

Leuphana Universität Lüneburg

Sommersemester 2019

Major: Lehren und Lernen (B.A.) (Biologie/English)

Erstprüfer: Dr. Thorsten Buck

Zweitprüfer: Dr. rer. nat. Andreas Fichtner

Bachelorarbeit

Ausgewählte anthropogene Einflüsse auf marine Ökosysteme und dessen Folgen
(Anthropocentric impacts on marine ecosystems and their consequences)

Untertitel: Tropische Korallenriffe: Zwischen Tod und Wandel im Anthropozän

Abgabetermin: 12.09.2019

vorgelegt von: Balla, Dorian

[REDACTED]

Studiengang: Lehren und Lernen (GHR)

6. Fachsemester

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Korallenriffe: Wert und Nutzen.....	2
3. Tropische Korallenriffe: hochkomplexe Systeme	3
3.1 Ökosystem Korallenriff	5
3.2 Wechselbeziehungen im Ökosystem Korallenriff.....	8
3.2.1 Mutualismus (Symbiose)	8
3.2.2 Parasitismus.....	9
3.2.3 Kommensalismus/ Parabiose	10
4. Anthropogene Einflüsse auf marine tropische Ökosysteme und die Biodiversität	10
4.1 Ozeanversauerung	11
4.1.1 Ozeanversauerung und die Folgen für tropische Korallenriffe.....	14
4.2 Erwärmung	16
4.2.1 Erwärmung und die Folgen für tropische Korallenriffe	17
4.3 Lokale Stressoren	18
4.3.1 Überfischung	18
4.3.2 Überfischung und die Folgen für tropische Korallenriffe.....	20
4.4 Lokale anthropogene Stressoren und mikrobielle Korallenreaktion	21
4.4.1 Mikrobiom verschiedener Korallenarten.....	23
4.5 Alternative Ökosysteme: <i>regime-</i> und <i>phase shifts</i>	24
4.5.1 <i>Regime</i> und <i>phase shifts</i> : Beispiele aus dem Anthropozän	25
4.6 Synergetische Effekte der anthropogenen Stressoren	29
5. Chancen und Möglichkeiten	31
5.1 Erholung der Korallen am Beispiel Phuket	31
5.2 Maßnahmen zum Schutz von Korallenriffen.....	33
5.2.1 <i>marine protected areas</i>	33
5.2.2 Bedeutung und Funktion der NEOLI-Aspekte hinsichtlich <i>marine protected areas</i>	34
5.2.3 <i>marine protected area-</i> Netzwerke.....	36
5.2.4 Grenzen von <i>marine protected areas</i>	37
6. Fazit	39
7. Literaturverzeichnis	41
8. Anhang.....	46
9. Eidesstattliche Erklärung.....	50

1. Einleitung

Korallenriffe sind einer der wichtigsten Quellen für Artenvielfalt weltweit. Sie werden nicht zu Unrecht als „Regenwälder der Meere“ bezeichnet (s. Anhang Abb. 1). Ein Viertel aller marinen Arten kommen in Korallenriffen vor und daher ist es nicht verwunderlich, dass diese eine enorme Artenvielfalt und hohe Biodiversität besitzen (Frieler et al. 2013; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013).

Im Anthropozän, im Zeitalter des *Homo sapiens*, steigt der Druck auf die Umwelt durch anthropogene Einflüsse. Diese Einflüsse sind beispielsweise Habitatverlust durch Abholzung, landwirtschaftlich genutzte Flächen aber auch Klimaveränderungen, ausgelöst durch den anthropogen erzeugten Klimawandel. Das Ökosystem Korallenriff ist es wert vor diesen Faktoren geschützt zu werden.

Korallenriffe sind nicht nur einzigartige Ökosysteme, sondern stellen einen sehr wichtigen Nutzen für die Menschheit dar. Sie bilden eine Nahrungsquelle und sind z. B. für den Tourismus unabdingbar. Sie sind für circa 100 Mio. Menschen eine unersetzbare Einnahmequelle (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Weitere Ökosystemnutzen tropischer Korallenriffe werden ausführlich im zweiten Kapitel besprochen und dargestellt.

Dreiviertel aller Korallenriffe sind bedroht und könnten bis 2050 oder 2100 ausgestorben sein (Leinfelder 2008). McLeod et al. sprechen dabei von 70 % Verlust der Korallenriffe bis 2050, dabei sind diese Zahlen abhängig von dem Weg, den die Menschheit ab sofort einschlägt (2009). Auch Podbregar und Lohmann sprechen bei einer Erwärmung von 2 Grad Celsius bis zum Jahr 2050 davon, dass etwa 95 % aller vorkommenden Korallen schwer geschädigt sein könnten (2014). Das Problem ist, dass die Menschheit auf dem besten Weg ist diese Erwärmung von 2°C zu überschreiten, daher ist eine sofortige Reduktion des Treibhausgasausstoßes essentiell. Darüber hinaus wird sich die Population in Küstenregionen bis 2050 verdoppeln (Nugues und Ferse 2011). Dies führt zu einer erhöhten Nutzung und Verschmutzung der Küstengewässern, wodurch die Korallenriffe, welche ohnehin kurz vor einem Zusammenbruch stehen, noch stärker belastet werden (Nugues und Ferse 2011).

Diese Daten in Verbindung mit der Erderwärmung bieten Grund zur Besorgnis, dass dieses einzigartige Ökosystem mit all ihren Nutzen für die Menschheit bald nicht mehr bestehen wird. Deshalb fokussiert sich diese Arbeit auf tropische Korallenriffe und anthropogene Einflüsse, sowie die Folgen für Korallenriffe. Die Menschheit muss handeln und zwar sofort. Diese Arbeit soll darstellen wie wichtig es ist dieses einzigartige Ökosystem zu bewahren und welche Möglichkeiten dafür zur Verfügung stehen.

Daher sollen im Folgenden die Ökosystemfunktionen beschrieben werden, damit deutlich wird welchen Nutzen die Menschheit durch Korallenriffe besitzt. Danach wird das Ökosystem Korallenriff als sensibles Geflecht mit vielen verschiedenen Wechselwirkungen näher beschrieben. Dieses sensible Geflecht ist essentiell um die anthropogenen Faktoren besser einordnen zu können, die anschließend Beachtung finden sollen. Die ausgewählten anthropogenen Einflussfaktoren, die hier näher beleuchtet werden, sind die Ozeanversauerung, die Erwärmung der Ozeane und die daraus resultierende Korallenbleiche, sowie lokale Überfischung. Neben der ausführlichen Beschreibung dieser Einflussfaktoren wird sich darauf fokussiert, welche Bedeutung diese verschiedenen Einflussfaktoren besitzen und welche synergetischen Zusammenhänge tropische Korallenriffe schädigen. Nach den verschiedensten Einflussfaktoren sollen Lösungsansätze sowie Ökosystemkonservierungsmaßnahmen angesprochen werden. Unter diesen Lösungsansätzen werden *marine protected areas* (MPAs) näher in den Fokus genommen. Im Allgemeinen soll dabei die Frage diskutiert werden: Inwiefern ist ein Überleben der Korallenriffe im Anthropozän überhaupt noch möglich? Um dieser Frage ein wenig näher zu kommen, müssen die Ökosystemstrukturen sowie der Nutzen der Korallenriffe besser verstanden werden und werden daher in den folgenden Kapiteln ausführlich behandelt.

2. Korallenriffe: Wert und Nutzen

Wir würden uns nicht im Anthropozän befinden, wenn wir keine anthropozentrische Denkweise hätten. Dementsprechend müssen wir uns fragen, wie das Ökosystem Korallenriff für uns oder für mich von Nutzen sein kann. Obwohl die ökologischen Argumente der Artenvielfalt und Biodiversität schon ausreichend sollten, stellt das Ökosystem Korallenriff eine Vielzahl von Ökosystemdienstleistungen für den Menschen dar. Ökosystemdienstleistungen (*ecosystem services*) sind „*Funktionen und Eigenschaften von Ökosystemen, aus denen der Mensch einen Nutzen oder Vorteile zieht und die ihm in der Regel ansonsten aufkommende Kosten einsparen*“ (Begon et al. 2017, S. 513). Dementsprechend stellt sich die Frage, wie das Ökosystem Korallenriff zum Wohlergehen des Menschen beiträgt.

Ökosystemdienstleistungen sind einerseits bereitstellende Dienstleistungen wie Nahrungsmittel, so sind in Asien 25 % des Fischfangs direkt von Korallenriffen abhängig (Begon et al. 2017; Leinfelder 2008). Darüber hinaus gibt es kulturelle Dienstleistungen. Zu diesen zählen Sandstrände, die von Korallenriffen gebildet werden und der gesamte Tourismus der damit zusammenhängt (Begon et al. 2017; Nugues und Ferse 2011). Der Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) spricht davon, dass circa 100 Mio. Menschen direkt vom touristischen Nutzen der Korallenriffe abhängig sind (2006).

Regulierende Dienstleistungen sind diese, die aufkommende Kosten einsparen, da Korallenriffe als Küstenschutz dienen und Schutz vor Stürmen, Wirbelstürmen und Tsunamis bieten (Begon et al. 2017; Nugues und Ferse 2011). Der Tsunami am 26.12.2004 konnte, dort wo

Korallenriffe und Mangroven geschädigt waren, deutlich weiter ins Land vordringen und an diesen Stellen stärkere Schäden anrichten (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006).

Darüber hinaus stellen Korallenriffe eine „blaue Apotheke“ dar (Leinfelder 2008). Sie besitzen pharmazeutisches Potenzial für Schmerzmittel, für Herz-Kreislauf-Erkrankungen, für Antibiotika, für die Krebsforschung und für die Bionik (Leinfelder 2008). Vieles davon befindet sich schon im Einsatz wie der blaue Chemotherapiewirkstoff Ara-C (Cytarabin) oder das hormonähnliche Prostaglandin, welches bei Arthritis, Rheuma, Herz- und Kreislaufleiden und bei Geburtsbeschwerden eingesetzt wird und aus Korallen gewonnen wird (Leinfelder 2008). Der menschliche Körper stößt Korallenskelette kaum ab, weswegen sie sich als Knochenersatz, u.a. in der Gesichtschirurgie und anderen medizinischen Feldern eignen (Leinfelder 2008).

Britischen Ärzten gelang es erstmals einen Daumenknochen nachzuzüchten. Dafür spritzen sie Zellen eines Patienten in ein poröses Korallengerüst, welches die ungefähre Form eines Daumenknochens besaß. Nach zehn Monaten wurde das Gewebe entnommen und obwohl ein Großteil des Implantats noch aus Korallen bestand, wurde schon neuer Knochen gebildet. Daher kann diese Methode bei einer Züchtung von Implantaten oder knöchigen Gliedern helfen (Podbregar und Lohmann 2014).

Der ökonomische Nutzen von Korallenriffen wird auf bis zu 1.2 Millionen US \$ pro Hektar und Jahr beziffert (Schuhmacher und Reinicke 2011). „*Den ökologisch-ökonomischen Dienstleistungswert der tropischen Korallenriffe schätzt man auf ca. 300 Milliarden US \$ pro Jahr*“ (Leinfelder 2008, S. 25). Diese Werte sollen neben der Artenvielfalt verdeutlichen, dass Korallenriffe nicht nur für die Natur einen hohen Nutzen haben, sondern auch für uns. Korallenriffe sind schützenswerte Ökosysteme, die bewahrt werden müssen.

Da der Wert und Nutzen der tropischen Korallenriffe nun ausführlich auf verschiedensten Ebenen dargestellt worden ist, wird anschließend das tropische Korallenriff als hochkomplexes Ökosystem mit zahlreichen Wechselbeziehungen vorgestellt.

3. Tropische Korallenriffe: hochkomplexe Systeme

In diesem Kapitel wird das Ökosystem Korallenriff näher beschrieben. Es werden tropische Korallenriffe von anderen Riffarten abgegrenzt. Zusätzlich werden typische taxonomische Gruppen der tropischen Korallenriffe vorgestellt. Darüber hinaus werden verschiedenste symbiotische, parasitäre und kommensalistische Wechselbeziehungen beispielhaft am Ökosystem Korallenriff erläutert.

Um die anthropogenen Einflüsse auf tropische Ökosysteme verstehen zu können soll das Ökosystem „Korallenriff“ beispielhaft an dieser Stelle erläutert werden. Ein Korallenriff ist

„[...] a marine limestone structure built by calcium-carbonate secreting organisms, which, with its associated water volumes supports a diverse community of predominantly tropical affinities, at a higher density of biomass than the surrounding ocean“ (Hatcher 1997, 78).

Ein Riff ist somit eine Kalkstruktur aus Kalziumkarbonat ausscheidenden Organismen, auch Korallen genannt, welche eine Gemeinschaft bilden, die eine höhere Biomasse als der umgebende Ozean hat. Die höhere Dichte der Biomasse erschließt sich sofort, wenn man bedenkt, dass Korallenriffe auf dem Globus circa eine Fläche von 284.000km² einnehmen. Dies macht nur etwa 1,2 % des Kontinentalschelfs aus und nur 0,1 % der Ozeane (Hempel et al. 2017; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Diese kleine Fläche besitzt aber eine große Artenvielfalt, da sie Lebensraum für ein Viertel aller Arten des Meeres bieten (Frieler et al. 2013; Hempel et al. 2017). Für diese Artenvielfalt sind die Korallen indirekt verantwortlich. Von ihnen sind nur etwa 835 Arten beschrieben, jedoch sollen, durch die 3D-Strukturen, die die Korallen erschaffen, zwischen 0,5 – 2 Mio. Arten dort einen Lebensraum finden (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Der Regenwald besitzt zwar eine enorme Insektendiversität, aber auf der Ebene höherer systematischer Taxa *„repräsentieren tropische Korallenriffe das vielfältigste und diverseste Ökosystem unserer Erde“ (Leinfelder 2003)*. Riffe sind in vielen Fossilfunden nachgewiesen worden und gehören mit zu den ersten strukturformenden Ökosystemen der Erde. Im Cambrium entstanden, gehören Korallenriffe zu den ältesten Gemeinschaften der Erde (Dubinsky und Stambler 2011).

Es können verschiedene Arten von Riffen unterschieden werden: die tropischen Warmwasserriffe und die Tiefwasserriffe. Die Tiefwasserriffe kommen im tiefen und kühlen Wasser unter 20 °C vor. Die Korallen leben in mehreren hundert Metern Tiefe, in denen das Sonnenlicht nicht mehr vordringen kann und ernähren sich von Zooplankton, welches sie aus dem Wasser filtern. Dabei wachsen sie sehr langsam. Somit sind diese Riffe durch Fischfangmethoden, wie Grundschleppnetze bedroht, die ein Riff, welches über Jahrtausende gewachsen ist, in kürzester Zeit zerstören können (Beck 2013).

Die tropischen Korallenriffe finden sich meist zwischen 30 Grad nördlicher Breite und 30 Grad südlicher Breite (Podbregar und Lohmann 2014). Die Wassertemperaturen in diesen Riffen sind dauerhaft über 20 °C, aber sollten 30 °C nicht überschreiten. Es wird zwischen litoralen und neritiden Riffen unterschieden. Litorale Riffe befinden sich in Küstennähe und sind durch Süßwassereinleitung nährstoffreich. Die neritiden Riffe hingegen befinden sich meist fernab vom Kontinent im tropischen Pazifik. Durch die größere Entfernung zu Landmassen haben sie einen niedrigen Nährstoffgehalt und dadurch eine höhere Artenvielfalt. Diese Riffe werden als

die „typischen“ Korallenriffe betrachtet und leben in oligotropher Umgebung (Podbregar und Lohmann 2014).

Es existieren auch *mesophotische* Riffe, die im seichten Wasser beginnen und von 30 Meter Wassertiefe bis 150 Meter in die Tiefe ragen (Loya et al. 2019). Der Begriff *mesophotisch* setzt sich aus dem griechischen *mesos*= *mitten* und *phos-* /*Photos* = *Licht* zusammen und beschreibt ein Riff, welches, sowohl im lichtdurchfluteten Bereich des Meeres auftritt, als auch im dunklen Bereich (Loya et al. 2019). Diese Arbeit wird sich im Folgenden, auf die tropischen Korallenriffe, die in der euphotischen Zone (lichtdurchfluteter Bereich) des Ozeans im seichten oligotrophen (nährstoffarmen) Wasser wachsen, fokussieren.

Die Korallen sind den *Cnidaria* (Nesseltiere) zuzuordnen und gehören zu den *Anthozoa* („*Blumentieren*“) (Campbell et al. 2009). Typisch für *Cnidaria* ist ihr Lebenszyklus als Polyp und Meduse. Bei den *Anthozoa* fehlt allerdings die Medusengeneration vollkommen, darüber hinaus sind sie sessil und koloniebildend (Campbell et al. 2009). Die *Anthozoa* lassen sich in zwei Untergruppierungen einteilen, die *Scleractinia* (Steinkorallen) und die *Octocorallia* (Oktokorallen) zu denen die Leder-, Weiche und Röhrenkorallen gehören. Die *Scleractinia* sind meist hermatypische (riffbildende) Korallen mit einem Exoskelett, da sie ein festes Kalkskelett besitzen. Dahingegen sind die *Octocorallia*, mit wenigen Ausnahmen, ahermatypisch (nicht riffbildend) (Dubinsky und Stambler 2011). Die meisten hermatypischen Steinkorallen lassen sich im lichtdurchfluteten Bereich der Ozeane finden (Dubinsky und Stambler 2011).

Wenn im Folgenden der Begriff „Koralle“ benutzt wird verweist dieser auf die hermatypischen Steinkorallen der Ordnung *Scleractinia*. Das Ökosystem Korallenriff bezieht sich im Folgenden immer auf die tropischen Korallenriffe, die in der euphotischen Zone des Ozeans vorkommen.

3.1 Ökosystem Korallenriff

Das Ökosystem Korallenriff ist ein sehr sensibles Geflecht mit einer Vielzahl an horizontalen sowie vertikalen Interaktionen zwischen den Trophieebenen, wobei diese Interaktionen abhängig von den umgebenden Umweltfaktoren sind (Dubinsky und Stambler 2011). Dabei sind Korallenriffe die strukturell komplexesten und taxonomisch reichsten marinen Ökosysteme (Jackson et al. 2001; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Die engen Umweltbedingungen sind einerseits die Temperatur, denn die tropischen hermatypischen Steinkorallen leben zwischen 20 und 30 Grad Celsius in der euphotischen Zone. Des Weiteren sind sie auf eine Symbiose mit einzelligen endosymbiontisch lebenden Algen (Zooxanthellen), die zum Stamm der *Dinophyten* (*Dinoflagellata*) gehören, angewiesen. Diese Algen, auch Zooxanthellen genannt, gehören zur Familie der *Symbiodiniaceae* und lassen sich der Art *Symbiodinium spp.* zuordnen (Hempel et al. 2017). Durch diese Symbiose wachsen die Korallen samt ihrem Endosymbiont nur nahe der

Wasseroberfläche, wo für die Zooxanthellen genug Sonnenlicht verfügbar ist, um Photosynthese betreiben zu können. Durch die Symbionten ist die Wachstumsrate (Kalzifikationsrate) der Steinkorallen (*Scleractinia*) bis zu zehnmal höher als bei ihren Verwandten, den *Octocorallia* (Schuhmacher 1999). Die Steinkorallen benötigen neben ihren Endosymbionten eine ausreichende Konzentration von Karbonat im Meerwasser, die nur in oligotrophen Gewässern (nährstoffarm) vorzufinden ist (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Dadurch, dass wenig Nährstoffe im Wasser vorhanden sind, ist die Konzentration von Zoo- und Phytoplankton auch gering. Des Weiteren benötigen Korallen sehr klares Wasser ohne trübendes Plankton, mit geringer Sedimentation und eine hohe Sauerstoffkonzentration (Hempel et al. 2017; Podbregar und Lohmann 2014). Die Primärproduktionsrate beträgt pro m² Korallenriff am Tag zwischen 4-7 g photosynthetisch fixierten Kohlenstoff (Hempel et al. 2017). Das bedeutet einen Jahreswert, der über dem Zehnfachen der Nordsee liegt (Hempel et al. 2017). Die Primärproduzenten des Korallenriffs sind die Algen (Zooxanthellen) und die Korallen. Weil Korallenriffe ein stark vernetztes trophisches Gefüge darstellen, findet ein intensives Recycling der primär produzierten Stoffe statt. Der Sauerstoff, produziert von den mutualistischen Protisten (Zooxanthellen), wird durch Konsumenten wie Fische, Krebse, Papageifische und Seeigel verbraucht. Korallen leben tagsüber bei Sonnenlicht durch die Zooxanthellen autotroph und nachts heterotroph, indem sie mit ihren Nesseln/Tentakeln Zooplankton einfangen (Hempel et al. 2017).

