliche Produkte, die bereits in der selben Form seit tausenden Jahren in den Böden und Ozeanen existieren. Somit ist auf eine natürliche Verträglichkeit zu schließen. Dennoch kann diese extensive Nutzung nun einige negative Folgen haben, wie etwa die Versauerung der Ozeane. Durch die Arbeit mit hochkonzentriertem Magnesium und Calcium kann es zu einer Erhöhung der Alkanität in den Meeren kommen (vgl. THE ROYAL SOCIETY, 2009, S. 14). Dies könnte sich negativ auf das sensible Ökosystem der Unterwasserwelt auswirken.

Auch die Bergbau- und Transportaktivitäten könnten einen großen lokalen Schaden anrichten. Zudem benötigt man für einige Methoden viel Wasser und viel Energie, was

wiederum die CO₂-Emissionen in die Höhe treiben würde. Das benötigte Wasser könnte in einigen Regionen zu einem Konfliktpunkt werden, vor allem in jenen, wo Trinkwasser bereits heute nur sehr eingeschränkt verfügbar ist.

4.5.6 Ozeandüngung

Die bisher durchgeführten Experimente der Ozeandüngung bezogen sich auf einen sehr kleinen Raum, meistens unter 300km², und wurden nur über einen kurzen Zeitraum, von etwa unter 40 Tagen, durchgeführt (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 25). Somit kann man nur sehr wenig über die Wechselwirkungen und Auswirkungen der Düngung auf die Umwelt erschließen. Klar ist allerdings, dass das Planktonwachstum gefördert wird. Dieses ist wiederum das Grundnahrungsmittel für etliche



Abbildung 7: Algenblüte vor der Küste Irlands. (Quelle: Alfred Wegener Institut (ESA) In: UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 26)

Meeresbewohner, welche durch die plötzliche hohe Konzentration an Plankton von ihren ursprünglichen Wanderungsrouten abkommen könnten, um dort zu fressen. Bleibt das Plankton über einen langen Zeitraum an diesem Ort vorhanden, können die angesiedelten Meerestiere nun auch andere, wie etwa Fressfeinde, anlocken und somit die indigene Lebenswelt vertreiben oder massiv stören.

Durch das vermehrte Aufkommen von Plankton können sich ganze Algenteppiche, wie in Abbildung 21 vor der Küste Irlands zu sehen, bilden. Es gibt einige Algenarten, die toxische Stoffe ausstoßen, welche von den Meerestieren aufgenommen werden und sie krank machen können. Dies kann sich auch auf den Menschen auswirken, wenn er vergiftete Meerestiere isst.

Auch das Absinken des Planktons auf den Meeresboden kann zu erheblichen Folgen führen. Die massive Ablagerung von Plankton am Meeresgrund bildet eine sauerstoffundurchlässige Schicht, welche in weiterer Folge zu einem Massenaussterben der

Kleinorganismen und Pflanzen dieses Gebietes führen kann (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 26). Durch den vorherrschenden Sauerstoffmangel und die Zersetzung der toten Meeresgrundorganismen kommt es zur Ausbildung von Methangasen, welche sich im Untergrund sammeln können und durch kleine Erdstöße freigesetzt werden. Dies würde sich kontraproduktiv auf die CO₂-Verringerung auswirken. (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 26)

4.5.7 Veränderung der marinen Schichtung

Die Veränderung der marinen Schichtung ist ein riesiger Eingriff in die Natur. Sollten die Meeresströmungen tatsächlich beeinflusst oder gar geändert werden können, wird sich das mit großer Sicherheit auf alle Bereiche des Lebens auswirken. Durch die künstliche Produktion von kalten Wasserschichten, die in die Tiefe der Meere absinken, kann es zu einer allgemeinen Abkühlung der Ozeane kommen. Dies würde sich wiederum auf das Klima und folglich den Lebensbereich der Menschen auswirken. Auch die temperaturempfindliche Meereswelt könnte unter einem solchen massiven Eingriff stark leiden. Einige Meereslebewesen, vor allem Korallen, können bei einem minimalen Temperaturan- oder -abstieg bereits verenden.

4.5.8 Ozeankalkung

Die Ozeankalkung scheint auf den ersten Blick keine negativen Auswirkungen auf den Menschen, die Umwelt oder die Tierwelt zu haben, zudem sie noch als Lösung zur Entsäuerung der Ozeane angepriesen wird. In Wirklichkeit wird beim Erhitzen des Kalksteins immens viel CO₂ an die Atmosphäre abgegeben. Dieses sich nun in der Atmosphäre befindliche CO₂ verstärkt die globale Erwärmung, die sich wiederum auf die Menschheit und Umwelt auswirkt. Zudem werden beim Abbau auch schwere Maschinen verwendet, die mit ihren Abgasen ebenfalls die Umwelt stark belasten. Zuletzt bleibt die Anpreisung der Neutralisierung der Meere zu kritisieren. Die Auffüllung der Meere mit Kalk kann zu einer Trübung des Gewässers führen. Viele Pflanzen, darunter auch Kleinorganismen wie etwa das Plankton, könnten sich nicht mehr vermehren und würden ohne genügend Sonnenlicht entweder abwandern oder sterben. Durch das Absterben des Planktons und der Algen in einer Region kann es nur noch zu einer verminderten Aufnahme

von atmosphärischem CO₂ kommen (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 28). Somit sollte der Einsatz dieser Geoengineering-Methode nochmals gründlich überdacht werden.

4.5.9 Versenkung von Ernterückständen

Diese Methode trägt eine sehr hohe Gefahr der Umweltschädigung mit sich. Viele Getreidearten sowie Mais werden mit verschiedenen Düngemitteln und Pestiziden, wie etwa dem gesundheitsschädlichen Glyphosat, angereichert. Diese Besorgnis gilt vor allem den Ernterückständen in den USA, denn sie verwenden oft genmanipulierte Pflanzen, welche gegen bestimmte Pestizide resistent sind. Somit können die Bauern massenhaft Pestizide verwenden, ohne dabei ihrer eigenen Aussaat Schaden zuzufügen. Die versenkten Ernteballen würden diese Giftstoffe an ihre Umgebung abgeben und könnten so den Meeresbewohnern immens schaden. Eine weitere Gefahr besteht in der Loslösung der Ballen vom Meeresgrund, welche zum Beispiel durch Seebeben oder eine ungeplante frühe Zersetzung der Netze hervorgerufen werden könnte. Die Ballen würden an die Wasseroberfläche aufsteigen und dort die Gase ihres Zersetzungsprozesses freilassen. Auch eventuell bereits unter den Ballen entstandene CO₂- oder Methanblasen könnten so wiederum an die Oberfläche und in die Atmosphäre gelangen (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 29).

4.5.10 Weiße Dächer

Die Verwendung von weißen Materialien an Dächern, Straßen und sonstigen Verkehrsflächen stellt zunächst eine umweltfreundliche Methode dar. Allerdings muss man den Großaufwand und die Verwendung von oft giftigen Lacken und anderen Materialien bedenken, die für ein solches Projekt notwendig sind. Zudem müsste das Verfahren alle paar Jahrzehnte wiederholt werden, da die weiße Farbe recht schnell verschmutzen würde und somit der volle Rückstrahlungseffekt nicht mehr gegeben wäre. Sind die Flächen allerdings erst einmal weiß, haben sie kaum umweltschädliche Eigenschaften.

4.5.11 Bio-Geoengineering

Die Methoden des Bio-Geoengineerings stellen ähnlich wie das Weißen der Dächer zunächst eine umweltfreundliche Methode dar. Doch gäbe es eine massive Einschränkung in der Artenvielfalt, sollte man nur noch Nutzpflanzen mit einer hohen Albedo verwenden. Dies würde sich auch auf das Ökosystem und den Lebensraum vieler Kleinstlebewesen auswirken. Zudem wäre es unsicher, ob man für jeden Klimaraum passende und ertragsreiche Pflanzen mit einer hohen Albedo finden und kultivieren könnte. Hier könnte es zu einer Einführung von gentechnisch manipulierten Pflanzenarten kommen, welche nochmals die Artenvielfalt dezimieren würden sowie das natürliche Ökosystem schwächen könnten.