Neben den Primärproduzenten sind die Filtrierer, wie Muscheln und Schwämme, essentiell für das Ökosystem. Ein Schwamm kann innerhalb von 4-24 s. so viel Wasser filtern, wie sein eigenes Körpervolumen beträgt (Hempel et al. 2017). Schwämme wandeln organisch aufgenommene Stoffe, wie kleinste Phyto- oder Bakterioplanktonpartikel in leicht assimilierbares Phosphat und Ammonium um, was dazu führt, dass dieses wieder leicht von den Primärproduzenten (Zooxanthellen & Korallen) aufgenommen werden kann (Hempel et al. 2017). Außerdem halten sie durch ihre filternde Funktion das Wasser sauber, sodass kaum trübendes Plankton vorhanden ist, was wiederum die photosynthetische Aktivität der Zooxanthellen stimuliert, wodurch gleichzeitig das Korallenwachstum gestärkt wird.

Das Gleichgewicht zwischen der Kalzifizierung und der Bioerosion ist im Ökosystem Korallenriff besonders wichtig (Hempel et al. 2017). Die Kalzifizierung beschreibt den Vorgang der Koralle Kalziumcarbonat an ihrem äußeren Skelett anzulagern und somit zu wachsen (Leinfelder 2003). Die Bioerosion beschreibt den Abbau von harten Substraten, wie z.B. Kalziumcarbonat, durch biotische Faktoren (Organismen) (Hempel et al. 2017). Diese Organismen werden auch Bioerodierer genannt und sind z.B. Papageifische oder Seeigel. Diese Organismen ernähren sich von dem Kalkskelett der Korallen und scheiden dies wieder als Kalksand aus (Leinfelder 2003). Dieses Sediment lagert sich in Nischen und Höhlen an, welches zur

Festigkeit des Riffes beiträgt, wodurch das gesamte Riff besser vor Umweltfaktoren, z.B. der Brandung, geschützt ist (Leinfelder 2003). Die Bioerodierer halten somit das Gleichgewicht von Kalzifikation und Bioerosion im Gleichgewicht, welches allerdings gestört werden würde, falls zu viele Bioerodierer im Riff vorhanden sind, was ein Wachstum des Riffes verhindern würde (Leinfelder 2003). Bioerodierer tragen außerdem zur Regenerationsfähigkeit des Riffes bei, da Jungkorallen sich auf dem erodierten Substrat optimal anlagern können (Leinfelder 2003). Damit ein Umherschwimmen des lockeren Materials nicht zu einem Abrieb der Korallen führt, werden diese von korallinen Rotalgen überwachsen. Koralline Algen sind kalzifizierende Organismen innerhalb des Benthals. Sie zementieren Karbonatfragmente und wandeln diese in massive Riffstrukturen um, welches sie unabdingbar für ein Riff macht (Umweltbundesamt 2009).

Neben den Bioerodierern gibt es noch die Weidegänger, wozu auch Seeigel und Papageifische gehören. Als Weidegänger werden Tiere bezeichnet, die großflächig pflanzliches Material abgrasen und sich von diesem ernähren. Papageifische ernähren sich von Makroalgen, die auf den Korallen wachsen, beschädigen diese während des Weidens und werden deshalb auch zu den Bioerodierern gezählt. Die Weidegänger halten das wichtigste Gleichgewicht des Riffes, das zwischen Korallen und Makroalgen, intakt, indem sie Makroalgen abweiden und somit die Abundanz dieser gering halten. Makroalgen lagern sich sehr schnell an abgestorbenen und lebenden Korallen an. Ohne Weidegänger würden die Algen die Korallen mitsamt ihren symbiontischen Zooxanthellen überwuchern, was zu einem Tod der Koralle führen würde (Leinfelder 2003).

Neben den Herbivoren gibt es in gesunden Korallenriffen auch Riffhaie. Sie spielen eine wichtige Rolle als natürliche Selektoren im Ökosystem Korallenriff, denn sie fressen die Tiere, die sich am Schlechtesten angepasst haben. Dadurch können sich dann wiederum niedrigere trophische Stufen, wie Papageifische schneller anpassen. Darüber hinaus jagen sie Papageifische und halten somit den Bestand an Bioerodierern im Gleichgewicht. Hier wird deutlich wie verflochten und sensibel das Ökosystem Korallenriff ist (Begon et al. 2017).

Neben den Trophiestufen existiert ein sensibler Zyklus von Riffen mit abgeschlossenen Lagunen. Dieser soll hier näher beschrieben werden (s. Anhang; Abb. 2). Die Zooxanthellen geben photosynthetisch gebundenen Kohlenstoff an die Steinkorallen ab. Dieser Kohlenstoff wird in Form von Schleim von den Korallen ausgesondert. Dieser Schleim wird zu 56-80 % von der Brandung von den Korallen abgelöst. Etwa die Hälfte des Kohlenstoffs, der eine Nahrungsgrundlage für Bakterien und Algen der planktonischen Nahrungskette ist, liegt dann gelöst im Wasser vor. Außerdem sinkt der Kohlenstoff zu Boden, der dadurch den benthalen Metabolismus (Stoffwechsel) stimuliert. Der ungelöste Kohlenstoff liegt als Schleim an der Wasseroberfläche vor und sinkt zu Boden, da sich Partikel darin verfangen, wodurch erneut der benthale

Metabolismus gefördert wird. Organisches Material sinkt auf den Boden der Lagune und wird dort im permeablen Sediment der Lagune zersetzt, wodurch Nährstoffe frei werden, die die Korallen für ihr autotrophes Wachstum und die symbiontischen Algen für die Photosynthese benötigen (Wild et al. 2004).

3.2 Wechselbeziehungen im Ökosystem Korallenriff

Das Ökosystem Korallenriff hat eine unglaubliche Vielzahl an verschiedenen Lebensgemeinschaften hervorgebracht. Darunter eine Vielzahl von verschiedensten Wechselbeziehungen. Die Wechselbeziehungen werden in intraspezifische und interspezifische Wechselbeziehungen unterteilt. Die intraspezifische Wechselwirkung beschreibt, wenn zwei Individuen derselben Art eine Wechselwirkung eingehen. Interspezifische Wechselwirkungen beschreibt den Vorgang an dem zwei Individuen, aber von verschiedenen Arten beteiligt sind (Campbell et al. 2009). Im Folgenden werden einige ausgewählte interspezifische Beziehungen vorgestellt und näher erläutert.

3.2.1 Mutualismus (Symbiose)

„Als Symbiose oder Mutualismus bezeichnet man eine interspezifische Wechselwirkung, die beiden Arten einen Vorteil bringt.“ (Campbell et al. 2009, S. 1617)

Ein klassisches Beispiel für eine mutualistische Wechselbeziehung bietet das Verhältnis von Korallen und Algen. Korallen bieten eine sichere und geschützte Umgebung für die Algen und diese versorgen die Korallen im Gegenzug mit Nährstoffen (Podbregar und Lohmann 2014). Die Zooxanthellen geben photosynthetisch gebundenen Kohlenstoff, Glucose, die Aminosäure Alanin und Lipide an die Korallen ab, welche diese benötigen, um Schleim produzieren zu können (Leinfelder 2003; Wild et al. 2004). Dieser Schleim schützt die Korallen vor dem Austrocknen bei Luftkontakt oder geringer Tide (Wild et al. 2004). Die Zooxanthellen bieten der Koralle auch einen Schutz vor Photooxidation des Korallengewebes durch ihre Chlorophyll-Pigmente, die den weißen Skeletten ihre üppigen Farben verleihen (Leinfelder 2003). Die Algen versorgen die Korallen darüber hinaus mit ausreichend Sauerstoff.

Die Zooxanthellen benötigen Kohlenstoffdioxid. Diesen entziehen sie dem Wasser, wodurch die Kohlenstoffdioxidkonzentration sinkt, welches wiederum der Koralle die Ausscheidung von Kalziumcarbonat (Kalzifizierung) erleichtert. Die Koralle gibt im Gegenzug Kohlenstoffdioxid, Stickstoff- und Phosphorverbindungen an die Zooxanthellen ab. Die meisten Steinkorallen würden ohne die mutualistischen Protisten nicht überleben können (Leinfelder 2003). Im Gegenzug hätten die Algen im oligotrophen Wasser nicht genügend Nährstoffe um zu wachsen und kein Substrat, an dem sie sich anlagern könnten. Daher ist dies ein obligater Mutualismus (Eusymbiose), da die Symbiose für beide Partner überlebensnotwendig ist (Campbell et al.

2009). Darüber hinaus handelt es sich um eine Endosymbiose, da die Symbionten (Zooxanthellen) im bzw. auf dem Körper der Wirte leben (Campbell et al. 2009).

Eine weitere Symbiose im Korallenriff stellt die Symbiose zwischen der Seeanemone (*Actinaria*) und den Anemonenfischen (*Amphirion*), häufig auch Clownfische genannt, dar (Campbell et al. 2009). Seeanemonen gehören, wie die Korallen, zu den *Cnidaria* und sind somit Nesseltiere. Sie besitzen giftige Nesseln mit der sie ihre Beute betäuben und daraufhin verspeisen können (Sadava et al. 2019). Der Anemonenfisch ist der einzige Vertebrata (Wirbeltiere), der sich der Seeanemone nähern kann ohne betäubt zu werden. Allerdings ist er jedoch nicht von Geburt an geschützt. Um in Symbiose mit der Seeanemone leben zu können, wählt der Anemonenfisch eine Seeanemone aus und beginnt länger um sie herumzuschwimmen. Die Tentakel der Seeanemonen sind mit einem giftigen und betäubendem Schleim überzogen, welches nur bei ausreichendem Kontakt von der Seeanemone freigesetzt wird (Nedosyko et al. 2014). Der Anemonenfisch gewöhnt sich an diesen Schleim und reproduziert im Folgenden die molekulare Struktur des Schleims, wodurch die Seeanemone diesen nicht als Fremdkörper erkennt (Nedosyko et al. 2014). Ist dieser Vorgang vollzogen, kann die eigentliche Symbiose beginnen. Die Seeanemone bietet dem Anemonenfisch Schutz vor Fressfeinden, wohingegen der Anemonenfisch die Seeanemone sauber hält und ihr sauerstoffreiches Wasser zufächelt (Sadava et al. 2019).

3.2.2 Parasitismus

Beim Parasitismus handelt es sich um eine Wechselbeziehung, in der sich eine Art vom Zellinhalt, vom Gewebe oder von Körperflüssigkeiten seines Wirtes ernährt (Campbell et al. 2009). Der Parasit schädigt dem Wirt, tötet diesen jedoch meist nicht. Es werden zwei unterschiedliche Arten von Parasiten unterschieden: die Ektoparasiten und die Endoparasiten (Sadava et al. 2019).

Die Ektoparasiten leben auf dem Körper des Wirtes, bei Fischen an den Flossen oder den Kiemen. Endoparasiten leben im Körperinneren des Wirtes, meistens in der Blutbahn oder in Organen (Campbell et al. 2009). Häufig sind Ektoparasiten auf Fischen in Korallenriffen zu finden, deshalb gibt es dort Lippfische oder Putzergarnelen. Diese Tiere findet man an *Putzstandorten* im Korallenriff zu denen Räuber schwimmen, um sich von diesen reinigen zu lassen. Die Lippfische fressen Parasiten von der Hautoberfläche der Räuber ab. Die Lippfische bekommen Nahrung und Schutz, indem sie die Parasiten fressen und durch die Räuber vor anderen Fressfeinden geschützt sind. Die Räuber wiederum werden von den Parasiten befreit. Somit ist neben der parasitären Wechselbeziehung von Parasiten und Räufern eine klassische Symbiose zwischen Räufern und Lippfischen vorzufinden. (Begon et al. 2017).

3.2.3 Kommensalismus/ Parabiose

Beim Kommensalismus oder der Parabiose handelt es sich um eine Wechselbeziehung in der eine Art profitiert und die andere Art nicht erkennbar geschädigt wird oder keinen Nutzen davonträgt (Campbell et al. 2009; Sadava et al. 2019). Wenn es sich um eine Nahrungsbeziehung handelt, handelt es sich um einen Kommensalismus (Campbell et al. 2009). Lange Zeit wurde davon ausgegangen, dass die Beziehung zwischen Seeanemone und Anemonenfisch parabiologisch ist, da auf den ersten Anschein nur der Anemonenfisch Vorteile hatte. Dies wurde allerdings widerlegt, da der Anemonenfisch die Anemone sauber hält und ihr sauerstoffreiches Wasser zu wedelt (Begon et al. 2017).

4. Anthropogene Einflüsse auf marine tropische Ökosysteme und die Biodiversität

Anthropogene Einflüsse auf marine tropische Ökosysteme sind vielfältig und werden daher in lokale und globale Einflüsse unterschieden (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006).

Zu den lokalen Stressoren gehören destruktive Fischereimethoden, wie Dynamit, Zyanid oder schwere Fischereigeschirre sowie schlechtes Landmanagement (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Durch schlechtes Landmanagement gelangen Schadstoffe, Nährstoffe und Sedimente in Küstengewässer und schaden Korallenriffen. Globale Stressoren sind Folgen des Klimawandels, wie die Ozeanversauerung oder die Erwärmung der Ozeane.

Zusätzlich können die Stressoren weiter in akute (kurzzeitige) und chronische (längere Zeiträume) aufgeteilt werden. Akute Stressoren sind Zyklone, kurzzeitige Massenausbrüche des corallivoren *Acanthaster planci* (Dornenkronenseesternen), die Korallenbleiche und destruktive Fischereimethoden. Chronische Stressoren sind die Verschmutzung der Meere, die natürliche, sowie die anthropogene Sedimentation die auf Riffe einwirkt, die Überfischung sowie die Versauerung und Erwärmung der Meere (Osborne et al. 2017).

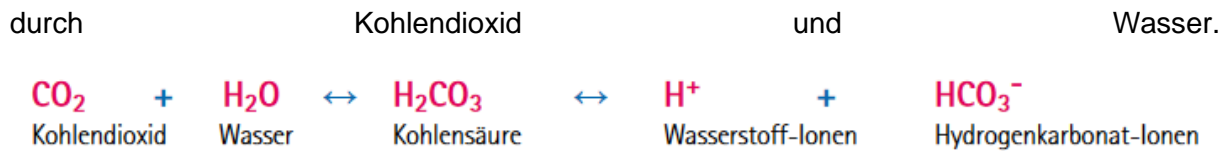
Im Folgenden werden zuerst die globalen chronischen Stressoren vorgestellt (Ozeanversauerung und -erwärmung) sowie die Folgen dieser für die Korallenriffe. Anschließend werden lokale Stressoren, wie die Überfischung und Eutrophierung ausführlich behandelt. Darüber hinaus wird die mikrobielle Reaktion der Korallen auf all diese Stressoren näher beleuchtet. Dann soll das *worst-case-Szenario* für Korallenriffe, ein *phase shift* beispielhaft dargestellt werden und die synergetischen Effekte aller Stressoren.

4.1 Ozeanversauerung

Durch die Lebensweise der Menschheit in den letzten Jahrzehnten wurde der Erde stark geschadet. Der Treibhauseffekt und der Klimawandel sind allgegenwärtig wie nie zuvor in der Geschichte. Ein Phänomen, ausgelöst durch den Klimawandel, das Einfluss auf die Ozeane hat, ist die Ozeanversauerung. Die Ozeanversauerung beschreibt den Prozess der Versauerung der Meere. Vor der Industrialisierung herrschte ein Gleichgewicht zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre. Die Ozeane gaben Kohlenstoff an die Atmosphäre ab, etwa dieselbe Menge, die in Form organischen Materials über die Flüsse wieder ins Meer gelangte (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Da der abgegebene, organische Kohlenstoff über die Photosynthese aus der Atmosphäre gebunden wurde, herrschte ein Gleichgewicht, welches durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern aus dem Gleichgewicht geriet (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Das Meer wurde so zu einer CO₂ Senke (CO₂-Speicher) (IPCC-Koordinierungsstelle 2018).

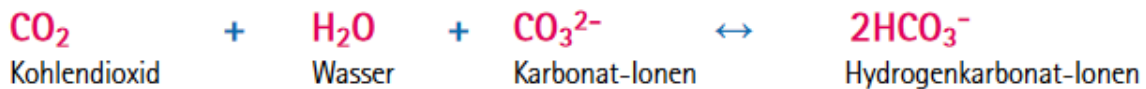
Die atmosphärische CO₂-Konzentration ist auf Grund der Verbrennung der fossilen Energieträger so stark gestiegen, dass die Atmosphäre einen höheren Partialdruck als die Ozeane hat. Dieser erhöhte Partialdruck führt dazu, dass die Atmosphäre solange CO₂ an die Ozeane abgibt, bis der Partialdruck zwischen Atmosphäre und Ozean ausgeglichen ist (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Das aufgenommene CO₂ wird im Wasser teilweise gelöst, wodurch Kohlensäure entsteht, als Folge sinkt der pH-Wert des Wassers. Da sich der Säurehaushalt der Meere durch diesen Effekt verändert und die Meere saurer werden, wird dieser Vorgang Versauerung der Meere genannt.

Der gespeicherte Kohlenstoff liegt im Meer in unterschiedlichen chemischen Formen vor. Der kleinste Teil ist in der Biosphäre und organischen Verbindungen zu finden, wohingegen der größere Teil in Form von anorganischen Verbindungen (dissolved inorganic Carbon; DIC) vorliegt (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Diese anorganischen Verbindungen sind in 1 % gelöstes CO₂, 91 % Hydrogencarbonat-Ionen (HCO₃⁻) und 8 % Karbonat (CO₃²⁻) aufgeteilt (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Von diesen kann nur CO₂ mit der Atmosphäre ausgetauscht werden. Durch den Eintrag des CO₂ in das Oberflächenwasser der Meere entsteht dort ein erhöhter CO₂ Partialdruck, was zur Folge hat, dass zwei wichtige chemische Reaktionen vermehrt auftreten. Eine Reaktion ist die Entstehung von Kohlensäure



Graphik 1 (BIOACID 2012, S. 6)

Diese Reaktion setzt Wasserstoff-Ionen und Hydrogencarbonat-Ionen frei. Die Wasserstoff-Ionen führen zu einer Senkung des pH-Wertes (Versauerung der Meere).

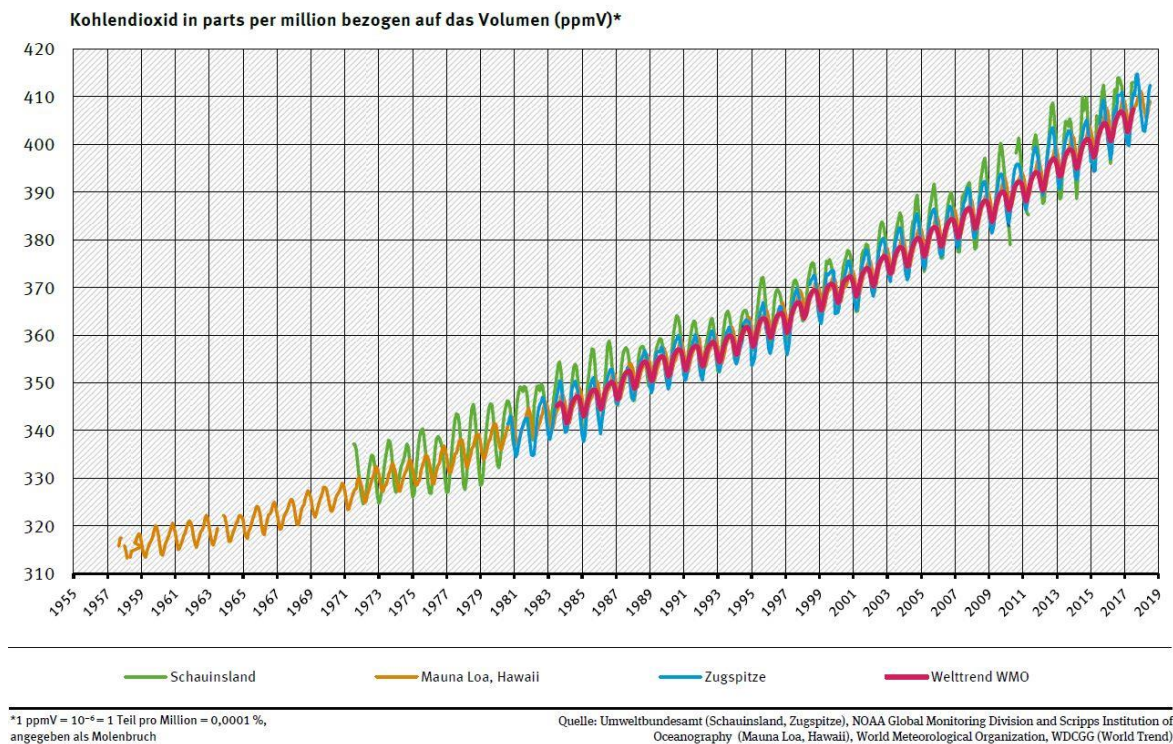


Graphik 2 (BIOACID 2012, S. 6)

Die zweite Reaktion beschreibt die Bildung von Hydrogencarbonat durch Kohlendioxid und Wasser unter Verbrauch von Karbonat-Ionen. Durch die erhöhte CO₂ Konzentration in den Ozeanen verschiebt sich das Gleichgewicht zugunsten von Hydrogencarbonat und zu Ungunsten von Karbonat, da Karbonat für die Reaktion benötigt wird und Hydrogencarbonat entsteht. Dies hat zur Folge, dass die Karbonatkonzentration an der Meeresoberfläche seit der Industrialisierung um 10 % gesunken ist (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Der pH-Wert ist durch diesen Effekt seit der Industrialisierung um 0,11, von einem pH-Wert von 8,21 auf 8,1, gesunken (Hughes et al. 2017; Pachauri und Mayer 2015; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Dieser Wert entspricht einer Zunahme des Säuregehaltes um 30% (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Passend zu diesen Ausführungen ist im IPCC-Bericht von einer Zunahme des Säuregehalts um 26% die Rede (Pachauri und Mayer 2015).

Jährlich führt der erhöhte CO₂-Partialdruck dazu, dass der Ozean 7,3 Gigatonnen (GT) CO₂ aus der Atmosphäre aufnimmt (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Im Vergleich dazu wurden 2010 knapp 49 Gigatonnen Treibhausgase ausgestoßen, wovon 76% durch CO₂ verursacht ist, was einem Wert von 37,24 GT CO₂ entspricht, wovon Ozeane jährlich circa 15% aufnehmen (s. Anhang; Abb. 3) (Pachauri und Mayer 2015; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Ungefähr ein Viertel der anthropogenen CO₂-Emissionen wurden bisher von den Ozeanen aufgenommen (Mathesius et al. 2015). In anderen Quellen wird sogar von einem Drittel gesprochen (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013).

Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittel)



Graphik 3 (Umweltbundesamt 2019)

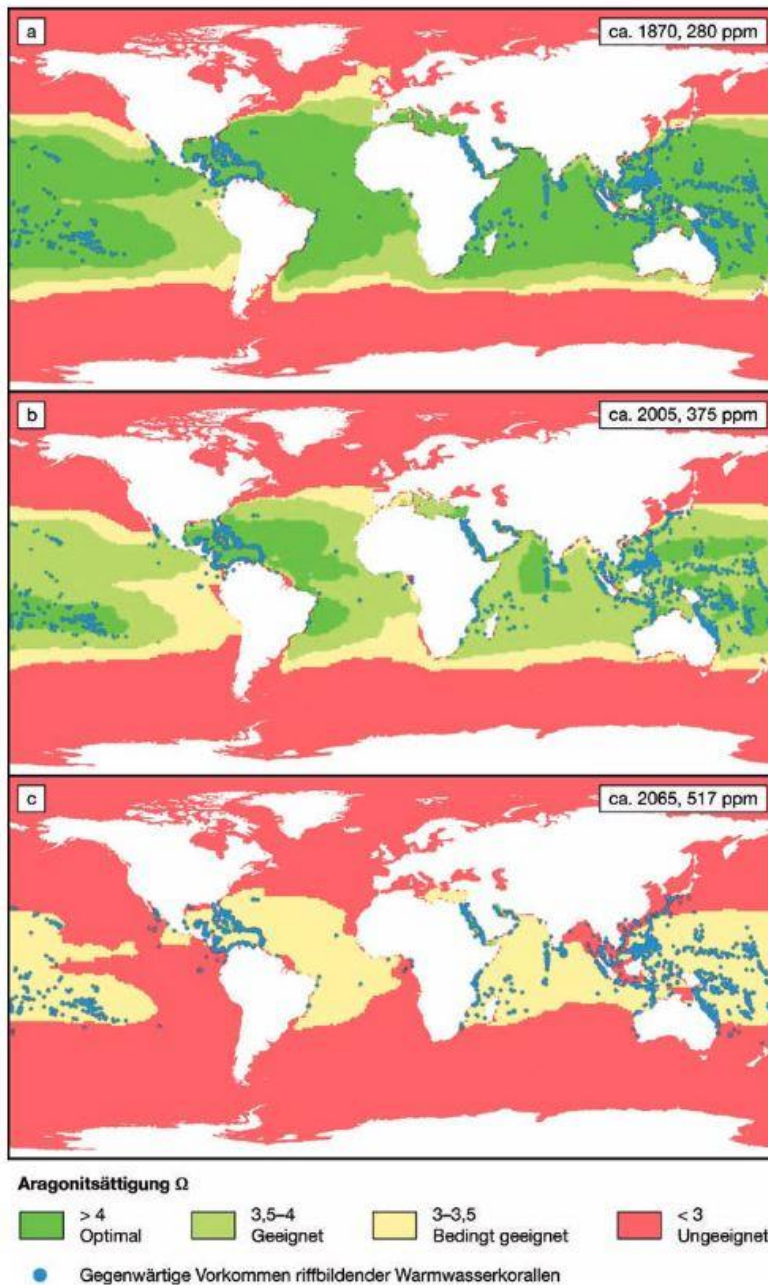
Neben dem totalen Treibhausgasausstoß ist es jedoch zusätzlich entscheidend, welche CO₂ Sättigung in der Atmosphäre herrscht. Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre lag die letzten 650.000 Jahre bis zum Beginn der Industrialisierung bei 200- 300 parts per million (ppm) (Schuhmacher und Reinicke 2011). Die folgende Graphik 3 beschreibt wieviel Kohlendioxid Partikel pro Millionen Luftmoleküle (ppm) über einen Zeitraum von 64 Jahren in der Atmosphäre vorkommen. Die kurzzeitigen Schwankungen des Graphen sind durch Sommer und Winter zu erklären. Im Winter steigt die CO₂ Konzentration kurzzeitig, da die Photosyntheseleistung der Pflanzen eingeschränkt ist und der gebundene Kohlenstoff freigesetzt wird. Der Wert im Jahre 2018 lag bei einem Durchschnittswert von 407,38 ppm (Umweltbundesamt 2019). Pro 100 ppm CO₂ Anstieg in der Atmosphäre steigt der pH-Wert der Meere um circa 0,07%. Das würde bei einer Konzentration von 800 ppm im Jahre 2100 ein Absinken um 0,3 Einheiten bedeuten. Dennoch geht der Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) davon aus, dass nur eine Begrenzung der atmosphärischen CO₂ Konzentration auf nicht mehr als 450 ppm das Risiko großer Änderungen in den Meeresökosystemen vermeiden könnte (2006). Die Menschheit ist auf dem besten Weg diese Werte weit zu überschreiten. Von 2010 – 2019 ist die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre um 20 ppm gestiegen. Hält dieser Trend an, wird Mitte des Jahrhunderts eine Kohlendioxid-Konzentration von 500 ppm und Ende des Jahrhunderts eine Konzentration von über 800 ppm sehr wahrscheinlich sein. Die Folgen dieser Werte für Korallenriffe werden im Folgenden näher erläutert.

4.1.1 Ozeanversauerung und die Folgen für tropische Korallenriffe

Die Korallen wachsen durch die Kalzifizierung. Bei der Kalzifizierung nehmen die Korallen gelöste Kalziumverbindungen aus dem Meer auf und wandeln diese in Aragonit (eine Form von Kalziumcarbonat/ CaCO_3 /Kalk) um, wodurch ihr Skelett entsteht (Roder, C. & Heiss, G. A. 2016; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Für diesen Vorgang benötigen die Korallen eine Übersättigung des Meeres mit Karbonat-Ionen, aber da die oben erwähnte Reaktion Karbonat-Ionen verbraucht, sinkt durch die Versauerung die Anzahl der Karbonat-Ionen im Meer.

Kalk kommt im Meer in zwei Formen vor: Aragonit und Kalzit. Aragonit ist leichter löslich als Kalzit und ist für die Korallen von entscheidender Bedeutung. Korallen benötigen für die Kalzifizierung eine Aragonitübersättigung im umgebenden Medium (dem Meer) (Roder, C. & Heiss, G. A. 2016). Wenn diese Aragonitübersättigung nicht vorhanden ist, trägt das gebildete Aragonit der Koralle nicht mehr zu einem Wachstum bei, sondern wird direkt in der Umgebung, im Meer, gelöst, sodass eine Kalzifizierung der Koralle nicht mehr stattfinden kann (Roder, C. & Heiss, G. A. 2016). Diese Aragonitübersättigung ist nicht mehr gegeben, wenn eine atmosphärische CO_2 -Konzentration von 480 ppm vorherrscht (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Das Umweltbundesamt spricht dabei von Zahlen bis 520 ppm (2009). Der WWF spricht in diesem Zusammenhang davon, dass Korallenriffe eine CO_2 Konzentration von 350 – 400 ppm benötigen um vollständig erhalten zu bleiben und schon bei 400-500 ppm aufhören zu wachsen (2013). Diese Werte würden bedeuten, dass die Durchschnittswerte 2018 von 407,38 ppm (Umweltbundesamt 2019) schon jetzt dazu führen würden, dass die Korallenriffe nicht mehr wachsen. Diese These wird dadurch unterstützt, dass die Kalzifizierung und somit die Wachstumsrate der Korallen durch die Versauerung der Meere um 6-11% eingeschränkt ist (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Andere Quellen wie Podbregar und Lohmann sprechen davon, dass die Rate seit 1990 um 15-20 % abgenommen habe (2014).

Des Weiteren spielt die Wassertemperatur für die Bindung des CO_2 eine entscheidende Rolle. Daher sind pauschale Aussagen über eine CO_2 - Konzentration mit Vorsicht zu betrachten. Je kälter das Wasser ist, desto mehr CO_2 kann gebunden werden und je wärmer das Wasser ist, desto weniger CO_2 kann gebunden werden. Somit wird ein Aragonit- Defizit erst in den kälteren Regionen der Erde stattfinden, wie Graphik 4 veranschaulicht.



Graphik 4 (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen 2006, S. 73)

In Graphik 4 ist der Zusammenhang zwischen Aragonit-sättigung und CO²-Konzentration der Atmosphäre zu erkennen. Außerdem lässt sich gut erkennen, wie sich die Aragonitübersättigung im Laufe der Zeit verändert hat bzw. verändern wird: Mitte des 21. Jahrhunderts werden bei einer CO²-Konzentration von 517 ppm alle jetzigen Riffstandorte ungeeignet oder nur noch bedingt geeignet für Korallenriffe sein (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale

Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Diese Werte beziehen sich lediglich auf den Stressor der Ozeanversauerung. Ein Problem, dass durch die Versauerung der Meere entstehen könnte, ist ein Ungleichgewicht zwischen Kalzifizierung und Bioerosion im Ökosystem Korallenriff. Die korallinen Algen werden durch

den verringerten pH-Wert in Reproduktions- und Wachstumsrate gehemmt und dadurch wird auch die Bioerosion, die auf Riffe einwirkt, stärker werden (WWF 2013). Durch die Versauerung der Meere sinkt die Wachstumsrate der Korallenriffe und gleichzeitig steigt die Bioerosion, wodurch Korallenriffe schneller abgebaut als aufgebaut werden.

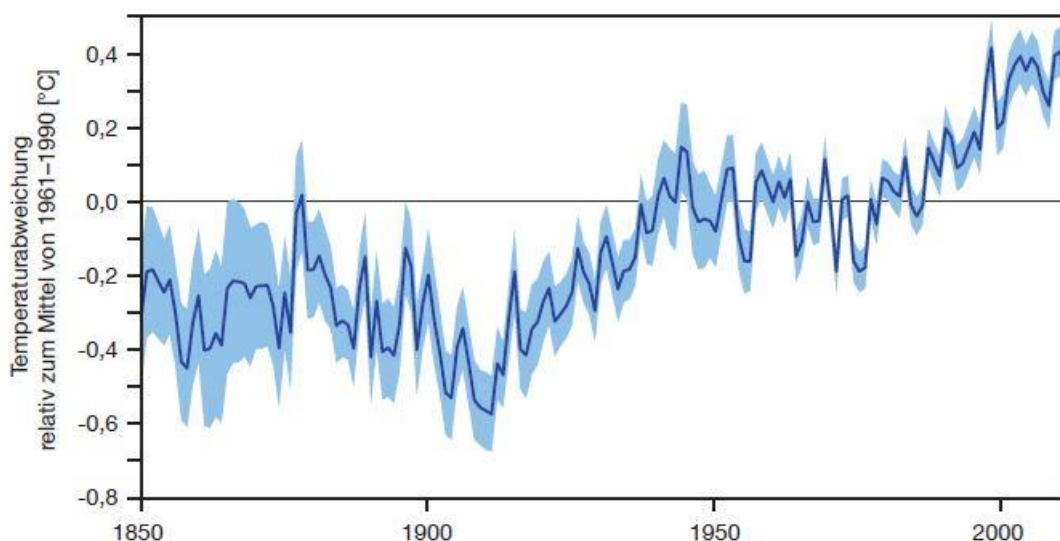
4.2 Erwärmung

Die Erwärmung der Meere ist ein zusätzlicher Faktor des Klimawandels und wirkt auf globaler Ebene auf die Meere ein. Viele haben bei Erwärmung die gesetzten Klimaziele der COP 21 in Paris im Gedächtnis und denken nun an die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C. Dennoch muss hier differenziert werden, denn

„Die Erwärmung des Ozeans dominiert den Zuwachs der im Klimasystem gespeicherten Energie und macht mehr als 90 % der zwischen 1971 und 2010 akkumulierten Energie aus [...], während lediglich 1% in der Atmosphäre gespeichert wurde.“ (Pachauri und Mayer 2015, S. 40)

Man könnte also vermuten, dass sich die Ozeane stärker erwärmen als die Atmosphäre, aber durch die enorme Wärmespeicherkapazität der Ozeane erwärmen sich diese langsamer als die Landmassen, die eine geringere Wärmespeicherkapazität besitzen. Dadurch sind die Klimaziele der COP 21 auf die Lufttemperatur bezogen und dürfen nicht mit der Zunahme der Wassertemperatur verwechselt werden (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006).

Eine absolute Zunahme der Wassertemperatur von 0,44°C zu 0,79°C von 1950 bis 2009 beschreibt der Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Dieser untersuchte außerdem sieben tropische Regionen mit Korallenvorkommen, wobei die Messungen eine Erwärmung im gesamten 20. Jahrhundert von 0,7-1,7 °C ergaben (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Auf die tropischen Regionen der Erde bezogen ist die durchschnittliche Ozeanoberflächentemperatur (sea surface temperature, SST) von 1880 bis 2015 um 0,57 Grad gestiegen (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006).



Graphik 5 (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013, S. 45)

In der Graphik 5 sind die relativen Temperaturabweichungen zum Mittelwert von 1961-1990 dargestellt. Dabei fällt auf, dass seit ca. 1980 die Rate, mit der die Wassertemperatur zunimmt, ansteigt. Außerdem sind die drei Wassertemperaturspitzen kurz vor 2000 und kurz danach gut zu erkennen, die sich direkt zur sogenannten Korallenbleiche verbinden lassen (Hoegh-Guldberg et al. 2014). Im Folgenden werden die konkreten Folgen der Erwärmung für das Ökosystem Korallenriff beschrieben.

4.2.1 Erwärmung und die Folgen für tropische Korallenriffe

Durch Schlagzeilen wie „*Korallenbleiche: den Korallen bleibt keine Zeit mehr*“ (ZEIT ONLINE 2018) oder „*Der bleiche Tod des Great Barrier Reefs*“ (Ring 2017) erreicht die Problematik zunehmend mediale Aufmerksamkeit. Die Korallenbleiche ist der Vorgang bei dem die Korallen ihre Symbionten, die Zooxanthellen abstoßen. Dies wird durch die vorliegenden Umweltverhältnisse, vor allem die Temperaturspitzen ausgelöst und führt dazu, dass die Zooxanthellen eine gestörte photosynthetische Aktivität haben, was die Entstehung von Sauerstoffradikalen begünstigt, die toxische Wirkungen auf die Korallen haben (Roder, C. & Heiss, G. A. 2016; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Dadurch stoßen die Korallen, die färbenden Zooxanthellen ab und das weiße Kalkskelett bleibt zurück (s. Anhang Abb. 4). Dieser Vorgang muss nicht unbedingt den Tod für die Koralle bedeuten, denn wenn die Temperatur wieder sinkt, können sich erneut Zooxanthellen anlagern (Stuart-Smith et al. 2018). Falls die Wassertemperatur aber zu lange auf so einem Temperaturmaximum bleibt, stirbt die Koralle aufgrund von Nährstoffmangel ab (Stuart-Smith et al. 2018). Die tropischen Korallen leben nah an der Grenze ihrer Maximaltemperatur (ca. 30 °C), wodurch sie besonders anfällig für Temperaturschwankungen sind (Hoegh-Guldberg et al. 2014). So liegt der Schwellenwert für das Auslösen einer Korallenbleiche an vielen Standorten nur 1-2 °C über dem Maximum der Sommertemperatur (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Derzeit sind etwa 75 % aller Riffe von der Korallenbleiche bedroht (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Die Korallenbleiche 2015/2016 war bisher die stärkste zu verzeichnende Korallenbleiche und führte zu einer Abnahme der Ökosystemfunktionen und der Riffproduktivität (Ryan et al. 2019).