4.5.12 Wüstenreflektoren

Die beschriebenen Methoden zur Sonnenreflexion erscheinen zunächst harmlos, da einerseits die Sonneneinstrahlung in diesen Gebieten sehr hoch ist und sie zum anderen sehr wenig von Menschen genutzt werden. Auch ist die Tier- und Pflanzenwelt in diesen Gebieten eher sehr unterentwickelt, im Vergleich zu feuchteren Gebieten. In Wahrheit können diese Methoden, vor allem die Polyethylen-Aluminium-Folien, hohe ökologische und umweltschädliche Folgen haben. Diese beziehen sich nicht nur auf das lokale Gebiet, sondern können ihre negativen Folgen auf einen sehr großen Raum ausweiten. „In common with other very localised radiative forcings, this approach has the potential to change large-scale patterns of atmospheric circulation, such as the East African monsoon that brings rain to sub-Saharan Africa. The ecological impacts of any such associated local climate change, and of covering the land, would clearly be very great in the areas affected, and constitute very serious disadvantages of this method if it were implemented on any scale large enough to be effective.“ (THE ROYAL SOCIETY, 2009, S. 26) Eine Veränderung des Monsunregens könnte einige Regionen vertrocknen lassen und in dessen Folge zu einer Massenwanderung der dort lebenden Menschen führen. Das Ackerland würde verdorren und die Menschen könnten vor ihrem existenziellen Ende stehen.

Hinzu kommt, dass die Polyethylen-Aluminium-Folien kein Sonnenlicht zum Boden durchlassen, was die Kleinstorganismen im Wüstenboden zum Absterben bringen würde. Auch der Wüstensand könnte durch die groß angelegten Planen nicht mehr vom Wind

verweht werden, was vor allem für die Ozeane eine negative Folge wäre, da sie den Wüstensand wegen seines Eisenanteils als Dünger benötigen (vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 13). Somit stellen die Wüstenreflektoren keine geeignete Maßnahme zur Kühlung der Erde dar.

4.5.13 Erhöhung der Ozeanalbedo

Das Abdecken der Ozeanoberflächen mit Reflektoren bringt einige negative Aspekte mit sich. Durch die Abdeckung kann kaum Sonnenlicht auf die Meeresoberfläche scheinen, was die Photosynthese der Algen und des Planktons erschwert oder verhindert. So kann in weiterer Folge kein CO₂ von der Atmosphäre ins Wasser aufgenommen und gespeichert werden. Es stellt sich hier die Frage, welche CO₂-Verringerungsmethode effektiver ist, die Erhöhung der Ozeanalbedo oder die CO₂-Aufnahme durch Plankton und Algen, da sie konterproduktiv arbeiten. Zudem könnten die Reflektoren, wenn sie äußerst weitläufig angelegt werden, eine große Gefahr für Meeressäugetiere darstellen, die ab und an an die Oberfläche müssen, um Luft zu holen. Die Meerestiere und Meeressäugetiere könnten beim Auftauchen natürlich auch die Reflektoren beschädigen oder zerstören, was einerseits zu hohen Reparaturkosten und andererseits zu einer Verschmutzung der Meere führen würde, da die abgebrochenen Bestandteile ziellos im Wasser herumtreiben würden. Auch das Entfernen von Verschmutzungen und pflanzlichem Bewuchs mit Chemikalien stellt eine immense Gefahr für das empfindliche Ökosystem dar. Vor allem die Chemikalien, die gegen den Bewuchs verwendet werden würden, könnten auch die Pflanzen und pflanzlichen Kleinstorganismen im Wasser zerstören oder vergiften. Die vergifteten Pflanzen könnten wiederum von Fischen und anderen Meerestieren gefressen werden, welche sich somit ebenfalls vergiften. Dieser Kreislauf kann sich bis auf den Menschen ausweiten, wenn dieser unwissentlich den vergifteten Fisch isst.

4.5.14 Marine Wolkenaufhellung

Durch die Volumenzunahme der Wolken und somit der Albedo, resultierend aus der MCB-Methode, kommt es zu einer verminderten Sonneneinstrahlung auf den Ozean. Dies könnte die Photosynthese einiger Meerespflanzen beeinträchtigen und in weiterer Folge könnte dadurch eine Verminderung der CO₂-Aufnahme festgestellt werden.

Zurzeit gibt es keine Studien auf diesem Gebiet, somit kann man auch wenig über die möglichen Folgen für den Menschen oder die Umwelt sagen. Fest steht allerdings, dass wenn man die MCB-Methoden großräumig einsetzen würde, sie Auswirkungen auf die Meeresströmungen, die Niederschlagsintensität, auf die Windsysteme und in weiterer Folge auch auf das menschliche Leben hätten.

4.5.15 Sulfitinjektionen

Das punktuelle Vorkommen von Schwefelpartikeln in der Stratosphäre aufgrund eines Vulkanausbruchs hatte einen kühlenden Effekt auf das Klima. Allerdings waren die Partikel bereits nach einigen Monaten wieder aus der Stratosphäre verschwunden, und das Klima normalisierte sich wieder. Eine dauerhafte Besprühung der Stratosphäre mit SO₂ kann natürlich zu weitreichenden Folgen führen. „Aerosol geoengineering hinges on counterbalancing the forcing effects of greenhouse gas emissions with the forcing effects of aerosol emissions. If large quantities of SO₂, equivalent to almost a Pinatubo per year, are injected, sea level drops for several decades until the mid 21st century before the increasing greenhouse gas concentrations overcome the aerosol cooling and sea level starts to rise again.“ (MOORE et al., 2010, S.15702) Dies zeigt also, dass der Rückstrahlungseffekt zwar gegeben sein kann, wodurch es zu einer temporären Abkühlung kommen würde. Allerdings würde diese Methode andere Effekte ebenso beeinflussen, wie den Treibhauseffekt, der mit der Zeit stärker werden würde, wodurch die Temperaturen in weiterer Folge wieder ansteigen würden.

Schwefel ist für Menschen und Tiere in kleinen Mengen unbedenklich. Es ist ein natürliches Element in vielen Lebensmitteln. Schwefel wird auch zur Haltbarmachung von Trockenfrüchten verwendet und zeigt somit seine Verträglichkeit. Allerdings kann es in größeren Mengen zu Kopfschmerzen, „Beeinträchtigung der Augen und der Sehkraft, Störungen der Fortpflanzung, Schäden beim Immunsystems, Magen- und Darmbeschwerden, Schäden an Leber und Nieren, Fehlfunktionen des Hörapparats, Störungen des Hormonhaushalts, Hautausschläge, Ersticken und Lungenembolie“ führen (www.lenntech.de [eingesehen am 22.01.2015]). Auch die Pflanzenwelt würde an dem Übermaß an Schwefel sehr leiden. „Die Versauerung von Böden durch überhöhte Schwefelzufuhr hat Konsequenzen für die Böden. Die Mobilität von Schwermetallen steigt mit sinkendem pH-Wert. Außerdem kommt es zum Zerfall von Tonmineralen

(Aluminiumsilikaten) und dabei zur Freisetzung der Aluminiumionen in der Bodenlösung. Eine verstärkte Aluminiumfreisetzung aus dem Kristallgitter sogenannter silikatischer Bodenminerale erfolgt bereits unterhalb eines pH-Wertes von 4,2. Aluminium verdrängt essentielle Pflanzennährstoffe wie Calcium und Magnesium (Antagonismus) an den Pflanzenwurzeln.“ (www.effizientduengen.de/ [eingesehen am 22.01.2015])

4.5.16 Geoengineering-Methoden im Weltall

Da die Weltall-Methoden alle dasselbe Prinzip verfolgen, nämlich durch ihre Größe einen Schatten auf die Erde zu werfen und ankommende Sonnenstrahlen zu reflektieren, sind auch ihre negativen Folgen auf die Umwelt, den Menschen und die Tiere sehr ähnlich, deshalb werden sie hier unter einem Punkt zusammengefasst. Allerdings kann man über die Schäden, die sie anrichten können, nur spekulieren, da es hierzu weder ausreichende Studien noch Experimente gibt. „Die Installation von spiegelnden Objekten im Weltraum würde zu einer Änderung der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche führen, die jedoch nicht gleichmäßig auf der Erde verteilt wäre. Dies würde einen gravierenden Eingriff bedeuten, der sich auf die atmosphärische und ozeanische Zirkulation auswirken würde. Denn die atmosphärische Zirkulation wird wesentlich durch die unterschiedlichen Einstrahlungsverhältnisse am Äquator und den Polen gesteuert. Ändern sich diese Strahlungsgrößen, hat das weitreichende Auswirkungen auf die Zirkulation und damit auf Temperaturen, Verdunstung, Bewölkung und Niederschläge in vielen Regionen der Erde. Daraus ergeben sich wiederum Konsequenzen für die Lebensbedingungen des Menschen, die Nahrungsmittelproduktion und die Stabilität von Ökosystemen.“ (UMWELTBUNDESAMT, 2011, S. 14f.)