Durch chronische Stressoren ist die Fähigkeit der Resilienz geschwächt (Osborne et al. 2017). Die Resilienz wird definiert, als die Fähigkeit eines Riffs den Störungen zu widerstehen und nach einer Störung die Wiederherstellung eines korallendominierten Systems (Hughes et al. 2017). Ein wichtiger Faktor hinsichtlich der Gesundheit der Riffe ist die Regenerationszeit der Riffe. So ist ein Kernfaktor des Resilienzvermögens die benötigte Erholungsphase der Riffe, ohne erneute Unterbrechungen durch akute oder chronische Stressoren (Hughes et al. 2019; Osborne et al. 2017). Durch den thermalen Stress und die damit einhergehende

Korallenbleiche ist die Wachstumsrate der Korallen (Kalzifizierung) sowie deren Reproduktion gesunken (Osborne et al. 2017). Die Folgen einer Korallenbleiche können zu einem *phase shift* führen, das Umkippen eines Korallendominierten Ökosystem in ein Makroalgendominiertes Ökosystem. Dieser Vorgang wird in Kapitel 3.5 ausführlich behandelt.

4.3 Lokale Stressoren

Nachdem ausführlich die Auswirkungen globaler Faktoren beleuchtet wurden, wird sich im Folgenden auf lokale Stressoren wie die Überfischung fokussiert und die damit einhergehenden Folgen für Korallenriffe. Neben der Überfischung wird auch die Eutrophierung kurz beleuchtet.

4.3.1 Überfischung

Ökosysteme im Anthropozän müssen sich immer stärker anpassen und sich gegen anthropogene Stressoren behaupten, wodurch die Resilienz der Ökosysteme zu einem entscheidenden Faktor wird. Die Resilienz beschreibt die Fähigkeit eines Ökosystems sich an Veränderungen der Umwelt anzupassen bzw. zu bestehen (Y. Sawall 2010). Ob sich ein Ökosystem anpassen kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Generell gilt: je höher die genetische Vielfalt und je artenreicher die Ökosysteme sind, desto höher ist die Resilienz dieser und desto größeres Potenzial haben diese sich dem Klimawandel anzupassen (Campbell et al. 2009; Umweltbundesamt 2009; Y. Sawall 2010). So können gesunde Fischbestände auf natürliche Stressoren wie Populationsverschiebungen oder Veränderungen der Ökosystemstrukturen gut reagieren und sind resilient (Hoegh-Guldberg et al. 2007; Umweltbundesamt 2009).

Die Überfischung beschreibt, „[...] die dauerhafte Dezimierung von Fischbeständen durch Fischfang, dessen Umfang das natürliche Nachwachsen [...] übersteigt.“ (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013, S. 42) Bei einer Überfischung existiert nur noch ein kleiner Bestand, weshalb die erforderliche Mindestanzahl an reproduktionsfähigen Tieren leicht unterschritten werden kann. Diese reduzierten Bestände sind durch die verringerte genetische Vielfalt anfälliger für Klimaveränderungen (Umweltbundesamt 2009). Obwohl es eine völkerrechtliche Vereinigung der UN zu einem *Fish Stock Agreement* gibt, das dem Verhaltenscode der FAO (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen) für verantwortungsvolle Fischerei folgen soll, wird diese Vereinigung meist nicht eingehalten. In diesem Vertrag ist beschrieben, dass Nationen irreversible Effekte durch Fischerei vermeiden sollen um marine Ökosysteme zu erhalten.

„[...] Conscious of the need to avoid adverse impacts on the marine environment, preserve biodiversity, maintain the integrity of marine ecosystems and minimize the risk of long-term or irreversible effects of fishing operations, [...]“ (UNITED NATIONS CONFERENCE ON STRADDLING FISH STOCKS AND HIGHLY MIGRATORY FISH STOCKS 1995, S. 2)

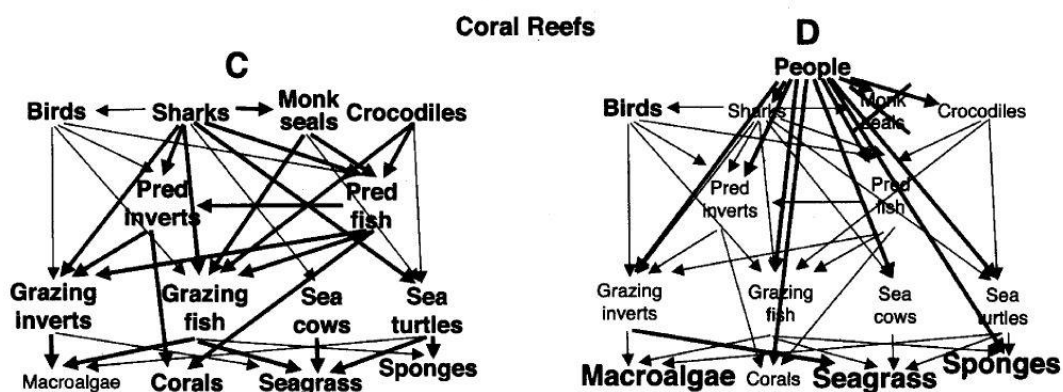
Die Umsetzung dieses Vertrages sieht in der Praxis allerdings anders aus, da sich durch Überfischung zwei Drittel der globalen Fischbestände wieder erholen müssen (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Obwohl Lösungen bekannt sind und politische und ökonomische Konzepte stehen, mangelt es meist an deren Umsetzung.

Marine Ökosysteme haben einen MSY: Der *maximum sustainable yield*, der höchstmögliche Dauerertrag eines Ökosystems ohne langfristige Schäden davonzutragen (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Problematisch ist, dass das Ziel in den meisten Ökosystemen ist, an diese Grenze des Fischereiertrages, des MSY, zu gelangen. Dabei sind 30 % der globalen Fischbestände überfischt und 57 % werden nach dem MSY voll ausgeschöpft (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Dies könnte zu einer Ausrottung von Spezies führen, da überfischte Populationen nicht mehr signifikant mit anderen Spezies der Gemeinschaft interagieren (Jackson et al. 2001). Beifang und destruktive Fischereimethoden wie die Grundschleppnetzfisherei, Dynamit oder Zyanid zerstören zudem aktiv Ökosystemstrukturen und Habitate. Die Folgen sind Verschiebungen in Größenstrukturen der Fischbestände sowie Änderungen in der Zusammensetzung der Ökosysteme (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Im Falle von Raubfischen kann dies einen kaskadenartigen Einfluss auf niedrigere Trophieebenen haben. Die jährlichen Fangmengen stagnieren seit 1990 und waren im Jahre 2011 bei ca. 98,2 Mio. t Fisch (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Obwohl die Fangmengen stagnieren, wird der Aufwand für diese Erträge immer größer, da die Ökosysteme ausgereizt und überreizt sind (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Rund 4,3 Mrd. Menschen decken 15 % ihres tierischen Proteins mit Fischprodukten, wobei 90 % der gesamten Fischmengen aus den Kontinentalschelfen bis Wassertiefen bis maximal 200 m stammt (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Im Folgenden werden die Auswirkungen der Überfischung auf Korallenriffe näher dargestellt.

4.3.2 Überfischung und die Folgen für tropische Korallenriffe

60 % der Korallenriffe sind Überfischung und Eutrophierung ausgesetzt (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Obwohl Korallenriffe die strukturell komplexesten und taxonomisch diversesten marinen Ökosysteme sind, sind sie anfällig für Klimaveränderungen, da die Ökosystemfunktionen der Riffe nur von einer Handvoll Spezies ausgeführt wird (Jackson et al. 2001). Zu diesen Ökosystemfunktionen gehören das dreidimensionale Habitat, das die Korallen erschaffen, die Makroalgenkontrolle durch Herbivore (Weidegänger) und die Bioerodierer, die abgestorbene Korallen fressen und Platz für neue schaffen (Hughes et al. 2017). Ein Drittel der gesamten Ökosystemfunktionen der Korallenriffe sind alleine von einer Art abhängig (Hughes et al. 2017). Die Redundanz der funktionellen Gruppen ist somit sehr begrenzt. Eine funktionelle Gruppe ist eine Sammlung von Spezies, die unabhängig von ihren taxonomischen Unterschieden, ähnliche Funktionen erfüllen (McLeod et al. 2009). Je mehr Spezies in einer funktionellen Gruppe vorzufinden sind, desto höher ist die Redundanz, da mehr Arten ähnliche Funktionen im Ökosystem erfüllen (McLeod et al. 2009; Nugues und Ferse 2011). Somit hat das Ökosystem Korallenriff, gemessen an der Biodiversität, eine relativ geringe Redundanz, was es anfällig für Stressoren macht (Nugues und Ferse 2011). Eine große funktionelle Redundanz ist, sowohl für die Resilienz, als auch für die Erholung der Korallenriffe wichtig (McLeod et al. 2009).

Daher sind abgelegene kleine Riffe mit wenig Diversität genauso verletzlich wie große Riffe mit hoher Biodiversität, da die Biodiversität eine nicht unbedeutende, aber dennoch untergeordnete Rolle spielt. Obwohl die Biodiversität normalerweise sehr gute Aussagen über die Resilienz eines Ökosystems geben kann, ist beim Ökosystem Korallenriff die Diversität nicht so entscheidend, wie das Überleben einzelner funktioneller Gruppen (Weidegänger, Bioerodierer, Korallen). Dabei steht explizit das Gleichgewicht zwischen Makroalgenwachstum und Korallenwachstum in ständiger Konkurrenz, wodurch der Konkurrenzdruck auf Korallen, durch das Wegfallen der Weidegänger wächst (Zaneveld et al. 2016).



Graphik 6 (Jackson et al. 2001, S. 630)

In Graphik 6 C ist ein gesundes Korallenriff mit etlichen vertikalen und horizontalen Wechselbeziehungen dargestellt. In 6 D ist die anthropogene Veränderung, mit dem *Homo sapiens* als einzigem Glied am Ende der Nahrungskette, dargestellt. Dabei wird deutlich, wie durch den menschlichen Einfluss der Fischerei, die Abundanz grasender Invertebrata und Vertebrata abnimmt. Dies geschieht einerseits durch eine Überfischung, andererseits auch durch ungewollten Beifang. Durch ein deutlich verringertes Nahrungsangebot ist das Vorkommen der Top-Prädatoren, wie Riff-Haie auch deutlich zurückgegangen. In Folge dessen blühen Makroalgen, Seegras und Schwämme auf (Jackson et al. 2001).

So ging bspw. durch eine Überfischung in der Karibik in den 1980er Jahren die Abundanz der *Acropora* Korallen, nachdem sie eine halbe Millionen Jahre die dominante Art in diesen Riffen stellte, zurück. Durch die fehlenden Papageifische explodierte die Abundanz des Makroalgenüberwuchses, wodurch der Seeigel (*Diadem antillarum*), als letzter Weidegänger, an Abundanz zunahm (Jackson et al. 2001). 1983 starben durch verschiedenste Faktoren ein großer Teil der Population der *Diadem antillarum*, wodurch die Resilienz des Ökosystems weiter geschwächt wurde und die Makroalgen immer stärker zunahm (Jackson et al. 2001; Thampi et al. 2018). Die geringe Redundanz, gepaart mit Überfischung, führte in diesem Fall zu einem Umkippen des Ökosystems in einen makroalgendominierten Zustand.

Im *Great Barrier Reef (GBR)* wurde seit 1960 ein immer wiederkehrendes Massensterben durch eine explosionsartige Verbreitung durch den Dornenkronenseestern (*Acanthaster planci*) ausgelöst. Für diese Ausbrüche ist höchstwahrscheinlich eine Überfischung des Riffes verantwortlich, da die Abundanz von Arten, die sich von Larven oder juvenilen Stadien des Dornenkronenseesterns ernährten, gering war. Diese Top-Down Erklärung, die auf einer hohen Trophieebene beginnt und nach unten weitergegeben wird, resultierte in massenhaftem Korallensterben (Jackson et al. 2001).

4.4 Lokale anthropogene Stressoren und mikrobielle Korallenreaktion

Anthropogene lokale Stressoren wirken synergetisch auf Ökosysteme ein, daher wird im Folgenden der Einfluss von Überfischung und Eutrophierung auf das Mikrobiom der Korallen dargestellt.

Generell ist das Gleichgewicht von Korallen und Makroalgen durch Überfischung herbivorer Fische und Eutrophierung gestört (Thampi et al. 2018; Zaneveld et al. 2016). Eutrophierung ist die ungewollte Nährstoffanreicherung eines Gewässers, die in Küstengebieten meist durch Flüsse eingetragen wird (Begon et al. 2017). Die Folgen einer Eutrophierung können erhöhtes Algenwachstum, Sauerstoffmangel und Biodiversitätsverlust sein. Für Korallenriffe, die explizit auf ein oligotrophes Medium angewiesen sind, kann dies verheerende Folgen haben. Die genauen Wechselwirkungen sind noch nicht erforscht, aber es ist eindeutig, dass durch

Makroalgenkontakt Korallenbleiche oder sogar Korallentod als Folge eintreten können (Zaneveld et al. 2016). Die DDAM-Hypothese (dissolved organic carbon, disease, algae and microbes) geht dabei davon aus, dass der Makroalgenrasen und das Algensekret organischen Kohlenstoff im Wasser löst, was eine stärkere Wachstumsrate und Sauerstoffverbrauch von Bakterien zur Folge hat und schlussendlich in einer Hypoxie (Sauerstoffmangel) der Korallen resultiert, was dann zum Tod oder dem Bleichen der Korallen führt (Zaneveld et al. 2016). Durch Überfischung der herbivoren Arten (Weidegänger) nimmt die Makroalgendecke zusätzlich zu.

Einen Schutzmechanismus der Korallen stellt ihr Mikrobiom dar. Das Mikrobiom ist die gesamte Anzahl an Mikroben, die an und auf der Koralle leben (Zaneveld et al. 2016). Wie für unseren Darm die *Escheria coli* (*E. coli*) Bakterien essentiell sind, besteht ein Großteil des Korallenmikrobioms aus Actinobakterien. Actinobakterien produzieren Antibiotika, welches auch für die Resilienz des Mikrobioms von entscheidender Bedeutung ist (Zaneveld et al. 2016). Darüber hinaus erfüllt das bakterielle Mikrobiom Funktionen für die Koralle, wie die Sauerstofffixierung und der Schutz vor pathogenen oder opportunistischen Bakterien (Zaneveld et al. 2016; Ziegler et al. 2019).

Der Zusammenhang zwischen dem Mikrobiom, den lokalen Umweltfaktoren, den Korallen und dem Wettbewerb zwischen Makroalgen und Korallen ist vielschichtig. Durch die Überfischung der Herbivoren wird die Resilienz des Ökosystems geschwächt (Hughes et al. 2017). Dies führt zu einem Anstieg der Makroalgendecke. Diese Makroalgendecke führt weiter dazu, dass sich das Mikrobiom der Korallen verändert (Thampi et al. 2018). Durch direkten Makroalgenkontakt wird das Mikrobiom instabil. Je mehr Makroalgendecke im Riff vorhanden ist, desto geringer wird die Abundanz der symbiontischen Actinobakterien (Zaneveld et al. 2016). Durch den Verlust der Actinobakterien wird die Resilienz weiter geschwächt und opportunistische Proteobakterien oder pathogene Bakterien können sich an der Koralle anlagern. Dies führt zu Korallenkrankheiten, Korallenbleichen oder bedeutet sogar den Tod für die Korallen und resultiert in dem Verlust von Korallendecke (Zaneveld et al. 2016).

Eine Korallengattung stellen die *Porites* dar, diese sehr großen und langsam wachsenden Korallen werden auch von Papageifischen gefressen. Normalerweise ist eine Beschädigung kein Problem, doch durch die verschiedensten Stressoren wie eine erhöhte Makroalgendecke führt es dazu, dass 92% der gebissenen *Porites* an Korallendecke verloren und 62% davon abstarben (Zaneveld et al. 2016). Dies könnte auch an der Tatsache liegen, dass vermehrt opportunistische Proteobakterien das Mikrobiom stellen und dadurch Korallen weniger resilient gegenüber natürlichen Stressoren wie der Bioerosion sind. Die eigentlichen Verbündeten, die zur Resilienz beitragen sollten, werden somit durch veränderte Nährstoffwerte zu Feinden der Korallen. Das Ziel eine Restaurierung der Papageifischabundanz in Riffen ist ein nachhaltiges Ziel und soll Riffe wieder resilienter machen, jedoch könnte eine erhöhte Abundanz ohne die

Wasserqualität zu verbessern negative Effekte auf das Ökosystem haben, da die Resilienz schon stark geschwächt ist und gegen Bioerodierer nicht mehr ankommen kann, wie anhand des Beispiels der *Porites* eindeutig erkennbar ist (Zaneveld et al. 2016).

4.4.1 Mikrobiom verschiedener Korallenarten

In diesem Abschnitt soll exemplarisch aufgezeigt werden, dass verschiedene Korallenarten unterschiedlich auf die Stressoren reagieren. Es existieren sehr robuste im Stoffwechsel flexible Korallenarten. Durch Eutrophierung wurde ein starker Rückgang der Gattung der *Acropora*-Korallen verzeichnet, wohingegen *Pocillopora*- und *Porites*-Korallen relativ robust erscheinen (Y. Sawall 2010; Ziegler et al. 2019). Alle Gattungen gehören zur Familie der Steinkorallen (*Scleractinia*). Im Folgenden sollen anhand der Korallenarten *Acropora hemprichii* und *Pocillopora verrucosa* unterschiedliche Anpassungen der Korallen an die veränderten Umweltbedingungen dargestellt werden.

Acropora Korallen haben ein sehr wechselhaftes Mikrobiom unter verschiedensten Konditionen. An Stellen wo es zu Nährstoffeintrag in Küstengewässern kam, hatte die Art *A. hemprichii* 30 % weniger Mikroben *species richness* (Artenzahl). Korallen wurden von unberührten Orten zu eutrophierten Standorten verlagert, die Folge war eine höhere Artenvielfalt der Bakterien und eine verringerte *Evenness* (Verteilung der Individuen in einer Population). Eine höhere Artenvielfalt im Mikrobiom deutet auf eine Stressreaktion der Koralle hin, da sich die sonst unterdrückten opportunistischen Taxa anlagern können (Ziegler et al. 2019).

Bei *Pocillopora verrucosa* gab es kaum Unterschiede in der *Evenness* auch wenn diese von oligotrophen Gewässern in eutrophierte Gewässer transplantiert wurden. Daher könnte man *A. hemprichii* als ein „Mikrobiom Conformer“ (Mikrobielle Adaptation durch veränderte Umwelteinflüsse) und *P. verrucosa* als „Mikrobiom-Regulator“ (Mikrobiom Regulation ist darauf ausgerichtet ein konstantes Mikrobiom zu erhalten) gesehen werden (Ziegler et al. 2019).

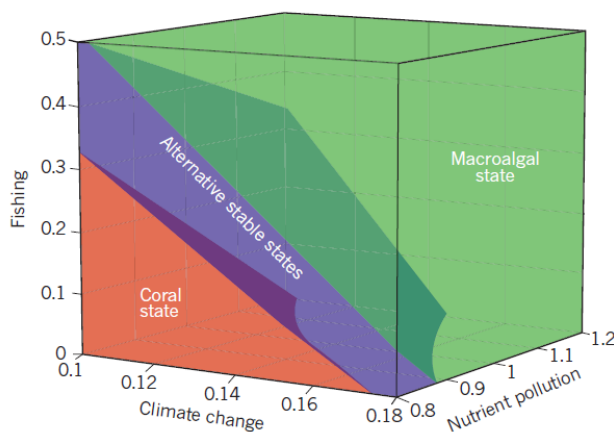
Nicht jede Korallengattung/Art reagiert gleich. Aber *Acropora* Gattungen konnten in den 1980er Jahren in der Karibik durch Überfischung nicht überleben, da sich die Mikrobienzusammensetzung schnell veränderte (Ziegler et al. 2019). Daher konnte es zu einem sogenannten *phase shift* kommen, sodass sich die Zusammensetzung der Korallenarten im Riff durch Umwelteinflüsse veränderten und nur die anpassungsfähigsten überleben können. Dennoch gibt es einen Lichtblick, denn als die Korallenarten wieder zurück in ihr ursprüngliches Habitat gesetzt wurden, gelang es Ihnen ihr ursprüngliches Mikrobiom wiederherzustellen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich das Mikrobiom wiederherstellt und erholen kann und keinen irreversiblen Übergang darstellt (Ziegler et al. 2019). Dennoch sind *Acropora* Korallen sehr wichtig für das Ökosystem, da sie durch ihre verästelnden dreidimensionalen Strukturen,

wesentlich mehr Lebensräume für verschiedenste Taxa, als die *Porites* bieten (Hughes et al. 2017).