5. Conclusio und Diskussion

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Forschungsfrage noch einmal kurz zusammengefasst, sowie diskutiert werden, um anschließend die zu Anfangs gestellte Hypothese im Kapitel der Perspektiven zu bearbeiten.

Die Carbon-Dioxid-Removal-Methode bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten, welche der globalen Erwärmung entgegenwirken sollen. Die meisten dieser Methoden erscheinen im Vergleich zum Solar Radiation Management eher umweltfreundlicher, dennoch haben auch sie teilweise starke Nebenwirkungen.

Die Carbon-Capture-and-Storage-Methode stellt im ersten Moment keine gute Alternative zur Bekämpfung der globalen Erwärmung dar. Sie produziert mehr CO₂ als herkömmliche Verfahren und die Lagerungsmöglichkeiten sind mehr als fraglich. Zudem könnte die Speicherung im Falle eines Lecks zu einer Umweltkatastrophe führen. Dennoch könnten mögliche Umweltkatastrophen durch zahlreiche Berechnungen und Vermessungen minimiert werden. Auch die höhere CO₂-Produktion aufgrund der Abspaltung, des Transport und der Lagerung kann man bis zu einem gewissen Grad als weniger problematisch ansehen, da alle Geoengineering-Methoden erst entwickelt und produziert werden müssen, was einen erhöhten CO₂-Ausschuss vorprogrammiert. Was man allerdings als sehr problematisch empfinden kann, ist, dass man nach dem Motto „aus den Augen, aus dem Sinn“ agieren wird. Es muss ein Bewusstsein dafür bestehen, dass der Erdmantel ein begrenzter Raum ist, den man nicht ausdehnen kann. Es stellt sich die Frage, was passieren würde, wenn die Methode gut funktionieren würde, mit der Zeit aber alle natürlich entstandenen Speicher voll sind und keine absolut sicheren Untergründe zur Versenkung des CO₂ gebaut werden könnten. Vielleicht würden die Menschen dann leichtsinnig werden und an Orten Lager errichten, die zu einem solchen Zweck gar nicht geeignet sind und in weiterer Folge zu verheerenden Umweltkatastrophen führen würden. Es könnte natürlich auch so weit kommen, dass man gut geeignete Böden findet, welche allerdings besiedelt sind. Dies könnte zu Massen- und Zwangsumsiedlungen führen, welche vor allem für arme Menschen existenzielle Auswirkungen haben könnten, was die Geschichte bereits anhand mehrerer solcher „Zwangsvertreibungen“ gezeigt hat. Aufgrund der eben genannten negativen Aspekte ist die CCS-Methode noch zu wenig erforscht und prognostiziert, als dass man ein adäquates Urteil fällen könnte.

Das Konzept der künstlichen Bäume, welche an Straßenrändern und anderen Flächen aufgestellt werden sollten, um das CO₂ aus der Atmosphäre zu filtern, ist mit ihrer Versorgung durch saubere Energie gut durchdacht. Dennoch stehen auch hier die Risiken der unterirdischen Speicherung im Vordergrund. Zudem kommt, dass vermehrt künstliche Speicherlager geschaffen werden müssen, wenn man die Filteranlage nahe bei Straßen oder Städten errichten möchte. Ein weiterer Grund, der hier gegen natürliche Speicherorte sprechen würde, sind die Windmühlen, welche die Filter mit Energie versorgen. Sie sind sehr schwer und benötigen ein stabiles Fundament. Würde man die Anlagen in der Nähe von natürlichen Erdlöchern aufstellen, könnten sie in Folge eines Einbruches jener umstürzen und kaputt gehen. Jedoch ist die Erstellung künstlicher Speicher in der Nähe von Städten und viel befahrenen Orten sehr fraglich. Sollte es hier zu einer plötzlichen Entleerung des Speichers kommen, würde Lebensgefahr herrschen und eventuell tausende Menschen gefährdet sein.

Zudem stellt die Methode aufgrund ihrer geringeren Leistung im Vergleich zu anderen Geoengineering-Methoden keine Lösung für die Abkühlung der Erde dar, sie könnte höchstens als Hilfsmittel oder Zusatz verwendet werden.

Die Methoden mit Biokohle und Biomasse stellen im Prinzip keine schlechten Maßnahmen dar. Biomasse kann in Kraftwerken verbrannt werden, dabei wird das CO₂ abgespalten und gespeichert. Die Speicherung erfolgt hier höchstwahrscheinlich wie bei der CCS-Methode. Biomasse kann auch zu Kraftstoff umgewandelt werden, welches den CO₂-Ausstoß im Vergleich zur Verbrennung von fossilen Brennstoffen stark minimieren kann. Auch die Produktion von Biokohle mittels Pyrolyse stellt eine plausible Option dar, da Kohle, durch ihre komprimierte Form mehr CO₂ aufnehmen kann und dieses über einen sehr langen Zeitraum speichert. Allerdings ist die Menge an Biomasse limitiert vorhanden. Man könnte natürlich mehr Biomasse produzieren, indem man verschiedene Pflanzenarten, wie etwa Mais, Getreide, Zuckerrohr etc., anbaut und diese ausschließlich für die Biomasseproduktion verwendet. Allerdings trifft man hier auf einen schweren ethischen Konflikt. Sollte man nun Pflanzen als Nahrungsmittel oder als Biomasse anbauen? Sollte es zu einer Verbreitung des Anbaus zur Biomassenproduktion kommen, werden wahrscheinlich die ärmsten Länder stark darunter leiden. Bereits heute werden Millionen Hektar an Ackerland in Dritte-Welt-Ländern von Industrieländern aufgekauft. Die Einheimischen arbeiten zu Dumpingpreisen auf diesen landwirtschaftlichen Flächen, deren Ernten später billig in die Industrieländer importiert werden. Dieser Effekt könnte sich

durch die Biomasseproduktion verstärken und den Dritte-Welt-Ländern kaum Platz zum eignen Nahrungsmittelanbau übrig lassen.

Die Wiederbewaldung und die Aufforstung stellen eine gravierende Verbesserung der Umweltsituation dar. Durch diese Prozesse wird nicht nur mehr CO₂ gespeichert und Sauerstoff ausgestoßen, diese Maßnahme bietet auch vielen Tieren ein neues Zuhause. Zudem kann auch ein Beitrag zur biologischen Vielfalt verzeichnet werden. Man darf aber dennoch nicht den Platzbedarf einer Aufforstung oder Wiederbewaldung unterschätzen. Um diesen Platz zu gewährleisten, werden oft Ackerfelder oder Weideplätze herangezogen. Dies steht nun wiederum in Konkurrenz mit der Lebensmittelherstellung. Besorgniserregend sollten die „Emissions-Schlupflöcher“ sein, die mittels der CDM-Projekte möglich sind. CO₂-emissionsstarke Industrieländer können ihren hohen CO₂-Gehalt ausgleichen, indem sie für Aufforstungs- oder Wiederbewaldungsprojekte in Entwicklungsändern sorgen. Dabei kommt die Frage auf, inwieweit dieser Deal der Umwelt hilft und die wirtschaftliche Situation der Entwicklungsländer einschränkt. Während Industrieländer ihre CO₂-Emissionssenkung mittels dieser Projekte umgehen können, bleiben den Entwicklungsländern mangels finanzieller Mittel und Know-how keine Alternativen. Zudem könnten ihre vergleichsweise günstigen Anbauflächen von den Industrieländern aufgekauft und zu Waldflächen umgewidmet werden. Dies könnte mit der Zeit einen drastischen Einschnitt in die Lebensmittelversorgung der dort lebenden Menschen bedeuten.