4.5 Alternative Ökosysteme: *regime*- und *phase shifts*

Ein *regime shift* (Regimewechsel) oder *community shift* (Verschiebung in der Gemeinschaft) bezeichnet in der Ökologie Veränderungen in der Struktur und Funktion eines Ökosystems sowie einen Wechsel der Zusammensetzung der Arten in einem Ökosystem (Begon et al. 2017; Campbell et al. 2009). Der Einfachheit halber wird im Folgenden nur der Term *regime shift* für beide Termini verwendet.

Ein *phase shift* wird als irreversibler Übergang eines korallendominierten Ökosystems in ein makroalgendominiertes Ökosystem verstanden. Diese verschiedenen *shifts* können in jedem Ökosystem der Erde durch veränderte Umweltfaktoren auftreten. Wenn Ökosysteme geschwächt sind und die Resilienz des Ökosystems nicht ausreicht um einen *shift* zu verhindern, ist die Wiederherstellungsrate (*recovery*) des ursprünglichen Zustandes entscheidend (Begon et al. 2017). Eine verminderte Resilienz steigert die Wahrscheinlichkeit eines *regime*- oder *phase shifts* (Hughes et al. 2007). *Phase shifts* haben Auswirkungen auf den Energiefluss, die Abundanz und Diversität der Lebewesen sowie den Nutzen für den Menschen (Bruno et al. 2009). Die verminderte Resilienz kann vielfältige Ursachen haben, bspw. die anthropogenen Einflüsse der Erwärmung und Ozeanversauerung.



Graphik 7 (Hughes et al. 2017, S. 86)

Die Graphik 7 zeigt, wie die verschiedenen anthropogenen Faktoren wie Klimawandel, Überfischung und Eutrophierung dazu beitragen, dass aus einem korallendominierten Ökosystem alternative Ökosysteme, ausgelöst durch *regime shifts* oder sogar makroalgendominierte Ökosysteme ausgelöst durch *phase shifts*, werden.

Ein großes Problem des *phase shifts* besteht darin, dass die vielfältigen diversen Ökosystemfunktionen des Korallenriffs, die in Kapitel 2 & 3 schon behandelt wurden, nicht weiter ausgeführt werden (Nugues und Ferse 2011). Ein zweites Problem liegt darin, dass die Makroalgenwachstumsrate ca. 7-mal schneller ist, als die der Korallendecke (Mumby 2009). Dadurch haben Makroalgen einen Vorteil nach einer Korallenbleiche, da sie sich 7-mal schneller als die Korallendecke ausbreiten kann. Wenn zusätzlich synergetische Effekte der Eutrophierung oder die Abwesenheit herbivorer Fische das

Makroalgenwachstum weiter stärken, ist ein „Umkippen“ und somit ein *phase shift* des Ökosystems sehr wahrscheinlich (Knowlton 2001; Mumby 2009).

Damit das Ökosystem nach einem *regime shift* den Ursprungszustand wieder erreichen kann, müsste sehr viel investiert werden. Der Schwellenwert eines korallendominierten Zustandes hin zu einem makroalgendominierten Zustand ist somit geringer als der Schwellenwert von einem makroalgendominierten Zustand wieder zurück in den Ursprungszustand zu gelangen (Nugues und Ferse 2011). Die Beweidungsrate müsste also exponentiell wachsen um den Ursprungszustand wieder zu erreichen.

Faktoren mit denen die Resilienz eines Rifves bestimmt werden kann sind die Wasserqualität (Nährstoffwerte), die Dichte der Jungkorallen, die strukturelle Komplexität des Riffgebildes und die Biomasse der herbivoren Fische sowie der herbivoren Invertebraten wie Seeigel (Graham et al. 2015). Eine Exklusion von großen Herbivoren z. B. führt zu einer explosionsartigen Ausbreitung von Makroalgen, was das Gleichgewicht von Korallen gegenüber Makroalgen stört. Außerdem ist die Larvenanlagerung an Substraten um zwei Drittel geringer, wenn keine Herbivore anwesend sind (Hughes et al. 2007; Mumby 2009). Dadurch ist für die Resilienz und Erholung eines Rifves die Biomasse herbivorer Fische und Invertebraten sehr entscheidend.

Korallenbleichen, wie bereits angesprochen, führen immer wieder zu einem Korallensterben. Nach einer solchen Korallenbleiche gibt es mehrere Wege, die das Ökosystem einschlagen kann. So unterläuft es entweder einem *regime shift*, einem *phase shift*, hin zu einem makroalgendominierten Ökosystem oder aber es erholt sich. Neben der Resilienz ist die Erholung des Systems damit ein zentraler Faktor um *shifts* zu verhindern. Die Erholung des Rifves ist dann besonders gut, wenn die Riffe bei hoher Dichte der Jungkorallen und Herbivoren eine hohe strukturelle Komplexität besitzen und wenn die Nährstoffe gering sind (Graham et al. 2015). Im Folgenden sollen einige Beispiele solcher *shifts* als Folge von anthropogenem Einfluss beschrieben werden.

4.5.1 *Regime* und *phase shifts*: Beispiele aus dem Anthropozän

Im *Great Barrier Reef*, dem größten Riff der Erde, ist die Larvenherstellung der Korallen im Jahr 2018 im Vergleich zu historischen Werten um 89% gesunken (Hughes et al. 2019). Ein sehr großes Problem stellt die Häufigkeit der Korallenbleichen dar. In den 1980er Jahren kamen nur alle 25 Jahre Korallenbleichen vor, seit 2010 kommen durchschnittlich alle 5,9 Jahre Korallenbleichen vor (Hughes et al. 2019). Dadurch wird die Zeit zur Erholung der Riffe immer kürzer, welches einen zentralen Aspekt der Resilienz darstellt (Hughes et al. 2019). Im *GBR* gibt es vorwiegend zwei Korallenarten, die sich aufgrund ihrer Fortpflanzung in „*Brüter*“ und *Spawner* unterteilen lassen.

Die *Brüter* haben einen limitierten Genfluss und siedeln sich lokal an, wohingegen die *Spawner* eine enorme Menge an Eiern und Sperma ins Wasser abgeben, dass dort befruchtet wird. Dadurch haben sie deutlich höhere Verbreitungsmöglichkeiten. Im indo-pazifischen Ozean sind mehr als 90 % der Riffbildenden Korallen *Spawner* (Hughes et al. 2019). Nach der Korallenbleiche 2016 ist die Larvenbildung auf 11,3% gesunken (Hughes et al. 2019). Bei den *Spawnern* blieb nur eine Larvenproduktion von 6,9% zu vor der Bleiche übrig und die *Brüter* sanken auf 36,5% (Hughes et al. 2019). Dies führte dazu, dass sich die taxonomische Zusammensetzung der Jungkorallen im Riff veränderte.

Ein Forschungsteam hatte Platten ausgelegt, an denen sich Korallen ansammeln konnten. Vor der Bleiche wurden auf 41,4% der Platten mehr als 20 *Spawner* Jungtiere (Polypen) gefunden (Hughes et al. 2019). Nach der Bleiche wurde die gleiche Menge nur auf 0,5% der Platten gefunden (Hughes et al. 2019). Die *Spawner* sind entscheidend für die Erholung der Riffe. Einerseits ist der Genpool durch die sexuelle Fortpflanzung wesentlich größer als bei *Brütern*, andererseits ist die Fortpflanzungsrate höher. Bei der Fortpflanzung nach dieser Methode greift der sogenannte Allee-Effekt: eine höhere Populationsgröße, eine höhere Dichte und damit auch größere Kolonien haben einen positiven Einfluss auf die Fitness (Anzahl der Nachkommen) eines Individuums (Knowlton 2001). Durch den Verlust adulter Tiere und der Korallendecke schrumpft die gesamte Population. Dieses Schrumpfen der Population führt zu einer asynchronen Befruchtung, wodurch die Befruchtung im Wasser seltener wird und weniger Gameten ausgebildet werden können, wodurch die Fitness sinkt. Meist sind große langlebige Korallen *Spawner*, die sich ein oder zweimal im Jahr massenhaft reproduzieren. Da die Befruchtung nur ca. 3 Std. möglich ist, muss die Abgabe von Eiern und Spermien unzähliger Individuen gleichzeitig oder sehr zeitnah erfolgen (Hughes et al. 2019). Isolierte und kleine Kolonien haben geringe Fortpflanzungsraten. Je weniger *Spawner* also in der Umgebung sind, desto geringer ist die Fortpflanzungsrate. Daher konnte die Reduktion der Jungtiere kausal auf den Rückgang der lebenden Korallendecke zurückgeführt werden und stellte eine proportionale Abnahme zur Korallendecke dar (Hughes et al. 2019). Die Korallendecke ist im Jahr 2018 auf dem niedrigsten Stand in der Geschichte und es dauert mindestens ein Jahrzehnt für die schnell wachsenden Korallen (*Acropora*) sich zu erholen und für die langsam wachsenden (*Porites*) noch länger (Hughes et al. 2019).

Jedoch gilt dieser Trend nicht nur für das GBR, denn die meisten Korallenriffe haben ein Ungleichgewicht zwischen den so wichtigen Faktoren der Sterberate der Korallen und der Anlagerung neuer Jungtiere. Dies führt dazu, dass nur wenige Korallenriffe einen Anstieg in der Korallendichte zu verzeichnen haben (Osborne et al. 2017). Insgesamt haben dadurch *Brüter* einen evolutionären Vorteil, da sie sich selber befruchten können (asexuell) und nach einer

Korallenbleiche auch bei geringer Individuenzahl neue Larven entstehen können (Knowlton 2001).

Eine weitere Studie untersuchte Riffe auf den Malediven vor der Korallenbleiche im Februar 2016 und nach der Bleiche 2017. Insgesamt wurden Korallenarten der Gattung *Acropora*, *Pocillopora* und *Porites* untersucht. Die verästelte Korallengattung der *Acropora* ist dabei die am häufigsten vorkommende im Riff. Im zentralen Malediven Archipel sank die Korallendecke von 29,4% auf 5,6% in 5 Metern Tiefe und in 10 Metern von 28,3% auf 5,9%. Die schlimmste Korallenbleiche wurde in Velidhu im Nord Ari Atoll verzeichnet, wo die Korallendecke in 5m von 62,6% auf 0,03% sank und in 10m von 49,3% auf 0,07% sank. Die am stärksten betroffene Gattung, war die *Acropora*, die unter 10 % Abundanz fiel. *Pocillopora* und *Porites* nahmen zwar auch ab, jedoch nur moderat, wodurch diese nach der Bleiche die dominanten Taxa stellen. Die Korallenpopulationen vor der Bleiche wurden von großen Korallen bestimmt. Nach der Bleiche wurden die Populationen von kleineren und mittelgroßen dominiert. Es hat sich durch die taxonomischen Unterschiede sowohl eine andere Zusammensetzung der Taxa ergeben, als auch eine Größenverschiebung der gesamten Population. Sowohl die Populationsänderung als auch die veränderte Zusammensetzung der Gemeinschaft führt zu einer schlechteren Erholungsrate. *Acropora* Korallen sind relativ schnell wachsende Korallen und gehören zu den *Spawners*. Schnell wachsende Korallen mit hohen Fortpflanzungszahlen sind essentiell für die Erholungsrate des Riffs. Somit ist durch die Bleiche die wichtigste Gattung des Riffs und die wichtigste Gattung für die Erholung zu großen Teilen gestorben (Pisapia et al. 2019).

Jungtiere sowie kleinere Kolonien sind resilienter gegenüber Temperaturspitzen. Dies ist im Massentransfer der schädlichen photosynthetischen Nebenprodukte (Sauerstoffradikale), die bei der Korallenbleiche entstehen, begründet (Pisapia et al. 2019). *Porites* sind die temperaturresistentesten Korallen zurzeit und daher werden diese an vielen Standorten, die bis dahin dominanten *Acropora* Korallen ersetzen. Korallenriffe können sich zwar erholen, aber dafür entscheidend sind die schnellwachsenden *Acropora* Korallen, die durch die Korallenbleiche großflächig sterben. Neben diesem Taxon sind große Kolonien extrem wichtig, da die *Spawner* für die Fortpflanzung auf große Kolonien angewiesen sind. Durch den Verlust der adulten *Acropora* waren auch dementsprechend wenige juvenile Stadien vorzufinden (Pisapia et al. 2019). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die wichtigsten Faktoren für eine Erholung des Riffs, große Kolonien, verästelte *Acropora* Korallen sowie stark abundante juvenile Stadien dieser sind. Alle diese Faktoren werden durch die Korallenbleiche negativ beeinflusst und es bleibt abzuwarten ob alle Riffe einen *phase shift* vermeiden können (Pisapia et al. 2019).

Ein Beispiel eines *regime shifts* stellt den Ausbruch von *Acanthaster planci* (Dornenkronenseestern) 1980/81 in der Karibik dar. Eine Studie untersuchte die Abundanz der Korallen vor dem Event und danach im Jahre 2003. Durch den Ausbruch von *A. planci* hat die

Korallendecke 1980 61% verloren (Berumen und Pratchett 2006). 2003 ist die Korallendecke wieder auf alten Werten. 1979 betrug die Korallendecke 37,6% und 2003 37,4% (Berumen und Pratchett 2006). Aber auch hier, da *Acropora* die bevorzugte Beute des *A. planci* ist, nahm diese ab und 2003 stellt *Pocillopora* die dominante Korallengattung der untersuchten karibischen Riffe. Die *Chaetodontidae* (Falterfische) sind *obligate Corallivoren* und ernähren sich von der Gattung *Acropora* und sind am stärksten von diesem Wandel betroffen. Die Abundanz dieser nahm deutlich ab, wohingegen die Abundanz der nicht-korallenfressenden Arten kaum Unterschiede aufwies (Berumen und Pratchett 2006). Zusätzlich zu diesen Unterschieden nahmen die seltenen Korallenarten weiter ab, wodurch die Biodiversität des Riffes abnimmt. An diesem Beispiel ist deutlich zu erkennen, dass obwohl die Abundanz der Korallendecke zurückgekehrt ist, dies nicht bedeutet, dass die Ökosystemstrukturen genauso wiederhergestellt werden können (Berumen und Pratchett 2006; Pisapia et al. 2019).

Neben den Korallenzusammensetzungen ändern sich auch die Zusammensetzungen der Fische. In einer Studie über 12 Jahre wurde die Fischzusammensetzung des zentralen GBR untersucht. Dadurch, dass das GBR seit 1981 UNESCO-Weltnaturerbe ist, ist dort keine Fischerei erlaubt und die Daten sind unabhängig von anthropogener Fischerei entstanden. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass Fische resilienter als Korallen sind. Dennoch führt ein *bottom-up Effekt* (wie im vorherigen Beispiel in der Karibik) zu Veränderungen. Ein *bottom-up Effekt* nennt man einen Effekt der von der Basis des Ökosystems über die Trophieebenen von „unten nach oben“ weitergegeben wird (Begon et al. 2017). Die untersuchten Riffe hatten 1998 einen Korallentod von 75% zu verzeichnen (Bellwood et al. 2006). Obwohl die Artenvielfalt und totale Abundanz keine Unterschiede zu verzeichnen hatten, wurden die Zusammensetzungen verändert, da deutlich mehr omnivore Generalisten und planktivore *Neopomacentrus bankieri* (chinese demoiselle) und weniger korallenabhängige Spezies vorzufinden waren. Die Fischabundanz hat sich von 1998 bis 2006 fast verdoppelt. Generalisten sind deutlich resilienter, unter anderem weil sie nicht von den Korallen direkt abhängig sind (Bellwood et al. 2006). Auch hier ist wieder deutlich zu erkennen, dass die Abundanz der Fische sogar gewachsen ist, sich aber dennoch die Ökosystemstrukturen verändert haben.

Ein weiteres Beispiel untersuchte über 12 Jahre die Seychellen. 1998 ist durch eine Korallenbleiche, die Korallendecke dort um über 90 % gesunken. 21 Riffstandorte wurden bis 2011 untersucht. 1998 war die Korallendecke ca. 28% und die Makroalgen bedeckten 2%. Zwölf der 21 Riffe hatten 2011 eine Korallendecke von 23%, also nahezu den Ursprungszustand wiederhergestellt und eine Makroalgendecke von ca. 1%. Bei neun der 21 Riffe wurde allerdings ein *phase shift*, festgestellt. Die durchschnittliche Makroalgendecke betrug in diesen Riffen 42% und steigend in 2011 von vormals 2% Makroalgendecke. Die Korallendecke dagegen fiel von 1998 von 28% auf unter 3 % in 2011. Sieben Jahre nach der Bleiche 1998 wurde

festgestellt, dass weniger kleine Fischarten anwesend waren und eine geringere komplexe funktionale Struktur herrschte, die durch eine Dominanz von Fischen, die Invertebraten als Nahrungsgrundlage haben, gekennzeichnet wurde. In den Ökosystemen wo es zum *phase shift* kam, wurden wichtige Funktionen, wie die der Weidegänger kaum noch ausgeführt. Die Jungkorallendichte war deutlich eingeschränkt gegenüber den Riffen, die sich erholen konnten (Graham et al. 2015).

4.6 Synergetische Effekte der anthropogenen Stressoren

Im Folgenden werden die synergetischen Effekte, die durch die vielfältigen Stressoren entstehen können, näher beleuchtet. Die Synergie bedeutet, dass die Auswirkungen viel stärker sind, als die Summe der individuellen Stressoren (Jackson et al. 2001).

Die Erwärmung der Meere führt dazu, dass sich die Habitate für Korallen in Richtung Pole verschieben. Da Korallen sessile Tiere mit langen Generationszyklen sind, ist ein Habitatswechsel generell sehr schwer. Dazu kommt, dass sich durch die Versauerung die Habitate Richtung Äquator schieben, wie in Graphik 4 (s. S. 15) gut zu erkennen ist. Dies liegt darin begründet, dass warmes Wasser weniger CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen kann und sich dadurch die Ozeanversauerung mit einhergehender Aragonituntersättigung in Äquator Nähe (tropische Zone & subtropische Zone) langsamer vollzieht als in Pol Nähe (polare Zone, subpolare Zone & gemäßigte Zone) (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006).

Der Meeresspiegelanstieg im Allgemeinen hat eher positive Auswirkungen auf Riffe, da diese mehr Platz zum Wachstum in die Höhe haben. Das Problem dabei sind aber die negativen anthropogenen Faktoren, da diese das Wachstum der Riffe soweit hemmen, dass es zu einem regelrechten Ertrinken der Riffe führen könnte, dadurch dass durch weniger Licht die Photosyntheserate der Zooxanthellen sinken wird (Knowlton 2001).