Somit ist die Idee einer Aufforstung und Wiederbewaldung jedenfalls zu unterstützen, allerdings sollte es diesbezüglich ein globales Abkommen geben, bei dem jedes Land zu einer Aufforstung auf seinen eigenen Flächen aufgefordert wird. CDM-Projekte könnten als zusätzliche, aber nicht alleinige, Option angeboten werden.

Die Methoden der Verwitterung haben ein hohes Potenzial einer massenhaften Speicherung von CO₂. Ihr größter Vorteil besteht darin, dass die meisten benötigten Ressourcen direkt aus der Natur entnommen werden können, ohne dieser einen größeren Schaden zuzufügen. Somit sind diese Methoden sehr umweltfreundlich, genauso wie ihre Produkte, da sie bereits seit Tausenden von Jahren in den Böden und Ozeanen auch natürlich vorkommen. Ein negativer Aspekt der Methoden ist allerdings, dass es sehr lange dauern würde, bis genug CO₂ aufgefangen und gespeichert wird, um ein Sinken der globalen Temperaturen wahrnehmen zu können. Ein weiterer negativer Aspekt wären die hohen Transportkosten sowie der lokale Aufbau einer Infrastruktur zum Abbau der Materialien. Zudem könnte der

hohe Wasserverbrauch in einigen Regionen zu Konflikten führen. Auch hier würden die ärmsten Länder wohl wieder einen Verlust erleben, wenn auf ihrem Land passendes Material für die Verwitterungsmethoden vorhanden sein sollte.

Dennoch ist diese Methode die bislang umweltfreundlichste.

Bei der Ozeandüngung werden verschiedene Stoffe, wie etwa Eisen, Nitrogen und Phosphor, in den Ozean gekippt, um die Algen- und Planktonproduktion anzuregen. Man muss sich allerdings dessen bewusst sein, dass diese Stoffe zwar auch natürlich im Ozean vorkommen, eine hohe Dosis sich aber negativ auf die Unterwasserlebenswelt auswirken kann. Das Ziel der Ozeandüngung ist es, vermehrt Plankton zu produzieren, damit dieses vermehrt CO₂ aufnehmen kann. Das vermehrte Eisen kann nun auch Algenarten zum vermehrten Wachstum animieren, welche einen Giftstoff an ihre Umgebung abgeben können. Dies kann zu einem Massenfischsterben führen und schließlich auch als Todesursache unzähliger weiterer Tierarten gelten, welche den toten Fischbestand fressen, wie etwa Vögel oder andere Meerestiere. Auch der Mensch könnte durch den Verzehr toxisch angereicherter Fische schwer erkranken oder sogar sterben. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist die Weitläufigkeit ihres Einsatzes. Da die Meeresströmungen die ins Meer gepumpten Stoffe schnell in ihrer Umgebung verteilen, kann man bislang keine präzisen Angaben für die anzuwendenden Mengen festhalten. Es gibt zwar computergesteuerte Modelle, welche eine Berechnung vornehmen können, doch auch diese sind nicht zu 100 Prozent richtig.

Diese Methode erscheint als zu gefährlich, da sie massiv in den Lebensraum der Meere eingreifen würde und somit womöglich eine irreversible Veränderung der Habitate zur Folge haben könnte.

Den Grundgedanken zur Verstärkung der physikalischen Pumpe kann man im ersten Moment nur zustimmen. Nährstoffreiches, kaltes Wasser wird mit Hilfe von sauberer Energie an die oberen Wasserschichten gepumpt, um so die Produktion von Plankton und Algen anzuregen, welche das CO₂ binden. Allerdings sind diese Pumpen, im Vergleich zur Tiefe des Ozeans, mit 100 bis 200 Metern sehr kurz. In dieser Tiefe befinden sich bereits erhöhte Mengen des anthropogenen CO₂, welches durch die Pumpen wieder an die Oberfläche und somit in die Atmosphäre gelangen könnte. Würde man Pumpen benutzen, die mehrere hundert bis tausend Meter lang sind, könnte man Tiefseewasser anzapfen, das deutlich weniger CO₂ und vor allem noch kein anthropogenes beinhaltet. Somit wäre die

CO₂-Abgabe höchstwahrscheinlich geringer als die Aufnahme der neuen anthropogenen CO₂-Partikel. Dieses Modell wird allerdings nur schwer umsetzbar sein, da zum einen die Meeresströmungen sehr stark sind und somit den langen Röhren sehr zusetzen könnten, zum anderen stellen die Pumpen ein Hindernis für die Meeresbewohner, die Schifffahrt und auch militärische Einsätze dar.

Einen noch bedrohlicheren Eingriff in die marine Welt stellt die Geoengineering-Methode der Umschichtung der Wasserschichten in den Ozeanen dar. Bei dieser Methode ist es das Ziel, mehr kaltes Wasser zu produzieren, damit dieses mehr CO₂ aufnehmen und in die Tiefen der Ozeane absinken kann. Es stellt sich nun die Frage, ob ein solch massiver Eingriff zu einer Veränderung des Stromes führen kann und ob dies in weiterer Folge sogar zu einer Abkühlung der Temperaturen an Land führen könnte. Würde es zum Beispiel zu einer Abkühlung in Europa kommen, hätte das zwar eine positive Auswirkung auf die Eisschmelze in den Bergen, andererseits eine äußerst schlechte Auswirkung auf die Landwirtschaft und somit auf die Ernährung der Bevölkerung. Auch die Tier- und Pflanzenwelt würde unter diesem Wetterumschwung massiv leiden. Einige Arten würden sich diesem Temperaturumschwung, auch wenn dieser erst langsam nach Jahren eintreten würde, nicht schnell genug anpassen können und in weiterer Folge aussterben. Weiters bleibt anzumerken, dass das CO₂ mit kaltem Wasser zwar in die Tiefe gezogen wird, wo es zwischen 500 bis 1000 Jahre verweilen kann, doch es gelangt nach diesem Zeitraum durch eine warme Meeresströmung wieder an die Oberfläche. Somit stellt sich die Frage, ob diese Methode tatsächlich eine Option darstellt, oder lediglich eine zeitliche Verschiebung des Problems ist. Zudem ist auch unklar, wie viel CO₂ sich zurzeit in tiefen Wasserlagen und dem Meeresboden befindet. Es gibt zwar Schätzungen und Berechnungen, doch auch diese sind ungenau. Es könnte theoretisch passieren, dass durch die vermehrte Kaltströmung nun mehr CO₂ in Bewegung gesetzt wird, dadurch auch das im Ozean befindliche CO₂ mitgerissen werden kann und es folglich zu einer größeren CO₂-Abgabe kommen könnte, als abgelagert werden kann. Es gibt zudem auch eine Theorie, in welcher man diesen Effekt rückgängig machen könnte, indem man das Wasser wieder erwärmt. Doch auch hier ist wiederum auf ein massives Eingreifen in die sensible Lebenswelt der Ozeane zu verweisen. Zudem handelt es sich bei den Meeresschichten und Strömungen um ein globales System, bei welchen man kaum in einer Woche den Ozean abkühlen kann und in der anderen Woche wieder erwärmt, weil man merkt, dass dieses Vorhaben nicht geglückt ist. Außerdem sind die Materialien, die für die Umschichtung nötig wären, sehr komplex und

haben einen hohen Eigenenergieverbrauch.

Die nach Zhou und Flynn (2005) beschriebenen Methoden zur Umschichtung der Meeresschichten sind ebenfalls bedenklich. Müsste man sich allerdings für eine der genannten Geoengineering-Methoden entscheiden, sollte die Wahl auf die Verdickung des Meereises fallen. Es gibt zwar auch hier ein mechanisches Pumpsystem, jedoch könnte diese Maschine mittels Wellenenergie angetrieben werden. Zudem bringt diese Methode auch keine schädlichen Stoffe in die Ozeane. Einen weiteren positiven Effekt stellt die Erhaltung des Meereises dar, so könnte das arktische Eis bereits jetzt mit Schmelzwasser besprüht werden, um es resistenter gegen die Erwärmung zu machen.

Die Ozeankalkung stellt eine eher wenig zufriedenstellende Lösung dar. Zwar gäbe es genug Material, Kalkstein, allerdings ist der Verarbeitungsprozess sehr umweltschädlich. Der Kalkstein muss mit einer immensen Temperatur von über 800°C gebrochen werden und setzt bei diesem Prozess zusätzlich CO₂ frei. Zudem muss der Kalk massenhaft ins Meer transportiert werden, damit ein Effekt merkbar wird. Obwohl der gelöste Kalk im Ozean doppelt so viel CO₂ aufnehmen kann, wie er bei seiner Produktion abgibt, erscheinen der Aufwand, die Kosten und die Umweltbelastung durch die Erwärmung und den Transport als zu hoch. Das Oberflächenwasser ist zudem zu Genüge mit Kalk gesättigt. Man müsste den zusätzlichen Kalk in einer gewissen Tiefe anbringen, in die das anthropogene CO₂ aber erst in den nächsten hundert bis tausend Jahren gelangen wird. Der Ozeankalkung wird noch ein weiterer Effekt zugeschrieben, nämlich den pH-Wert des Wassers wieder zu basieren. Durch den Kalk kann es allerdings zu Trübungen des Wassers und somit zu einer Einschränkung des Lichteinfalls kommen. Dies würde sich wiederum negativ auf die Photosynthese des Planktons und der Algen ausüben. Sollte dieser Fall eintreten, kann sich das Plankton nicht mehr vermehren und so auch kein CO₂ mehr aufnehmen. Es würde wiederum zu einer Anreicherung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre kommen.

Aus diesen genannten Gründen erscheint die Methode der Ozeankalkung als eine der unrealistischsten und umweltschädlichsten marinen Carbon-Dioxid-Removal-Methoden.

Die Versenkung von Ernteresten stellt im Moment keine passende Option dar, dennoch sollte man die Idee nicht verwerfen. Man muss beachten, dass die Weltmeere weniger erforscht sind als der Weltraum. Es ist der Menschheit teilweise gar nicht bewusst, wie die Tiefseeorganismen leben, oder welche Wechselwirkungen sie mit anderen Stoffen eingehen. Somit kann man derzeit eine Kontamination des Meeresgrundes mit

Ernteüberresten, welche mit Düngemittel und vor allem schädlichen Pestiziden angereichert sind, als äußerst gefährlich ansehen. Zuletzt entbrannte die Diskussion in Österreich, keine Pestizide mehr zu verwenden, die Bienen töten können, denn, um Albert Einstein zu zitieren: „Wenn die Biene einmal von der Erde verschwindet, hat der Mensch nur noch vier Jahre zu leben. Keine Bienen mehr, keine Bestäubung mehr, keine Pflanzen mehr, keine Tiere mehr, kein Mensch mehr.“ Dieselbe Theorie könnte gegebenenfalls auf Kleinstorganismen in der Tiefsee zutreffen, ohne die das ozeanische Ökosystem stark beschädigt oder sogar lebensfeindlich werden könnte. Bis die Wissenschaftler einen Schaden feststellen könnten, könnte der Prozess eventuell bereits unumkehrbar sein. Dies könnte in weiterer Folge auch Auswirkungen auf den Menschen haben. Zudem ist auch zu bedenken, dass diese Absenkungen sehr flächendeckend sein werden und dass an diesen Stellen kein bodennahes Leben für Organismen mehr möglich sein wird, bis sich eine neue Sedimentschicht auf den Ernteresten ablagern würde.

Auch das Abziehen der Erntereste von den Feldern könnte zu einem Problem werden, wenn zu viele Überreste aufgesammelt werden. Wenn dies über einen längeren Zeitraum erfolgt, werden dem Boden so viele Nährstoffe entzogen, dass er womöglich irreversibel geschädigt wird und für den Anbau neuer Ernten nicht mehr zu gebrauchen ist. Da diese Methode allerdings dermaßen viel CO₂, bis zu 92 Prozent, zurückhalten kann, sollte man diese Idee nicht verwerfen. Die erste Maßnahme, die getroffen werden müsste, wäre eine strenge Kontrolle der Düngemittel und der verwendeten Pestiziden. Es dürften hier ausschließlich biologische und gut abbaubare Stoffe verwendet werden, wie sie etwa derzeit im Bio-Anbau genutzt werden. Dies würde schon einmal das Risiko für die Meeresorganismen drastisch senken. Für viele Länder wäre diese Vereinbarung aber kaum einzuhalten, da beinahe keine Restriktionen bei der Verwendung von Pestiziden vorhanden sind. Sollte man aber einen großen Teil der Bauern dazu bewegen können, sich einem solchen Programm anzuschließen, wäre dies sicher ein gesunder Schritt für unsere Böden, Gewässer und Tiere und eventuell auch ein hilfreicher Schritt, um die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu minimieren.

Bei den marinen CDR-Methoden ist vor allem auffällig, dass die meisten von ihnen nicht miteinander kombiniert werden können, da sie sich gegenseitig behindern würden. Während die Ozeandüngung versucht, mehr Nährstoffe für Plankton und Algen zu schaffen, damit sich diese rascher vermehren und somit mehr CO₂ aufnehmen können, könnte die Ozeankalkung das Wasser derart trüben, dass eine Photosynthese womöglich

unmöglich wäre und es so zu einer verminderten CO₂-Aufnahme durch Plankton und Algen kommen würde. Auch die Methode der Umschichtung könnte durch die Temperaturveränderungen der Wasserschichten Organismen absterben lassen.

Das Solar Radiation Management hat bei den meisten seiner Methoden, im Vergleich zu den CDR-Methoden, einen hohen technologischen Anspruch. Viele der SRM-Methoden wären zum Stand der heutigen Wissenschaft noch nicht durchführbar und benötigen gewiss noch einige Jahre an Forschung. In der Theorie stellen einige dieser Methoden allerdings eine äußerst gute Lösung zur Abkühlung der Atmosphäre dar, dennoch bergen auch sie gefährliche Folgen für die Umwelt und das Leben auf der Erde.

Die Einfärbung der Dächer und Straßen mit einer weißen Farbe stellt zunächst eine sehr umweltfreundliche Methode dar. Allerdings benötigt man für dieses Verfahren viel Material, gegebenenfalls auch Lacke und Farben, die giftige Dämpfe ausstoßen können. Diese Methode ist dennoch sehr günstig und kann auch eine Abkühlung der Städte hervorrufen. Allerdings ist die zu verwendete Fläche im globalen Maße gesehen dennoch sehr klein und wird daher wenig Einfluss auf die globale Abkühlung haben. Dennoch wäre es ratsam, wenn viele Häuser ein weißes Dach bekommen würden, da dies auch maßgeblich zur Wärmeregulierung im Haus beitragen könnte und so die Kühlungskosten und -emissionen niedrig halten könnte.

Die Nutzung von Bio-Engineering-Methoden könnte die Artenvielfalt der Nutzpflanzen stark beeinträchtigen. Sollte es zu einer weltweiten Nutzung von Pflanzen mit einer hohen Albedo kommen, könnte man somit eine Abkühlung der Atmosphäre zwar hervorrufen, diese wäre allerdings sehr minimal. Zudem stellt sich die Frage, wer von diesem Verfahren am meisten profitieren würde. Womöglich wären es Samenmonopole, die mit einer hohen Ernte und zugleich hoher Albedo werben würden, wie es sie bereits heute in den USA gibt.