Der natürliche Stressor der Sedimentation ist kein Problem für Korallenriffe. Ausgelöst durch anthropogene Einflüsse schwächt die erhöhte Sedimentation allerdings das Riffwachstum. Darüber hinaus hat der synergetische Effekt zwischen erhöhter Sedimentation und einer Eutrophierung weitreichendere Folgen (Knowlton 2001). Das anfangs erwähnte System des Schleims führt dazu, dass Kleinstpartikel absinken und von benthischen Lebewesen zersetzt werden. Die Aggregate und der erhöhte Nährstoffgehalt führen dazu, dass dieses Absinken schneller und wesentlich großflächiger stattfindet, wobei man von *muddy marine snow* spricht (Knowlton 2001). Dieser *muddy marine snow* setzt sich auf die Korallen ab, was störende bis tödliche Wirkungen haben kann (Fabricius und Wolanski 2000; Knowlton 2001). Jungkorallen sterben 43 Stunden nach Kontakt mit dem *muddy marine snow* und die Sterblichkeitsrate ist 10-mal höher als bei adulten Tieren (Asaeda und Wolanski 2002).

Durch globale und lokale Stressoren sind bis jetzt ein bis zwei Drittel der weltweiten Riffdecke zurückgegangen (Roder, C. & Heiss, G. A. 2016). Darüber hinaus sind dreiviertel aller noch lebenden Riffe von anthropogenen Stressoren bedroht (Roder, C. & Heiss, G. A. 2016). Doch gibt es Möglichkeiten die Resilienz der Riffe zu steigern? Oder ist ein Aussterben der Korallenriffe dieser Erde nicht mehr zu verhindern? Werden unsere Kinder und Kindeskinde die „Regenwälder der Meere“ noch bestaunen dürfen? Im Folgenden Kapitel sollen Möglichkeiten aber auch Limitationen der Konservierung der tropischen Riffe besprochen werden und es soll diskutiert werden, ob ein Überleben der Korallenriffe überhaupt möglich ist.

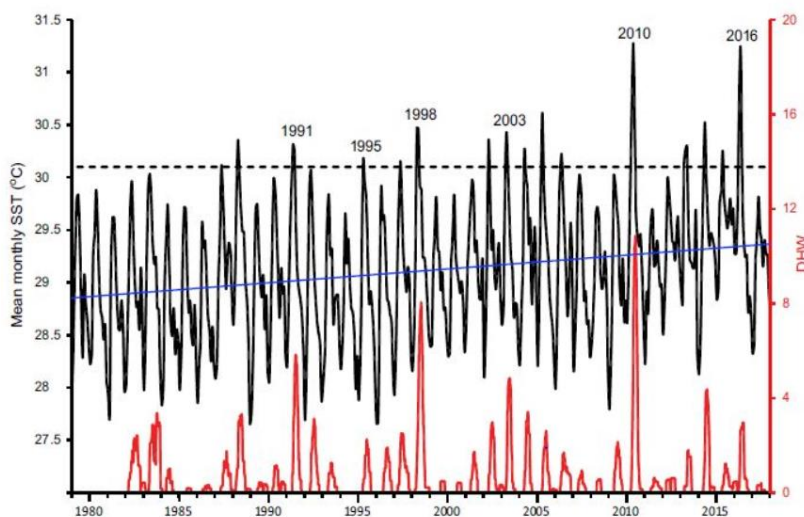
5. Chancen und Möglichkeiten

Wie aus den zahlreichen Beispielen aus dem letzten Kapitel hervorgeht, sind Korallenbleichen, *phase shifts* und *regime shifts* unter anthropogenem Einfluss keine Seltenheit mehr. Daher wird die Adaptation des Ökosystems Korallenriff im Anthropozän ein essentieller Faktor sein. Korallen sind langlebige, sessile Arten die Änderungen in ihrem Habitat kaum entkommen können. Die langen Generationszeiträume tragen dazu bei, dass die evolutionäre Anpassung der Korallen relativ langsam ist (Ziegler et al. 2019). Dennoch bestehen Unterschiede, denn manche Korallen sind genetisch toleranter gegenüber thermalem Stress, da sie thermisch tolerantere symbiontische Algen anlagern können (McLeod et al. 2009). Die Hitzetoleranz ist durch viele Gene codiert und ist daher noch nicht vollständig erforscht. Dennoch können epigenetische Veränderungen durch DNA-Methylierung andere Genexpressionen entstehen lassen, wodurch eventuell neue Symbiosen mit Hitzetoleranteren Algen möglich werden (Hughes et al. 2017). Darüber hinaus könnte sich das Mikrobiom anpassen und zur stärkeren Resilienz der Korallen beitragen.

Eine weitere mögliche Handlungsalternative dem Verlust der Korallendecke entgegenzuwirken könnte sein die Überfischung zu stoppen, sodass wieder eine höhere Abundanz an Papageifischen vorhanden ist, die bewiesenermaßen zur Ökosystem Resilienz beitragen (Zaneveld et al. 2016).

5.1 Erholung der Korallen am Beispiel Phuket

Im Folgendem Beispiel soll gezeigt werden, dass sich einige Korallenriffe sehr resilient zeigen.



Graphik 8 (Brown et al. 2019, S. 2)

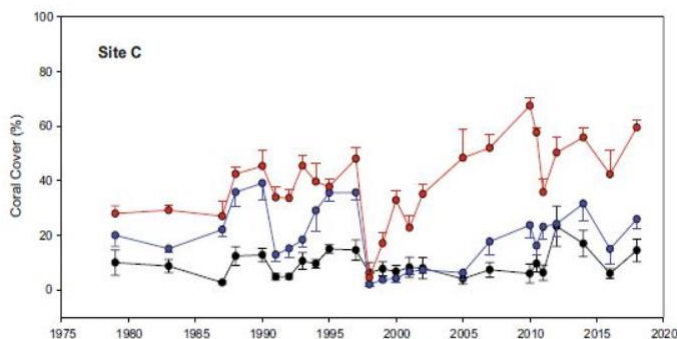
Die Graphik 8 zeigt die durchschnittliche Oberflächentemperatur (SST) und die *Degree Heating Weeks* (DHW) von 1979-2017 in der Region um Phuket. Eine DHW ist ein festgelegtes Internationales Maß mit dem Korallenbleichen vorausgesagt werden sollen und wird durch den roten Graphen dargestellt (Wissenschaftlicher

Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Eine DHW entspricht eine Woche mit einer Temperatur eines Grads Celsius über dem Sommermaximum. Acht DHW reichen in 99 % der Fälle aus um eine Korallenbleiche auszulösen

(Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). Auf der linken y-Achse ist die durchschnittliche monatliche Oberflächentemperatur (SST) verzeichnet. Falls dieser Graph über die gestrichelte schwarze Linie kommt, ist die Höchsttemperatur, bei der die meisten Korallen leben können, überschritten und es kommt zu einer Korallenbleiche. Dennoch ist es auch essentiell über welchen Zeitraum diese Temperaturen vorherrschten. Daher sind die DHW eingezeichnet.

Auffallend ist, dass die Temperatur immer mal wieder 30,1 °C überschreitet (kritischer Schwellenwert für Korallen), jedoch kam es nur zu einer Massenhaften Korallenbleiche, wenn die DHW auch eine hohe Zahl verzeichnen, wie 1998 und 2010 (Brown et al. 2019). 1998 bleichten 43% der Korallen in der Region Phuket aus, wovon 36 % teilweise bleich waren und nur 7 % komplett verblichen (Brown et al. 2019). Die Temperaturspitze 1998 führte dazu, dass rund 16 % der weltweiten Korallen durch diese Hitzeperiode starben (Frieler et al. 2013). 2010 sind rund 98% der Korallen in Phuket erbleicht, wobei aber 91 % komplett und 7 % teilweise ausgebleicht waren (Brown et al. 2019). An diesen Zahlen ist eindeutig erkennbar, dass sowohl die höhere Temperatur als auch die längeren DHW im Jahr 2010 zu einer der stärksten Korallenbleichen überhaupt geführt hat.

Dennoch konnte man Erfolge verzeichnen: Wie Graphik 9 zeigt, erholten sich die Korallen relativ schnell wieder. Nach den Tiefpunkten 1998 und 2010 ist insgesamt ein Trend erkennbar,



Graphik 9 (Brown et al. 2019, S. 6)

bar, dass die Korallen immer mehr Fläche im Ökosystem beanspruchen (Korallendecke/ coral cover) (Brown et al. 2019). Das bedeutet, dass trotz der starken Korallenbleichen das gesamte Riff wächst.

Diese Tatsache kann auch auf den ansteigenden Meeresspiegel zurückgeführt werden,

„The mechanisms underlying the observed increase in coral cover with increased sea level is likely to be the associated increase in ‘accommodation space’ allowing for expansion of reef corals in both lateral and vertical dimensions.“ (Brown et al. 2019, S. 9)

Dennoch kann diese Aussage keinesfalls generalisiert werden, denn in dieser speziellen Gegend spielt die tektonische Plattenbewegung eine große Rolle, die ein Ansteigen des Meeresspiegels zu anderen Regionen der Erde verändert (Brown et al. 2019). Jedoch lässt

sich sagen, dass sich die Ökosysteme trotz massiver Korallenbleichen in der Phuket Gegend sehr resilient zeigen und dies Anlass zur Hoffnung gibt.

5.2 Maßnahmen zum Schutz von Korallenriffen

Generell sind drei zentrale Bestandteile für einen erfolgreichen Naturschutz/Artenschutz notwendig: die Habitatfläche, Habitatqualität und Konnektivität. Die Konnektivität beschreibt die räumliche Anordnung und Verbindung zwischen einzelnen Habitaten. Da es sehr schwer ist den globalen Faktoren des Klimawandels, wie der Ozeanversauerung und Erwärmung der Meere entgegenzuwirken, beschränken sich die meisten Maßnahmen auf lokale Stressoren wie Wasserqualität und Überfischung (Hoegh-Guldberg et al. 2007; Nugues und Ferse 2011). Dabei sind zwei Strategien vorherrschend, Schaden abzuwenden und die Resilienz zu steigern (Nugues und Ferse 2011). Da verminderte Resilienz zu den zuvor beschriebenen *phase shifts* führen kann, setzen Schutzmaßnahmen dort an (Hughes et al. 2007). Ein Ansatz, der die Resilienz steigern soll sind *marine protected areas* (MPA). Im Folgenden werden MPAs vorgestellt und Chancen, Nutzen aber auch Grenzen ausführlich diskutiert.

5.2.1 *marine protected areas*

Ein MPA ist

"Any area of intertidal or sub-tidal terrain, together with its overlying water and associated flora, fauna, historical and cultural features, which has been reserved by law or other effective means to protect part or all of the enclosed environment," (Dudley 2013, S. 56).

MPAs gehören zu den wichtigsten Instrumenten des Ökosystemschutzes, um Resilienz und Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme zu verbessern (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006). MPAs können Arten schützen, wodurch degradierte Riffe wieder neu besiedelt werden können (Nugues und Ferse 2011). Darüber hinaus weisen MPAs höhere Erholungsraten nach Störungen auf als ungeschützte Riffe (Nugues und Ferse 2011). MPAs können die Fisch Biodiversität erhalten und verbessern sowohl die Größe als auch die Biomasse dieser (Mouillot et al. 2016). Intakte Fischgemeinschaften steigern wiederum die Resilienz und die Erholungsrate des gesamten Ökosystems (Mouillot et al. 2016). Denn nicht nur die Fischbiomasse nimmt zu, sondern durch das intakte Ökosystem und eine höhere Resilienz kann auch die Korallendecke wachsen. (Selig und Bruno 2010).

Generell lassen sich laut IUCN (International Union for Conservation of Nature) sechs verschiedene Kategorien unterscheiden. Diese reichen von den sogenannten *no-take-zones*, in denen keine *extracitive activity* (Abbauaktivitäten) erlaubt sind, bis hin zu den *multiple-use* MPAs, in denen verschiedene Arten von Aktivitätslevels erlaubt sind (s. Anhang: Abb. 5) (Dudley 2013). Da *no-take-zones* vollständig geschützte Zonen (Nullnutzungszonen) sind, bieten

sie die vielversprechendste Möglichkeit Korallenriffen Schutz zu verschaffen und werden daher hier ausführlich behandelt (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013).

5.2.2 Bedeutung und Funktion der NEOLI-Aspekte hinsichtlich *marine protected areas*

MPAs bedecken 1,6% der globalen Meeresfläche, was einer Fläche von 6 Mio. km² entspricht (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2013). Im Vergleich dazu beträgt die Fläche von Australien 7,6 Mio. km². Obwohl die Rifffläche der MPAs zunimmt, steigt der Schaden an Korallenriffen (s. Anhang Abb. 6) (Begon et al. 2017). Dies liegt darin begründet, dass sich nur 18,7% der weltweiten Korallenriffe in MPAs befinden und sich nur 1,4% der weltweiten Rifffläche in den so wichtigen *no-take-zones* befindet (Mora et al. 2006; Selig und Bruno 2010).

No-take zones zeichnen sich dadurch aus, dass dort keinerlei Fischerei erlaubt ist. Die Biodiversität in vielen *no-take-zones* ist konstant. Außerdem wachsen die Fischbestände, wodurch die umliegenden Fischgründe deutlich höhere Fangquoten zu verzeichnen haben. In Neuseeland wurde das *Goat Island Marine Reserve* eingerichtet. Nach nur 10 Jahren konnten sich die Populationen von *Pagrus auratus* (Meerbrasse) und Langusten erholen, sodass das mittlerweile fast unberührte Ökosystem nur noch für wissenschaftliche Forschungen zur Verfügung steht (Begon et al. 2017).

Wenn im Folgenden der Term MPA verwendet wird, bezieht er sich lediglich auf die *no-take-zone* MPAs. Dennoch können nicht alle MPAs erfolgsversprechend sein, denn in manchen hat die Raubfischpopulation stark zugenommen, wodurch eine trophische Kaskade in Gang gesetzt wurde, die einen Rückgang der Herbivoren, Zunahme der Makroalgendecke und Abnahme der Biodiversität zur Folge hatte. Dies geschah meist in Gebieten, die aus anderen Gründen, wie einer Eutrophierung vorbelastet waren. Daher sollten MPAs nicht isoliert eingerichtet werden (Begon et al. 2017).

Eine effektive Ökosystemkonservierung durch MPAs kann gewährleistet werden, wenn in ihnen die ökologischen Parameter des Ökosystems, wie Fischbiomasse oder Korallendecke, steigen oder gleich bleiben und damit Ökosystemprozesse und Funktionen aufrecht erhalten werden (McClanahan et al. 2006). Um die Effektivität eines Ökosystems gewährleisten zu können, müssen einige Faktoren berücksichtigt werden, die im Folgenden erläutert werden.

Da die Resilienz des Ökosystems stark von großen Herbivoren und Prädatoren abhängig ist, ist ein Fischverbot essentiell, damit die Fische Zeit bekommen auszuwachsen. Dies führt zu größeren Körpern und zu höherer Abundanz und Fruchtbarkeit (McClanahan et al. 2006; Mora et al. 2006). MPAs heben somit die durchschnittliche Fischgröße, haben höhere Nachkommenzahlen und mehr Biomasse (McClanahan et al. 2006). Darüber hinaus ist ein

Selektionsdruck durch Prädatoren wichtig, da es den Arten der niedrigeren Trophiestufen hilft sich schneller anzupassen, indem Prädatoren die schlecht angepassten Fische selektieren (Nugues und Ferse 2011).

Zusätzlich ist die Größe eines MPAs entscheidend für dessen Erfolg. Größere MPAs schützen größere Populationen und die Wahrscheinlichkeit, dass genug Individuen nach einer Katastrophe für ein Überleben der Population sorgen, ist höher (McLeod et al. 2009). Fische haben einen sogenannten Aktionsraum (*home range*). Je größer eine Fischart ist, desto größer ist auch ihr Aktionsraum (Begon et al. 2017). Eine Fischart mit 20cm durchschnittlicher Größe müsste eine MPA von 1,8km² besitzen um ausreichend geschützt zu sein (Begon et al. 2017). Eine MPA sollte 12,5 mal so groß sein wie die *home range* um im Gegensatz zum Fischereidruck außerhalb des Reservates den Druck in der MPA auf 2% zu senken (Begon et al. 2017). 30 % aller Meeresschutzgebiete sind allerdings kleiner als die oben berechnete Fläche von 1,8km² und bieten daher keinen guten Schutz für typische Fischarten, die 20cm oder länger werden (Begon et al. 2017; Mora et al. 2006). Das bedeutet auch dass kaum Schutzgebiete vorhanden sind, die Papageifische oder Haie und Top-Prädatoren schützen, da diese eine enorme *home range* besitzen (Begon et al. 2017).

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Anzahl der Jahre, die das MPA besteht. Denn je länger eine MPA besteht, desto besser sind die Ergebnisse, wie bspw. die Wachstumsrate der Korallen (Selig und Bruno 2010). In Langzeitstudien ging die Korallendecke 14 Jahre nach Einführung von MPAs kontinuierlich zurück und erst ab da wuchs diese wieder. Im Indo-Pazifik nahm sie dagegen nur 5 Jahre lang ab und wuchs dann mit einer sehr hohen Wachstumsrate (Selig und Bruno 2010). McClanahan et al. sprechen davon, dass 37 Jahre notwendig sind, um ökologische Status zu wahren (2006).

Auch der Einfluss des Menschen auf die Ökosysteme hat Einfluss auf den Erfolg der MPAs. An Riffen mit hohem menschlichen Einfluss war die Wahrscheinlichkeit Top-Prädatoren zu finden nahezu 0% (Cinner et al. 2018). Darüber hinaus nimmt die Biomasse der Fische proportional zum Anstieg des menschlichen Einflusses um das MPA ab. Dies liegt daran, dass die MPAs zu klein sind, da große Fische und Top-Prädatoren aus den MPAs herausschwimmen und in den Netzen der Fischer*innen landen. Die Fischbiomasse war 25% niedriger, wenn intensiver menschlicher Einfluss um die MPA herrschte (Cinner et al. 2018).

Die Rate neuer entstehender MPAs ist zwar sehr hoch, dennoch müssen die Kriterien berücksichtigt werden, damit ein effektiver Rückzugsort entstehen kann. MPAs sollten *no take zones*, alt (mindestens 10 Jahre), groß (ca. 100km²), isoliert und gut durchgesetzt werden (*NEOLI: no take, well enforced, old, large, isolated*) (Edgar et al. 2014). Die gute Durchsetzung bezieht sich darauf, dass zwar 1,4% MPAs *no take zones* sind, aber nur 0,01% ein geringes Risiko auf Wilderei haben (Mora et al. 2006).

Je mehr der fünf NEOLI-Aspekte eingehalten werden, desto effektiver ist auch das MPA. Jedoch gab es keinen Unterschied zwischen befischten Plätzen, wenn die MPAs nur ein oder zwei Aspekte erfüllten. Alle folgenden Werte sind in Bezug auf befischte Riffe zu bewerten. Wenn drei Aspekte erfüllt wurden, war die gesamte Fischbiomasse 30% höher, die gesamte Biomasse großer Fische 66% höher und Haifischbiomasse 104% höher. Wenn alle fünf Aspekte von einer MPA erfüllt wurden, war die gesamte Fischbiomasse 244% höher, die Biomasse großer Fische um 840% und die der Haie 1990% höher. Diese Werte zeigen, welche enormen Möglichkeiten MPAs bieten, wenn sie gut durchgesetzt werden (Edgar et al. 2014).

5.2.3 *marine protected area*- Netzwerke

Neben den NEOLI-Aspekten die für die Durchführung einzelner MPAs entscheidend sind, ist ein sehr wichtiger Aspekt die Vernetztheit, die explizit für die Konnektivität der MPAs eine besondere Rolle spielt. Es existieren sogenannte MPA-Netzwerke. Ein MPA-Netzwerk ist eine Sammlung von MPAs die kooperativ und synergetisch zusammenwirken, um ökologische Ziele effektiver und umfassender zu schützen als es individuelle könnten (McLeod et al. 2009). Dieses System der Netzwerke ist effektiver als einzelne MPAs, da sie verhindern, dass die Verbindung zwischen einzelnen Habitaten oder Populationen verloren geht (Nugues und Ferse 2011).