Die Idee der Kultivierung von Pflanzen in den Wüsten zur Sonnenreflexion ist nicht nur absurd, sondern auch höchstwahrscheinlich undurchführbar. Es würden massive Kosten auf diese Projekte zukommen, vor allem im Bereich des Transportes, des Straßenbaus und der Wasserversorgung. Auch die Auslegung der Wüsten mit Polyethylen-Aluminium-Folien hätte verheerende Auswirkungen auf lokaler und regionaler Ebene. Sie würden zum einen kein Sonnenlicht auf den Boden durchlassen, was zum Absterben der Kleinstorganismen führen würde, und zum anderen würden sie den Sand unter sich

festhalten, sodass er nicht mehr in die Ozeane verweht werden könnte, wo er dank seines Eisenanteiles als Dünger wirkt. Auch die Kosten der Instandhaltung der Folie würden sich im Laufe der Zeit ins Unermessliche steigern.

Zwar würden die Wüstenreflektoren wahrscheinlich sehr effizient arbeiten und die Atmosphäre somit schnell abkühlen können, dennoch stellen sie wegen der gravierenden negativen Folgen keine Option dar.

Die Methode der Erhöhung der Albedo bei Wasseroberflächen mittels flächenabdeckender Reflektoren stellt keine Lösung zur Abkühlung des Klimas dar. Ganz im Gegenteil. Es bringt sehr viele negative Folgen mit sich, welche das marine Ökosystem für eine lange Zeit schädigen könnten. Durch die Abdeckung der Wasseroberfläche ist ein Durchdringen der Sonnenstrahlen beinahe unmöglich, somit wird die Photosynthese im Wasser verhindert und kein CO₂ kann absorbiert werden. Zum anderen bildet sie eine Barriere für Meeressäuger, die auftauchen müssen, um Luft zu holen. Die durchgehenden, großflächigen Reflektoren könnten auch ein Hindernis für die Schifffahrt darstellen. Zudem würden sie eine ständige Betreuung brauchen, zum Beispiel mit Reparaturen oder Reinigungen. Die Erzeugung und Anbringung der Reflektoren wäre zudem auch sehr kostenintensiv. Diese Methode stellt also keinesfalls eine Maßnahme dar, derer sich der Mensch zur Verminderung der Temperaturen bedienen sollte.

Die MCB-Methode versucht die Wolken mit Hilfe von Meersalzaerosolen heller erscheinen zu lassen und somit die Albedo zu erhöhen. Es bilden sich in den Wolken kleine Tröpfchen, welche die Wolke zum Wachsen bringen. Es muss allerdings darauf geachtet werden, dass nur kleine Partikel in die Wolken injiziert werden, sodass sie keinen Regen auslösen. Über die Effizienz dieser Methode lässt sich streiten. Die Idee an sich ist bestimmt effektiv, da mit den Wolken eine hohe Rückstrahlwirkung erreicht werden kann. Allerdings kann das MCB-Verfahren nicht zu jeder Zeit und nicht an jedem Ort durchgeführt werden. Die Wetterverhältnisse, wie Wind und Wolkenkonstellation, müssen perfekt stimmen, damit eine Injektion möglich wäre. Zudem soll die MCB größtenteils vom Schiff aus erledigt werden. Hier kann man ein Hindernis der Erreichbarkeit erkennen, da der Ozean, trotz seiner Größe, Grenzen hat. Die Unklarheit über die Auswirkungen der MCB-Methode sowie aufgetretene Schwierigkeiten während der durchgeführten Experimente machen sie derzeit zu keiner optimalen Lösung der Abkühlung.

Die Schwefelinjektionen sollen nach dem Vorbild eines Vulkanausbruches wirken. Ein Vulkan spuckt bei seinem Ausbruch Millionen Tonnen an Gestein und Asche in die Atmosphäre, darunter auch Schwefelpartikel. Diese Schwefelpartikel bleiben für einige Monate bis Jahre in der Stratosphäre und reflektieren dort vermehrt die eintretende Sonnenstrahlung. Geoengineering-Experten versuchen nun Methoden zu finden, um diesen Effekt nachzuahmen. Dabei sind sie auf Schwefelinjektionen direkt in die Stratosphäre mittels Ballons, Flugzeugen und Abschussrampen gekommen. Das Resultat der Injektionen könnte durchaus erfolgreich sein, doch der Erfolg birgt auch einige Schattenseiten. Da sich die Schwefelaerosole nicht für immer in der Stratosphäre halten können, landen sie nach einiger Zeit wieder auf dem Boden, wo sie für Menschen und Tiere sehr gesundheitsschädlich wirken können. Auch der Boden kann durch eine erhöhte Schwefelaufnahme versauern und somit in weiterer Folge die Pflanzenwelt schädigen beziehungsweise zum Absterben bringen.

Zudem ist die Technologie noch nicht ausgereift genug, es gibt keine offiziell durchgeführten Tests zu diesen Methoden.

Wegen der gravierenden Nachteile dieser Methode sollte sie nicht angewendet werden. Sollte der Kipppunkt allerdings überschritten werden, stellt die Schwefelinjektion eine effiziente Methode zur Klimaabkühlung dar.

Das Weltall-Geoengineering kreiert mit seinen Methoden, vor allem von den Dimensionen gesehen, ganz neue Verfahren zur Sonnenrückstrahlung.

Die Geoengineering-Methode der LEOs soll genügend Sonnenstrahlen reflektieren, damit sich die Erde abkühlen kann. Dazu werden mehrere Reflektoren in den Orbit geschossen, die an ihrer Ausgangsposition verharren werden. Da sie sich sehr nahe an den Satelliten befinden und zudem in einer Zone, in der viel Weltraumschrott schwebt, sind Kollisionen vorprogrammiert. Da die LEOs an ihrem Standpunkt fixiert sind, können sie die Sonnenstrahlen nur unter Tags reflektieren. Zudem kann die Sonneneinstrahlung in einem derartigen Winkel vorkommen, zum Beispiel beim Sonnenauf- oder -untergang, dass das Licht von den LEOs auf die Erde reflektiert werden könnte und somit Lichtblitze auslöst, die schädlich für die Augen sind und vor allem irritierend wirken. Aus diesen Gründen wären LEOs nicht die optimale SRM-Methode.

Die Sonnensegel würden ähnlich wie die LEOs funktionieren. Auch sie haben eine Oberfläche, welche die Sonnenstrahlen reflektiert. Ihre Größe würde von der Entfernung zur Erde abhängen. Es gäbe theoretisch die Möglichkeit auch Sonnensegel auf den SEL1

zu bringen, sodass sie eine optimale Sonnenabschirmung erreichen können. Doch ein Transport zu diesem Punkt würde mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Was wiederum für die Methode der Sonnensegel spricht, ist, dass sie sich durch Photonenbestrahlung bewegen. Würden sie nun die Photonen zu Energie umwandeln können, könnte man sie von der Erde aus steuern, wenn bereits Materialien zum Manövrieren am Sail angebracht sind, und so ihre Position verändert werden. Diese Methode könnte nach einer längeren Studie sowie Optimierung des Solar Sails eine nützliche Maßnahme sein, um das Klima auf der Erde zu senken.

Die letzte Kategorie der Weltall-Geoengineering-Methoden, die hochtechnischen Dyson Dots, stellen die Wissenschaftler vor eine besonders hohe Herausforderung. Der Dyson Dot müsste einen Mindestdurchmesser von 700km² aufweisen und an einer ganz speziellen Stelle im Weltall, nämlich dem SEL-1-Punkt, angebracht werden, damit er seine optimale Wirkung entfalten kann. Hierbei ist insbesondere fraglich, wie man ein solch großes Objekt auf eine so weite Reise schicken kann. Es ist natürlich nicht ungewöhnlich, dass Einzelteile ins Weltall transportiert werden, um erst dort zusammengebaut zu werden, das beste Beispiel hierfür ist die ISS. Dennoch wäre ein Aufbau in dieser Dimension bis dato unvorstellbar, es handelt sich immerhin beinahe um die Fläche Chiles beziehungsweise mehr als die achtfache Fläche Österreichs. Zudem stellt sich zugleich die Frage, wo im Weltall dieser Gigant zusammengebaut werden sollte. Je weiter weg von der Erde der Aufbau geplant werden würde, desto umständlicher und teurer wären der Transport und die Aufbauarbeiten. Wäre die intergalaktische Baustelle allerdings zu nahe an der Erde, könnte sie von der Gravitation angezogen werden und auf die Erde stürzen, was zu einer massiven Zerstörung an der Erdoberfläche führen würde.