Jedoch sind sogar rein marine MPA-Netzwerke noch zu kleinskalig, da z.B. unbedachte Landnutzung außerhalb der MPAs zu einer Eutrophierung der MPAs führen kann (Nugues und Ferse 2011). Deshalb sollte eine enge Kopplung mit Landmanagement vorhanden sein um eine Eutrophierung durch Landeingetragene Nährstoffe zu verhindern. Flusseinzugsgebiete müssen besser betreut werden, es muss weniger abgeholzt werden und weniger Düngemittel verwendet werden (Nugues und Ferse 2011). Darüber hinaus muss ein Schutz von angrenzenden Ökosystemen wie Mangroven oder Seegraswiesen gewährleistet sein, da diese Kinderstuben für viele Fische bietet (Nugues und Ferse 2011). Auf der anderen Seite schützen Korallenriffe Mangroven, indem sie die Erosion durch Wellen verringern. Mangroven schützen im Gegenzug Seegraswiesen und Korallenriffe vor einer Versandung. Diese funktionelle Verbundenheit von verschiedenen Ökosystemen und Habitaten darf nicht vergessen werden, um die Ökosystemfunktionen und -resilienz zu bewahren (McLeod et al. 2009). Daher sollten MPA-Netzwerke viele verschiedene Habitate abdecken, wie Seegraswiesen und eine Reihe von verschiedenen Mangrovingemeinschaften. Zudem sollten 20-30% jedes Habitats in MPA-Netzwerke aufgenommen werden um die Biodiversität der Region gewährleisten zu können (McLeod et al. 2009).

Zusätzlich müssen Schutzorte im Riff identifiziert werden, die Korallenbleichen überleben könnten. So könnte dann eine Konnektivität zwischen diesen und möglicherweise anfälligeren Standorten gewährleistet werden, um Neubesiedlungen zu ermöglichen. Neben den

Schutzorten sollten auch ökologisch wichtige Orte (nursery ground, fish spawning aggregation sites, high species diversity, high endemic rates) identifiziert und geschützt werden. Damit die globalen Stressoren wie Temperaturanstieg abgedeckt sind, sollten möglichst viele diverse Standorte gewählt werden, um ein Überleben zu garantieren, da schwer vorherzusagen ist, unter welchen Bedingungen welches Riff überleben kann. (McLeod et al. 2009).

5.2.4 Grenzen von *marine protected areas*

Die lokalen Faktoren für schützenswerte Gebiete bestimmt der Artenreichtum, die Einzigartigkeit (endemische Arten) und das Ausmaß der Gefährdung (Begon et al. 2017). Obwohl diese Faktoren lokal die wichtigsten sind, ist die globale Verteilung von MPAs am Wohlstand ausgerichtet. Daher existieren Schutzgebiete nicht immer nur da, wo es notwendig wäre, sondern dort wo es die Möglichkeiten dazu gibt (Begon et al. 2017). Viele Korallenriffe sind Nahrungs- und Einkommensgrundlage vieler verarmter Bewohner (Nugues und Ferse 2011). In diesen Gebieten müssten zusätzlich zu den ökologischen Faktoren die soziale und ökonomische Resilienz der Bewohner gesteigert werden, da ohne Geld und Akzeptanz keine Umsetzung stattfinden kann (Nugues und Ferse 2011). Die fehlende Akzeptanz hindert vor allem die Durchsetzung großskaliger MPAs, da große MPAs meist lokale Fischgründe mit einbeziehen. Daher kommt häufig eine sehr große Anzahl kleiner MPAs zustande (McLeod et al. 2009). Es müssen sowohl menschliches Wohlbefinden, als auch die Umweltbedingungen verbessert werden (Nugues und Ferse 2011). Dies könnte in Form von Subventionen, alternativen Arbeits-/Einkommensmöglichkeiten oder Öffentlichkeitsarbeit unter dem Motto „*raising awareness*“ stattfinden (Nugues und Ferse 2011).

Obwohl MPAs mit guter Durchführung eine gute Möglichkeit sind, können sie Riffe nicht vor den globalen Faktoren der Ozeanversauerung und erhöhter Wassertemperaturen schützen (Nugues und Ferse 2011). Darüber hinaus können auch keine Korallenbleichen per se verhindert werden. Denn selbst im GBR in einer *no take zone* ist die Abundanz der Korallen und die Artenvielfalt durch Korallenbleichen zurückgegangen (Hughes et al. 2007). Trotzdem ist das Konzept die Resilienz zu steigern mit gesunden Fischbeständen entscheidend, um *phase shifts* verhindern zu können (Hughes et al. 2007).

Ein Erhalt der Biodiversität ist essentiell, denn es existieren schlafende funktionelle Gruppen wie *Platax pinnatus* (Fledermausfischart). Diese spielt im Korallenriff eigentlich keine große Rolle und frisst Invertebraten (Wirbellose). Bei einem Makroalgenausbruch fing diese Art jedoch an diese abzuweiden und so die Korallen vor einem Überwuchs zu schützen. Da noch nicht bekannt ist, welche Art unter welchen Bedingungen welche Funktionen erfüllt, sollte das Ziel sein die Biodiversität zu bewahren, wodurch auch die Anzahl potenzieller funktioneller Gruppen geschützt werden kann (Nugues und Ferse 2011).

Die Stärkung der Resilienz, durch MPAs, ist daher nicht die endgültige Lösung, aber sie ist wichtig, um Zeit zu gewinnen, denn wenn bessere Möglichkeiten der Riffkonservation bestehen, müssen noch intakte Riffe auf der Welt existieren (Nugues und Ferse 2011). Aktive Restauration kann somit nur einen Teil beitragen, aber kann keinesfalls das Schicksal der Riffe verbessern, wenn sich die globalen Faktoren des Klimawandels nicht verändern.

Die Gesamtfläche der Schutzgebiete ist nicht im Ansatz ausreichend um die Biodiversität zu erhalten (Begon et al. 2017). Der Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) fordert 20-30% der Meeresfläche unter Schutz zu stellen (2013). Momentan sind es ca. 1,6% und bis 2020 wurde sich das internationale Ziel gesetzt 10 % unter Schutz zu stellen, dabei ist unklar inwiefern dieser Trend erreicht werden kann oder nicht (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2006, 2013). Insgesamt lässt sich aber sagen, dass das globale MPA-Netzwerk nicht ausreicht, um die minimalen Anforderungen für einen adäquaten Schutz für Korallenriffe zu bieten (Mouillot et al. 2016).

Ein weiterer Ansatz wäre es mechanisch geschädigte, degradierte oder nivellierte Riffe wiederzubeleben. Dabei wird eine Drahtmatrix im Wasser unter Strom gesetzt. Durch einen Gleichstrom sammeln sich dort Kalziumkarbonat und andere Mineralien. Diese Matrix bildet im Folgenden Siedlungssubstrat, sodass sich neue Korallenlarven anlagern können. Die Neubesiedlungsphase von 6-12 Monaten kann beschleunigt werden, wenn Korallenstücke auf diese Stromdrähte gesetzt werden. Nach nur 2-3 Monaten sind diese fixiert, der Strom kann abgeschaltet werden und die Korallen können wachsen. Es gilt als sehr umweltfreundliche Methode, da nur ein Minimum an Fremdkörpern ins Ökosystem gelangt und der Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden kann. Diese Methode soll eine Wiederbesiedlung und Rehabilitation von Riffen erleichtern (Podbregar und Lohmann 2014; Schuhmacher 1999).

6. Fazit

Obwohl das wichtigste Ziel für Riffmanager die Konservierung der Korallenpopulationen sein sollte, sind die Maßnahmen zum Schutz von Korallenriffen reaktiv (Bruno et al. 2009). Die präventiven Maßnahmen wie MPAs zeigen durch ihre unzureichende Durchsetzung kaum Wirkung und können großskalige Korallenbleichen nicht verhindern. Hughes et al. argumentieren daher, dass die jetzigen Riffe nicht erhalten werden können und wir es uns zum Ziel machen müssen, die Korallenriffe mit den wichtigsten Ökosystemfunktionen durchs Anthropozän zu steuern (2017). Die Karibik wird schon jetzt nicht mehr zu ihrem Ursprungszustand zurückkehren können (Hughes et al. 2017).

Die größte Bedrohung für tropische Korallenriffe ist der Klimawandel mit den globalen Folgen der Ozeanversauerung und Erwärmung der Ozeane. Die Maßnahmen der Ökosystemkonservierung beschränken sich dabei meist auf lokale Stressoren. Dies ist ungenügend und wird die Korallenriffe dieser Erde nicht retten können.

Die in der Einleitung aufgegriffene Frage: „Inwiefern ein Überleben der Korallenriffe im Anthropozän möglich ist?“, kann hier nur ungenügend beantwortet werden und hängt stark von der Politik der nächsten Jahre und Jahrzehnte ab. Denn selbst wenn ein sofortiger Stopp der CO₂-Emissionen durchgesetzt werden würde, sind wir sogar mit dem 2.6 Szenario (bestmögliches Szenario) des IPCC auf dem besten Wege Korallenriffe zu vernichten (s. Anhang; Abb. 7) (Nugues und Ferse 2011).

Hoegh-Guldberg et al. beschreiben im IPCC-1,5° Bericht, dass 70-90 % der globalen Korallenriffe aussterben werden, wenn wir den Temperaturanstieg auf 1,5 °C begrenzen werden (2018). Die aktuelle globale Politik lässt eher darauf schließen, dass wir einen Anstieg über zwei Grad bis zum Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen haben, was einen Verlust von 99 % der weltweiten Korallenriffe bedeuten würde (Hoegh-Guldberg et al. 2018).

Dennoch sollte man sich diesen Werten nicht hingeben, sondern für ein Überleben der Korallenriffe kämpfen. Dafür müssen wir unser anthropozentrisches Denken ablegen. Anstatt uns zu fragen welche Ökosystemdienstleistungen die Korallenriffe dem Menschen bieten, sollten wir uns fragen, was wir für den Erhalt der Korallenriffe tun können. Da die Ozeanversauerung und Erderwärmung zentrale Faktoren sind, die zur Zerstörung von Korallenriffen beitragen, sollte jede*r darauf achten die CO₂-Emissionen weitestgehend zu senken. Dies beginnt bei der täglichen Autofahrt und geht über die Urlaubsplanung bis zum täglichen Einkauf im Supermarkt, wobei regionale und saisonale Produkte die CO₂-Emissionen senken können. Insgesamt muss somit ein Umdenken sozialer Normen stattfinden, um einerseits den Klimawandel einzuschränken und gleichzeitig Korallenriffe zu schützen. Denn Klimaschutz ist gleichzeitig Korallenschutz (Interview mit Professor Gert Wörheide, 16.04.2019). Wir können alle etwas

dazu beitragen, dass dieses wunderbare, vielfältige und hochkomplexe Ökosystem bestehen bleibt.

Ein soziales Umdenken könnten Projekte wie „Dock-to-Dish“ ins Rollen bringen. „Dock-to-Dish“ ist ein Projekt, in dem regionale Fischer direkt mit Restaurants kooperieren. Anstatt als Konsument ins Restaurant zu gehen und eine bestimmte Art von Fisch zu verlangen, setzt „Dock-to-Dish“ beim Ökosystem an. Es wird nur gefischt, was das Ökosystem bietet und dies kann von Saison zu Saison und von Tag zu Tag unterschiedlich sein. Der Konsument kann also nur das essen, was die Fischer und das Ökosystem an dem Tag anbieten konnten. Zusätzlich wird kein CO² für den Transportweg in die Luft abgegeben. Somit werden die lokalen Fischgründe nicht überfischt und CO² wird eingespart (WWF 2019).

Der Mensch darf also nicht ganzjährig alles verlangen, sondern wir müssen uns an Ökosysteme anpassen und „Dock-to-Dish“ stellt ein sehr gutes Konzept in die richtige Richtung dar. Eine Anpassung und Veränderung sozialer Normen wird also entscheidend für ein Überleben der Korallenriffe dieser Erde sein (Hughes et al. 2017).

Wir müssen nur in unserem alltäglichen Leben darauf achten, so umweltfreundlich wie möglich zu handeln. Vielleicht lassen wir mal das Auto stehen und nehmen stattdessen das Fahrrad, anstatt Urlaub in Dubai zu machen, kann man auch in der eigenen Region ans Meer oder in die Berge fahren.

Darüber hinaus kontrollieren die Konsumenten den Markt. Wir als Konsumenten können also bestimmen was im Supermarkt angeboten wird. Indem wir umweltfreundlich einkaufen, zeigen wir dem Markt unsere Einstellung zur Umwelt. Obwohl es viele Handlungsmöglichkeiten gibt den Klimawandel zu reduzieren, muss schnell gehandelt werden, denn bis 2050 könnten 70 %, 75 % oder sogar 95 % der Korallenriffe der Erde ausgestorben sein (Leinfelder 2008; McLeod et al. 2009; Podbregar und Lohmann 2014).

Wir alle müssen uns also selber die Frage stellen: „Was trage ich dazu bei, dass ein Überleben der Korallenriffe im Anthropozän möglich ist?“ Ob diese Bemühungen dann ausreichen bleibt abzuwarten.

7. Literaturverzeichnis

- Asaeda, T. & Wolanski, E. (2002). Settling of muddy marine snow. *Wetlands Ecology and Management* 10 (4), 283–287. doi:10.1023/A:1020348918829
- Beck, E. (2013). *Die Vielfalt des Lebens. Wie hoch, wie komplex, warum?* (1. Aufl.). Weinheim: Wiley-VCH.
- Begon, M., Howarth, R. W. & Townsend, C. R. (2017). *Ökologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bellwood, D. R., Hoey, A. S., ACKERMAN, J. L. & DEPCZYNSKI, M. (2006). Coral bleaching, reef fish community phase shifts and the resilience of coral reefs. *Global Change Biology* 12 (9), 1587–1594. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01204.x
- Berumen, M. L. & Pratchett, M. S. (2006). Recovery without resilience: persistent disturbance and long-term shifts in the structure of fish and coral communities at Tiahura Reef, Moorea. *Coral Reefs* 25 (4), 647–653. doi:10.1007/s00338-006-0145-2
- (BIOACID, Hrsg.). (2012). Das andere CO²-Problem: Ozeanversauerung, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. https://www.geomar.de/fileadmin/content/entdecken/schule/Downloads_Schule/BIOACID_Experimente_2012.pdf.
- Brown, B. E., Dunne, R. P., Somerfield, P. J., Edwards, A. J., Simons, W. J. F., Phongsuwan, N., Putschim, L., Anderson, L. & Naeije, M. C. (2019). Long-term impacts of rising sea temperature and sea level on shallow water coral communities over a ~40 year period. *Scientific reports* 9 (1), 1–12. doi:10.1038/s41598-019-45188-x
- Bruno, J. F., Sweatman, H., Precht, W. F., Selig, E. R. & Schutte, V. G. W. (2009). Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral reefs. *Ecology* 90 (6), 1478–1484. doi:10.1890/08-1781.1
- Campbell, N. A., Reece, J. B., Kratochwil, A. & Lazar, T. (Hrsg.). (2009). *Biologie* (Pearson Studium - Biologie, 8., aktualisierte Aufl. [der engl. Orig.-Ausg., 3. Aufl. der dt. Übers.]). München: Pearson Studium.
- Cinner, J. E., Maire, E., Huchery, C., MacNeil, M. A., Graham, N. A. J., Mora, C., McClanahan, T. R., Barnes, M. L., Kittinger, J. N., Hicks, C. C., D'Agata, S., Hoey, A. S., Gurney, G. G., Feary, D. A., Williams, I. D., Kulbicki, M., Vigliola, L., Wantiez, L., Edgar, G. J., Stuart-Smith, R. D., Sandin, S. A., Green, A., Hardt, M. J., Beger, M., Friedlander, A. M., Wilson, S. K., Brokovich, E., Brooks, A. J., Cruz-Motta, J. J., Booth, D. J., Chabanet, P., Gough, C., Tupper, M., Ferse, S. C. A., Sumaila, U. R., Pardede, S. & Mouillot, D. (2018). Gravity of human impacts mediates coral reef conservation gains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (27), E6116-E6125. doi:10.1073/pnas.1708001115
- Dubinsky, Z. & Stambler, N. (2011). *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V.
- Dudley, N. (Hrsg.). (2013). *Guidelines for applying protected area management categories including IUCN WCPA best practice guidance on recognising protected areas and assigning management categories and governance types* (Best practice protected area guidelines series, Bd. 21). Gland: IUCN.
- Edgar, G. J., Stuart-Smith, R. D., Willis, T. J., Kininmonth, S., Baker, S. C., Banks, S., Barrett, N. S., Becerro, M. A., Bernard, A. T. F., Berkhout, J., Buxton, C. D., Campbell, S. J.,

- Cooper, A. T., Davey, M., Edgar, S. C., Försterra, G., Galván, D. E., Irigoyen, A. J., Kushner, D. J., Moura, R., Parnell, P. E., Shears, N. T., Soler, G., Strain, E. M. A. & Thomson, R. J. (2014). Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature* 506 (7487), 216–220. doi:10.1038/nature13022
- Fabricius, K. E. & Wolanski, E. (2000). Rapid Smothering of Coral Reef Organisms by Muddy Marine Snow. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 50 (1), 115–120. doi:10.1006/ecss.1999.0538
- Frieler, K., Meinshausen, M., Golly, A., Mengel, M., Lebek, K., Donner, S. D. & Hoegh-Guldberg, O. (2013). Limiting global warming to 2 °C is unlikely to save most coral reefs. *Nature Climate Change* 3 (2), 165–170. doi:10.1038/nclimate1674
- Graham, N. A. J., Jennings, S., MacNeil, M. A., Mouillot, D. & Wilson, S. K. (2015). Predicting climate-driven regime shifts versus rebound potential in coral reefs. *Nature* 518 (7537), 94–97. doi:10.1038/nature14140
- Hatcher, B. G. (1997). Coral reef ecosystems: how much greater is the whole than the sum of the parts? *Coral Reefs* 16 (1), 77-91. <https://doi.org/10.1007/s003380050244>.
- Hempel, G., Bischof, K. & Hagen, W. (Hrsg.). (2017). *Faszination Meeresforschung. Ein ökologisches Lesebuch* (2. Auflage). Deutschland: Springer.
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R. & et al. (2018). Chapter 3: Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.), *Global Warming of 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change* .
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A. & Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science (New York, N.Y.)* 318 (5857), 1737–1742. doi:10.1126/science.1152509
- Hoegh-Guldberg, O., R. Cai, E. S. Poloczanska, P. G. Brewer, S. Sundby, K. Hilmi, V. J. Fabry & S. Jung. (2014). The Ocean. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Part B, S. 1655–1731). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hughes, T. P., Rodrigues, M. J., Bellwood, D. R., Ceccarelli, D., Hoegh-Guldberg, O., McCook, L., Moltschanowskyj, N., Pratchett, M. S., Steneck, R. S. & Willis, B. (2007). Phase shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Current biology : CB* 17 (4), 360–365. doi:10.1016/j.cub.2006.12.049
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., van de Leemput, I. A., Lough, J. M., Morrison, T. H., Palumbi, S. R., van Nes, E. H. & Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature* 546 (7656), 82–90. doi:10.1038/nature22901
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Chase, T. J., Dietzel, A., Hill, T., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Jacobson, M., Kerswell, A., Madin, J. S., Mieog, A., Paley, A. S., Pratchett, M. S., Torda, G. & Woods, R. M. (2019). Global warming impairs