Das Projekt wird zusätzlich mit der Möglichkeit der Energiegewinnung schön gepriesen. Doch auch hier handelt es sich um eine Technologie, die es heute noch nicht gibt und die eine jahrelange Forschung benötigen würde.

Die Forschungen zu dieser Methode könnten Jahre dauern, danach würde eine jahrelange Aufbau- und Transportphase kommen. Wenn man eine Geoengineering-Methode in den nächsten Jahren einsetzen müsste, wäre der Dyson Dot, trotz seiner unbestreitbaren Wirkung, wohl kaum in der engeren Auswahl.

Im nachfolgenden Kapitel soll eine kurze Perspektive mit möglichen Geoengineering-Methoden aufgezeigt werden. Dabei wurde vor allem darauf geachtet, dass ein gewisses

Kosten-Nutzen-Verhältnis eingehalten wird, wobei mit Kosten die Natur und das Leben auf der Erde gemeint sind.

Im Anschluss soll ein Urteil abgegeben werden, ob die Arbeitshypothese dieser Diplomarbeit bestätigt oder falsifiziert werden kann.

5.1 Perspektiven

Im Verlauf dieser Arbeit wurden nun mehrere Methoden des Geoengineerings behandelt, vor allem jene des „Carbon Dioxid Removal“ und des „Solar Radiation Management“. Dabei stellte sich heraus, dass alle genannten Methoden einen Beitrag zur Abkühlung der Erde leisten könnten, sie allerdings teilweise gravierende Folgen hätten.

Sollte sich die Menschheit heute entschließen, etwas gegen die globale Erwärmung zu unternehmen, könnte man sie eventuell mit leichteren Methoden der CDR verlangsamen oder gar stoppen. Die Light-Versionen hierfür wäre zum Beispiel die Aufforstung der Wälder.

Eine ebenso schnell durchführbare Methode wäre jene der Ozeankalkung. Sie versucht das CO₂ auf einem natürlicheren Weg aus der Atmosphäre zu absorbieren, indem die Algen und das Plankton mit zusätzlichen Nährstoffen versorgt werden und somit, aufgrund der Photosynthese, vermehrt CO₂ aufnehmen können.

Auch die Abkühlbecken, mit deren Hilfe das bereits existente Meereis aufrechterhalten werden kann, stellt eine leicht umsetzbare und unterstützende Methode dar. Eine weitere CDR-Methode, die ebenfalls nicht unbeachtet bleiben sollte, die in ihrer Umsetzung aber wahrscheinlich am längsten benötigen würde, wäre die Versenkung der Erntereste. Man müsste hier allerdings Abkommen treffen, dass nur jene Erntereste versenkt werden dürfen, die absolut pestizidfrei sind und ohne chemischen Dünger gedüngt wurden, um so ein wenig Sicherheit für das marine Ökosystem herzustellen. Auch einige SRM-Methoden können als schnell umsetzbar mit geringerem umweltlichen Risiko eingestuft und durchgesetzt werden, wie zum Beispiel das Weißen der Dächer und die Aussaat von Pflanzen mit einer höheren Albedo.

Beschließt die Menschheit noch ein wenig zu warten und einstweilen Forschungen für einige Geoengineering-Methoden anzustellen, damit diese dann umgesetzt werden

könnten, sollten hier auf keinen Fall die künstlichen Bäume fehlen. Sie haben zwar nicht die größte CO₂-Aufnahmemöglichkeit, dennoch sind sie als eher umweltfreundlich einzustufen.

Auch die marine Wolkenaufhellung durch Meersalzaerosole könnte zu einer vielversprechenden Lösung werden, wenn man genügend Studien über die möglichen Auswirkungen und deren Verhinderung durchgeführt hat.

Hätte man noch ausreichend Zeit, so wäre auf jeden Fall eine Forschung im Feld des Weltall-Geoengineerings zu empfehlen. Die Solar Sails und die Dyson Dots hätten wahrscheinlich, auf lange Sicht gesehen, die besten Chancen, unsere Erde abzukühlen und uns unter gegebenen technischen Möglichkeiten sogar mit Energie zu versorgen.

Sollte in den nächsten Jahren oder Jahrzehnten die bisherige menschliche Ignoranz walten und der Kipppunkt überschritten worden sein, wird man auf die wahrscheinlich effektivste Methode der hier angeführten zurückgreifen, nämlich die Sulfatinjektionen. Für diese Methode bräuchte man keine zusätzlichen Geräte oder Materialien erfinden. Man kann SO₂-Aerosole leicht mit Flugzeugen oder Ballonen in der Stratosphäre verteilen. Wie man am Beispiel des Vulkanausbruchs Pinatubo gesehen hat, ist die Schwefelanbringung in dieser Höhe äußerst effektiv. Die Schäden, die mit dieser Methode angerichtet werden, werden massiv und vor allem global sein. Der Ackerbau wäre aufgrund des sauren Regens bereits nach einigen Monaten wahrscheinlich nicht mehr in seiner ursprünglichen Form möglich. Man könnte hierfür bereits im Vorhinein riesige Glashäuser erbauen. Zur Minderung der Versauerung in den Ozeanen könnte Kalk verstreut werden. Die meisten Wildtiere würden unter diesen Umständen wahrscheinlich verenden, da ihre Nahrungskette komplett zusammenbrechen würde. Es ist auch fraglich, wie viele Menschen diesen massiven Eingriff überleben würden. Die Nahrungsmittelpreise würden in den Himmel schießen und Trinkwasser ein noch kostbareres Gut werden als es heute schon ist. Viele Millionen Menschen, die auf den Straßen oder in schlecht gebauten Häusern leben, hätten kaum Schutz vor dem aggressiven Regen und seinen Folgen.

Dieser Schritt wäre ein Worst-Case-Szenario, das unsere Welt entweder retten oder komplett zerstören könnte.

Nach den untersuchten Methoden kann man sich nur schwer vorstellen, dass man sich mit einer dieser Geoengineering-Methoden jemals anfreunden könnte, da alle zwar gewisse Vorteile haben, aber ihre Nachteile doch oft stark überwiegen.

Die Forschung und Entwicklung der Geoengineering-Methoden werden in den nächsten Jahren voraussichtlich steigen, dies kann man bereits der steigenden Veröffentlichungen der Fachartikel in den letzten Jahren entnehmen.

Aufgrund der gesammelten Ergebnisse, kann die zu anfangs gestellte Hypothese bestätigt werden. Einige der Geoengineering-Methoden stellen durchaus eine sehr effektive Methode gegen die globale Erwärmung dar und bieten somit einen alternativen Lösungsweg, zu den momentan vorherrschenden Methoden. Dennoch sollten sie behutsam und erst nach einer ausgiebigen Forschung, sowie Langzeitstudien, sofern dies die Zeit zulässt, eingesetzt werden.

7. Literaturverzeichnis

ALTNER G., LEITSCHUH H., MICHELSEN G., SIMONIS E., WEIZSÄCKER E. (Hrsg.) (2010): Die Klima-Manipulateure. Rettet uns Politik oder Geo-Engineering? – Stuttgart, 33.

BERZ G. (Hrsg.) (2010): „Wie aus heiterem Himmel? Naturkatastrophen und Klimawandel“ – München, 163, 167, 171

BOREL (2008): „Cleaning up CO₂ with a twist of lime”. In: Cosmos. The science of everything o.A. (o.A.), o.A.

BUESSELER K., DONEY S., KARL D., BOYD P., CALDEIRA K., CHAI F., COALE K., BAAR H., FALKOWSKI P., JOHNSON K., LAMPITT R., MICHAELS A., NAQVI S., SMETACEK V., TAKEDA S., WATSON A. (2008): „Ocean Iron Fertilization--Moving Forward in a Sea of Uncertainty“. In: Science 319 (5860), 162, 163.

EICHLER (2014): „Implications of global warming“ - Wien, 1, 4, 9, 13, 15.

FUCHS A. (Hrsg.) (2010): „Blickpunkt Klimawandel. Gefahren und Chancen“ – Bielefeld, 91.

GORE A. (2009): „Wir haben die Wahl. Ein Plan zur Lösung der Klimakrise“ - München, 34,35.

GÜSSOW K., OSCHLIES G., PROELSS A., REHDANZ K., RICKLES W. (2009): „Ocean iron fertilization: Why further research is needed“. In: Kiel Working Papers 34 (5), 4, 6.

HARTZELL-NICHOLS L. (2012): „Precaution and Solar Radiation Management“. In: Ethics, Policy and Environment 15 (2), 163.

HOUGHTON J. (Hrsg.) (1997): „Globale Erwärmung. Fakten, Gefahren und Lösungswege“ – Heidelberg, 14, 102, 105.

IPCC (Hrsg.) (2001). Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge, 328.

JACOBSON M., TEN HOEVE J. (2011): „Effects of Urban Surfaces and White Roofs on Global and Regional Climate”. In: Journal of Climate 25 (3), 1028.

KEHSE U. (2011): „Ausbruch des Vulkans Pinatubo beeinflusste Wetter in Europa”. In: Bild der Wissenschaft o.A., o.A.

Keith, D.W. (2000): „Geoengineering the Climate. History and Prospect“. In: Annual Reviews. Energy Environment 25 (o.A.), 245, 248, 205-253.

KELLER P., FENG E., OSCHLIES A. (2014): „Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario“. In: Natur communications 5 (o.A.), 4.

KENNEDY R., ROY K., FIELDS D. (2013): “Dyson Dots: Changing the solar constant to a variable with photovoltaic lightsails”. In: Acta Astronautica 82 (2), 226-229, 232.

KROMP-KOLB H., NAKICENOVIC N., STEININGER K., GOBIET A., FORMAYER A., KÖPPL A., PRETTENTHALER F., STÖTTER J., SCHNEIDER J. (Hrsg.) (2014): „Österreichische Sachstandsbericht. Klimawandel 2014“ – Wien., 147.

Online: www.hw.oeaw.ac.at/APCC_AAR2014.pdf

MERCER A., KEITH D., SHARP J. (2001): „Public understanding of solar radiation system“. In: Environmental Research Letters 6 (4), 1-2.

NAS (1992). „Policy Implications of Greenhouse Warming. Mitigation, Adaptation, and the Science Base” – Washington D.C.

NEUKERMAN A., COOPER G., FOSTER J., GADIAN A., GALBRAITH L., JAIN S., LATHAM J., ORMOND B. (2014): „Sub-micrometer salt aerosol production intended for marine cloud brightening”. In: Atmospheric Research 142 (o.A.), 159, 165-167.

ORNSTEIN L., ALEINOF I., RIND D. (2009): „Irrigated afforestation of the Sahara and Australian Outback to end global warming“. In: Climatic Change 97 (3-4), 410-412.

POMREHN W. (Hrsg.) (2007): „Heisse Zeiten. Wie der Klimawandel gestoppt werden kann“ – Köln, 27, 44 - 47.

ROBOCK A., MARQUARDT A., KRAVITZ B., STENCHIKOV G. (2009): „Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering”. In: Geographical Research Letters 36 (19), 2, 4-7.

STORCH H., GÜSS S., HEIMANN M. (Hrsg.) (1999): „Das Klimasystem und seine Modellierung“ – Heidelberg, 189.

STRAND S. und BENFORD G. (2009): „Ocean sequestration of crop residue carbon: recycling fossil fuel carbon back to deep sediments“. In: Environmental Science and Technology 43 (4), 1002-1005.

THE ROYAL SOCIETY (Hrsg.) (2009): „Geo-Engineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty” – London o.A., 10-14, 23, 24-26.

THE ROYAL SOCIETY (Hrsg.) (2012): „Marine cloud brightening” – London 370, 4242, 4243.

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2009a): „Klimaänderung. Wichtige Erkenntnisse aus dem 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der Vereinten Nationen (IPCC)“ – Dessau-Roßlau, 11, 12, 28, 32

Online: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3840.pdf

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2009b): „CCS – Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik“ – Dessau-Roßlau, 2-5

Online: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3804.pdf

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2011): „Geo-Engineering. Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?“ – Dessau-Roßlau, 9, 13, 14, 20-30, 25

Online: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4125.pdf

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2011b): „Analyse und Bewertung von Waldprojekten und entsprechender Standards zur freiwilligen Kompensation von Treibhausemissionen” – Dessau-Roßlau, 11.

Online: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3966.pdf

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (Hrsg.) (2006): „Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“ – Berlin, 67, 68.

ZHANG Z., MOORE J., HUISINGH D., ZHAO Y. (2014): „Review of geoengineering approaches to mitigating climate change“. In: Journal of Cleaner Production o.A. (o.A), 2-6.

ZHOU S. und FLYNN P. (2005): „Geoengineering downwelling ocean currents: A cost assessment“. In: Climate Change 71 (1-2), 204, 207-210,212.

Internetquellen

www.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Permafrost [eingesehen am 17.02.2014]

www.cquestrate.com/the-idea/detailed-description-of-the-idea [eingesehen am 25.01.2015]

www.derstandard.at/1381370410820/Mildere-Winter-als-Nachteil-fuer-heimische-Pflanzen [eingesehen am 20.10.2014]

www.effizientduengen.de/files/newsletter.php?id=429 [eingesehen am 22.01.2015]

www.geo.de/GEO/reisen/reiseziele/kanada-opfer-des-klimawandels-58229.html?p=4&eid=61791 [eingesehen am 26.10.2014]

www.green.wiwo.de/klimawandel-studie-hitzewellen-nehmen-drastisch-zu/ [eingesehen am 22.10.2014]

www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/greenpeace_wuestenbildung.pdf [eingesehen am 17.10.2014]

www.lenntech.de/pse/elemente/s.htm [eingesehen am 22.01.2015]

www.naturefund.de/erde/atlas_des_klimas/ursachen/das_sechste_massensterben_der_erdgeschichte.html [eingesehen am 26.10.2014]

www.spiegel.de/wissenschaft/natur/killer-seen-lautloser-tod-aus-der-tiefe-a-540201-2.html [eingesehen am 15.01.2015]

www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article11428453/Erderwaermung-entfacht-immer-mehr-Flaechenbraende.html [eingesehen am 17.10.2014]

www.wmo.int/pages/prog/arep/press_releases/2006/pdf/iwtc_summary.pdf [eingesehen
am 01.01.2015]

Lebenslauf: Christina Eichler-Peña

Persönliche Daten

Geburtsdatum: 22.03.1989

Geburtsort: Wien

Nationalität: Österreich

Familienstand: verheiratet

E-Mail: christina_eichler@gmx.at

Schulische und universitäre Ausbildung

1995-1999	Volkschule Schulbrüder
1999-2008	BRG Schopenhauer
2008-2009	Juridicum: Studium der Rechtswissenschaften
Seit September 2009	Universität Wien: Geographie und Wirtschaftskunde, Tschechisch
Seit September 2011	Universität Wien: Geographie und Wirtschaftskunde, Deutsch

Universitäre Exkursionen

Mai 2014	Tirol: Fachdidaktische Exkursion im Lechtal. Kooperationsprojekt in Zusammenarbeit mit dem BRG Eisenstadt
Juli 2014	Kanada: Fachexkursion nach Westkanada mit physiographischen Schwerpunkt

Oktober 2014 Burgenland: Fachexkursion ins Ost- und Südburgenland mit humangeographischen Schwerpunkt.

Berufserfahrung

November 2011-Juni 2014 Nachmittagsbetreuung BRG Fichtnergasse

Seit September 2014 Sondervertragslehrerin am GWIKU Haizingergasse, für Geographie und Wirtschaftskunde und Deutsch

Zusatzqualifikationen

Sprachkenntnisse:

- Deutsch (Muttersprache)
- Tschechisch (2. Muttersprache)
- Englisch (C1 Niveau)
- Spanisch (A1 Niveau)