- stock-recruitment dynamics of corals. *Nature* 568 (7752), 387–390. doi:10.1038/s41586-019-1081-y
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). The Ocean. In V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea & K. J. Mach (Hrsg.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (S. 1655–1732). Cambridge: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap30_FINAL.pdf.
- IPCC-Koordinierungsstelle, D. (2018). 1,5 °C Globale Erwärmung (Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger). https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf. Zugegriffen: 26. Juli 2019.
- Jackson, J. B., Kirby, M. X., Berger, W. H., Bjorndal, K. A., Botsford, L. W., Bourque, B. J., Bradbury, R. H., Cooke, R., Erlandson, J., Estes, J. A., Hughes, T. P., Kidwell, S., Lange, C. B., Lenihan, H. S., Pandolfi, J. M., Peterson, C. H., Steneck, R. S., Tegner, M. J. & Warner, R. R. (2001). Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science (New York, N.Y.)* 293 (5530), 629–637. doi:10.1126/science.1059199
- Knowlton, N. (2001). The future of coral reefs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98 (10), 5419–5425. doi:10.1073/pnas.091092998
- Leinfelder, R. (2003). *Korallenriffe- Zentren der Artenvielfalt und Evolutin. Hanscsg, W. (ed): Katastrophen in der Erdgeschichte. Wendezeiten des Lebens.- Museo, (S. 180–199).* http://userpage.fu-berlin.de/leinfelder/palaeo_de/edu/pdf_divers/Leinfelder_in_Hansch03.pdf.
- Leinfelder, R. R. (Hrsg.). (2008). *Abgetaucht*. Leinfelden-Echterdingen: Konradin-Verl. Kohlhammer.
- Loya, Y., Puglise, K. A. & Bridge, T. C.L. (2019). *Mesophotic Coral Ecosystems* (Bd. 12). Cham: Springer International Publishing.
- Mathesius, S., Hofmann, M., Caldeira, K. & Schellnhuber, H. J. (2015). Long-term response of oceans to CO2 removal from the atmosphere. *Nature Climate Change* 5 (12), 1107–1113. doi:10.1038/nclimate2729
- McClanahan, T. R., Marnane, M. J., Cinner, J. E. & Kiene, W. E. (2006). A comparison of marine protected areas and alternative approaches to coral-reef management. *Current biology : CB* 16 (14), 1408–1413. doi:10.1016/j.cub.2006.05.062
- McLeod, E., Salm, R., Green, A. & Almany, J. (2009). Designing marine protected area networks to address the impacts of climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7 (7), 362–370. doi:10.1890/070211
- Mora, C., Andréfouët, S., Costello, M. J., Kranenburg, C., Rollo, A., Veron, J., Gaston, K. J. & Myers, R. A. (2006). Ecology. Coral reefs and the global network of Marine Protected Areas. *Science (New York, N.Y.)* 312 (5781), 1750–1751. doi:10.1126/science.1125295
- Mouillot, D., Parravicini, V., Bellwood, D. R., Leprieur, F., Huang, D., Cowman, P. F., Albouy, C., Hughes, T. P., Thuiller, W. & Guilhaumon, F. (2016). Global marine protected areas do not secure the evolutionary history of tropical corals and fishes. *Nature communications* 7, 10359. doi:10.1038/ncomms10359
- Mumby, P. J. (2009). Phase shifts and the stability of macroalgal communities on Caribbean coral reefs. *Coral Reefs* 28 (3), 761–773. doi:10.1007/s00338-009-0506-8

- Nedosyko, A. M., Young, J. E., Edwards, J. W. & Burke da Silva, K. (2014). Searching for a toxic key to unlock the mystery of anemonefish and anemone symbiosis. *PLoS one* 9 (5), e98449. doi:10.1371/journal.pone.0098449
- Nugues, M. & Ferse, S. C. A. (2011). Maßnahmen zum Schutz von Korallenriffen, 330–336. <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2013/02/Nugues&Ferse.pdf>.
- Osborne, K., Thompson, A. A., Cheal, A. J., Emslie, M. J., Johns, K. A., Jonker, M. J., Logan, M., Miller, I. R. & Sweatman, H. P. A. (2017). Delayed coral recovery in a warming ocean. *Global change biology* 23 (9), 3869–3881. doi:10.1111/gcb.13707
- Pachauri, R. K. & Mayer, L. (Hrsg.). (2015). *Climate change 2014. Synthesis report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Pisapia, C., Burn, D. & Pratchett, M. S. (2019). Changes in the population and community structure of corals during recent disturbances (February 2016–October 2017) on Maldivian coral reefs. *Scientific reports* 9 (1), 8402. doi:10.1038/s41598-019-44809-9
- Podbregar, N. & Lohmann, D. (2014). Im Fokus: Meereswelten.
- Röder, K. (16.04.2019). "Nur noch nackte Skelette". *Interview mit Professor Gert Wörheide*. München.
- Ring, C. (2017). Der bleiche Tod des Great Barrier Reefs. *Welt*. <https://www.welt.de/wissenschaft/plus163666584/Der-bleiche-Tod-des-Great-Barrier-Reefs.html>. Zugegriffen: 30. Juli 2019.
- Roder, C. & Heiss, G. A. 2016. Korallenriffe -Auswirkungen von Erwärmung und Versauerung auf die Biodiversität. In *Warnsignal Klima: Die Biodiversität* (S. 254–259). http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2017/01/roder_heiss.pdf.
- Ryan, E. J., Hanmer, K. & Kench, P. S. (2019). Massive corals maintain a positive carbonate budget of a Maldivian upper reef platform despite major bleaching event. *Scientific reports* 9 (1), 1–11. doi:10.1038/s41598-019-42985-2
- Sadava, D., Hillis, D. M. & Heller, H. C. (2019). *Purves Biologie* (10th ed. 2019).
- Schuhmacher, H. (1999). Korallenriffe—Bedrohungen, Schutzkonzepte und Rehabilitationsmaßnahmen. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 51 (S10), 17–23. doi:10.1007/BF02933680
- Schuhmacher, H. & Reinicke, G.-B. (2011). 3.18 Korallenriffe- Folgen der Erwärmung und Versauerung. In J. L. Lozán, H. Graßl, L. Karbe & K. Reise (Hrsg.), *Warnsignal Klima - die Meere. Änderungen & Risiken : wissenschaftliche Fakten* (S. 214–219). Hamburg: Wissenschaftliche Auswertungen. <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2013/02/Schuhmacher&Reinicke.pdf>.
- Selig, E. R. & Bruno, J. F. (2010). A Global Analysis of the Effectiveness of Marine Protected Areas in Preventing Coral Loss. *PLoS one* 5 (2). doi:10.1371/journal.pone.0009278
- Stuart-Smith, R. D., Brown, C. J., Ceccarelli, D. M. & Edgar, G. J. (2018). Ecosystem restructuring along the Great Barrier Reef following mass coral bleaching. *Nature* 560 (7716), 92–96. doi:10.1038/s41586-018-0359-9
- Thampi, V. A., Anand, M. & Bauch, C. T. (2018). Socio-ecological dynamics of Caribbean coral reef ecosystems and conservation opinion propagation. *Scientific reports* 8 (1), 2597. doi:10.1038/s41598-018-20341-0

- Umweltbundesamt. (2009). KLIMAWANDEL UND MARINE ÖKOSYSTEME. Meeresschutz ist Klimaschutz. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3805.pdf>. Zugegriffen: 25. Juli 2019.
- Umweltbundesamt. (2019). Atmosphärische Treibhausgas-Konzentration. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen>. Zugegriffen: 26. Juli 2019.
- UNITED NATIONS CONFERENCE ON STRADDLING FISH STOCKS AND HIGHLY MIGRATORY FISH STOCKS. AGREEMENT FOR THE IMPLEMENTATION OF THE PROVISIONS OF THE UNITED NATIONS CONVENTION ON THE LAW OF THE SEA OF 10 DECEMBER 1982 RELATING TO THE CONSERVATION AND MANAGEMENT OF STRADDLING FISH STOCKS AND HIGHLY MIGRATORY FISH STOCKS. (1995), 1–40. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N95/274/67/PDF/N9527467.pdf?OpenElement>. Zugegriffen: 18. August 2019.
- Wild, C., Huettel, M., Klueter, A., Kremb, S. G., Rasheed, M. Y. M. & Jørgensen, B. B. (2004). Coral mucus functions as an energy carrier and particle trap in the reef ecosystem. *Nature* 428 (6978), 66–70. doi:10.1038/nature02344
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). (2006). *Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten* [Elektronische Ressource]. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat d. Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). (2013). *Welt im Wandel - Menschheitserbe Meer Hauptgutachten. WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen*. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen.
- WWF. (2013). Klimawandel und Auswirkung auf die Meere, WWF. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klimawandel-Auswirkung-auf-die-Meere.pdf>.
- WWF. (2019). From Dock To Dish. <https://www.ourplanet.com/en/video/from-dock-to-dish/>. Zugegriffen: 26. August 2019.
- Y. Sawall. (2010). Coral Resistance to Natural and Anthropogenic Disturbances.
- Zaneveld, J. R., Burkepille, D. E., Shantz, A. A., Pritchard, C. E., McMinds, R., Payet, J. P., Welsh, R., Correa, A. M. S., Lemoine, N. P., Rosales, S., Fuchs, C., Maynard, J. A. & Thurber, R. V. (2016). Overfishing and nutrient pollution interact with temperature to disrupt coral reefs down to microbial scales. *Nature communications* 7, 1–12. doi:10.1038/ncomms11833
- ZEIT ONLINE. (2018). Korallenbleiche: Den Korallen bleibt keine Zeit mehr. *ZEIT ONLINE*. <https://www.zeit.de/wissen/2018-01/korallenbleiche-korallenriffe-klimawandel-erderwaer-mung-australien-terry-hughes>. Zugegriffen: 30. Juli 2019.
- Ziegler, M., Grupstra, C. G. B., Barreto, M. M., Eaton, M., BaOmar, J., Zubier, K., Al-Sofyani, A., Turki, A. J., Ormond, R. & Voolstra, C. R. (2019). Coral bacterial community structure responds to environmental change in a host-specific manner. *Nature communications* 10 (1). doi:10.1038/s41467-019-10969-5

8. Anhang



Abbildung 1

<https://www.planet-wissen.de/natur/meer/korallenriffe/index.html>

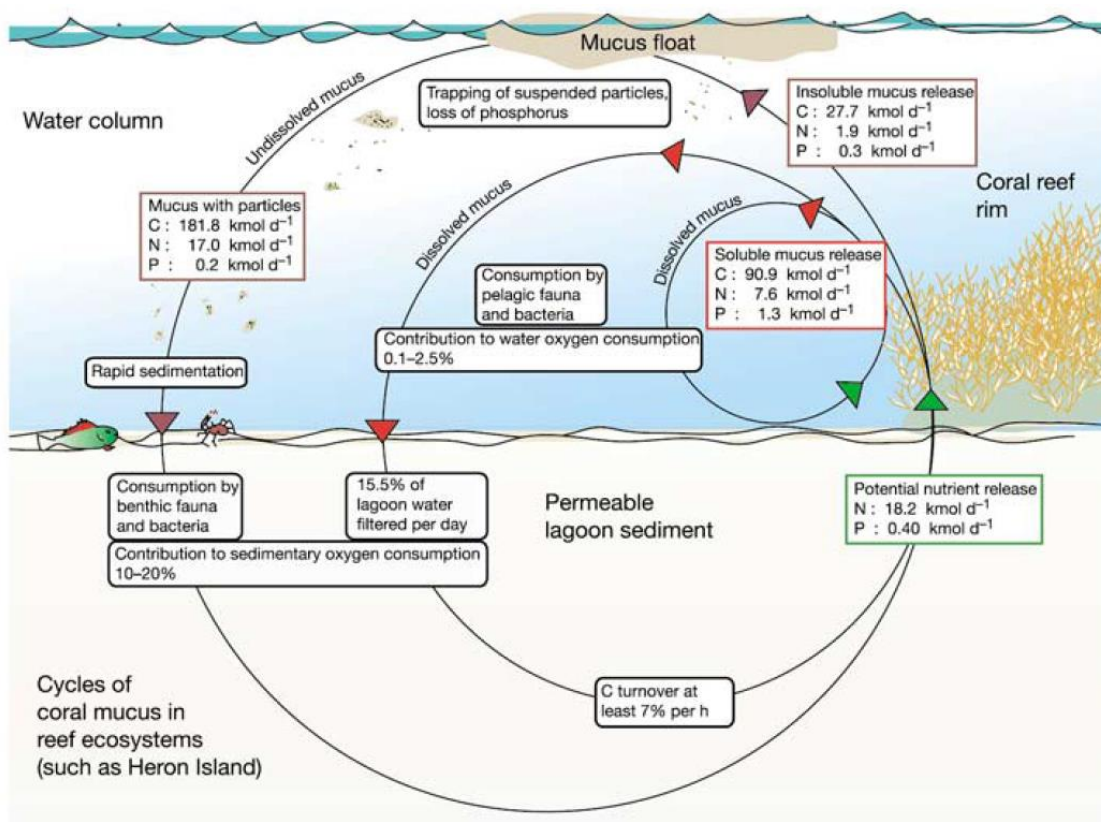


Abbildung 2

(Wild et al. 2004, S. 69)

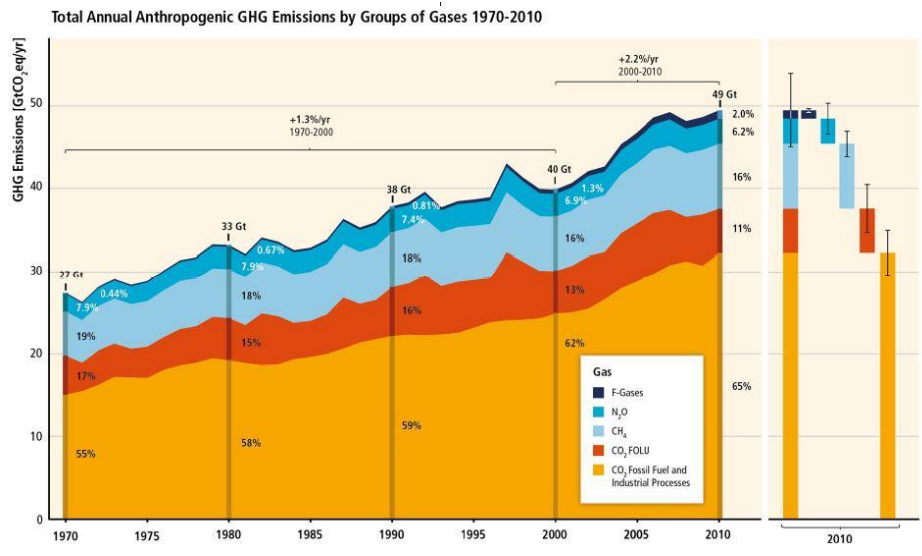


Abbildung 3
(Pachauri und Mayer 2015, S. 5)



Abbildung 4
<https://www.spiegel.de/fotostrecke/great-barrier-reef-grosse-korallenbleiche-bilder-fotostrecke-147860-5.htm>

IUCN categories of protected areas

Category	Description
I	Protected area managed mainly for science or wilderness protection (Strict Nature Reserve/Wilderness Area)
II	Protected area managed mainly for ecosystem protection and recreation (National Park)
III	Protected area managed mainly for conservation of specific natural features (Natural Monument or Feature)
IV	Protected area managed mainly for conservation through management intervention (Habitat/Species Management Area)
V	Protected area managed mainly for landscape/seascape conservation and recreation (Protected Landscape/Seascape)
VI	Protected area managed mainly for the sustainable use of natural ecosystems (Managed Resource Protection Area)

Abbildung 5

(Dudley 2013, S. 10)

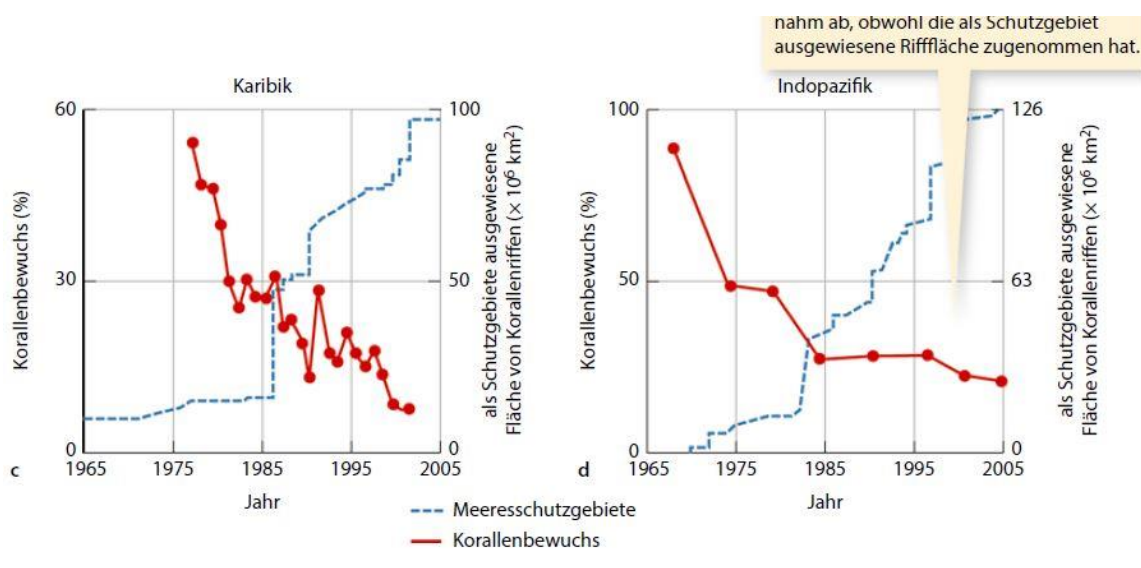


Abbildung 6

(Begon et al. 2017, S. 506)

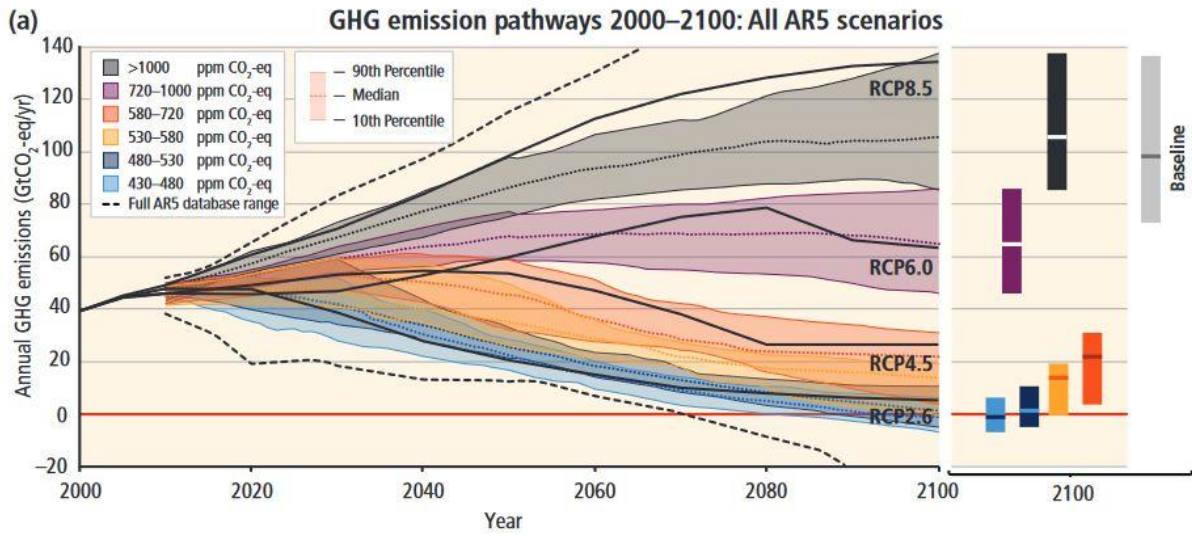


Abbildung 7

(Pachauri und Mayer 2015, S. 21)

9. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit –bei einer Gruppenarbeit den entsprechend gekennzeichneten Teil der Arbeit –selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wortwörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift