

4.7 Korallenriffe - Auswirkungen von Erwärmung und Versauerung auf die Biodiversität

CORNELIA RODER & GEORG A. HEISS

Korallenriffe - Auswirkungen von Erwärmung und Versauerung auf die Biodiversität: Korallenriffe sind akut vom Klimawandel bedroht. Immer wärmer werdendes Wasser und die Versauerung der Ozeane hinterlassen gravierende Spuren in einem der artenreichsten Ökosysteme unseres Planeten. Sie greifen in zwei der wichtigsten Prozesse für die Korallenriffbildung ein, die Photosynthese und die Kalzifizierung, und verursachen Massensterben und großflächige Rückgänge der Korallenbedeckung. Die komplexen Interaktionen zwischen lokalen und globalen Umwelteinflüssen, sowie das eng verflochtene Zusammenspiel von Biosphäre und abiotischer Umwelt erschweren zuverlässige Prognosen für eine zukünftige Entwicklung von Korallenriffen und ihrer Biodiversität. Es ist anzunehmen, dass sich das Ökosystem Korallenriff im Anthropozän nachhaltig und massiv verändern wird.

Coral reefs - consequences of warming and acidification on biodiversity: Coral reefs, amongst the most diverse ecosystems of our planet, are threatened by the effects of climate change. Rising water temperatures and ocean acidification interfere with two of the most relevant processes in reef growth, photosynthesis and calcification, and cause global mass mortalities and extensive reef degradation. Complex interactions between local and global environmental impacts, as well as countless interdependent relations between biosphere and habitat impede reliable predictions about future reef development and its associated biodiversity. It is supposed that coral reef ecosystems will substantially and lastingly change during the Anthropocene.

Korallenriffe gehören zu den artenreichsten Ökosystemen unseres Planeten. Obwohl sie weniger als 0,1% des Meeresbodens bedecken, leben etwa ein Viertel aller marinen Arten assoziiert mit Riffen. Korallenriffe nehmen damit eine Schlüsselrolle in der Aufrechterhaltung globaler mariner Biodiversität ein, als Kinderstube, Habitat oder Rohstoffquelle. Die Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre, vor allem des Kohlendioxid (CO_2), verändern die Umweltbedingungen für die Riffe und ihre Bewohner. Die kontinuierliche Erwärmung des Meerwassers in vielen Ozeanregionen und zusätzlich überdurchschnittlich lang anhaltende Perioden extremer Erwärmung verursachen das so genannte Korallenbleichen, von dem sich Korallen aufgrund der immer häufiger wiederkehrenden Unterwasserhitzeperioden nicht ausreichend erholen können. Die Verschiebung des Kohlenstoffgleichgewichts im Wasser bewirkt ausserdem dessen Versauerung und wirkt sich negativ auf die Bildung und den langfristigen Fortbestand des karbonathaltigen Grundgerüsts der Korallenriffe aus. Als Folge beobachtet man seit einiger Zeit eine Destabilisierung der Korallenriffe und deren weltweiten Rückgang, was ultimativ zum globalen Kollaps von Riffsystemen führen kann.

In diesem Kapitel werde die Konsequenzen von Ozeanerwärmung und -versauerung für die Biodiversität in Korallenriffen geschildert. Nach einer detaillierten Beschreibung über die Funktionsweise von Korallenriffen wird auf die Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen durch erhöhte Temperaturen und CO_2 -Konzentrationen eingegangen. Folgen für die Biodiversität in Korallenriffen werden erläutert und im Bezug auf Wechselwirkungen, auch mit anderen Stressoren, diskutiert. Nach einer kurzen Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf Tiefseekorallenriffe wird ein Ausblick auf mögliche Zukunftsszenarien gegeben.

Korallenriffe

Die Korallenpolypen der riffbildenden Steinkorallen (Ordnung Scleractinia) sind die Baumeister der Riffe; sie sind Tiere des Stammes der Nesseltiere, zu dem auch Quallen und Seeanemonen zählen. Der Polyp ist das Einzeltier einer Koralle. Er besteht im Wesentlichen aus einem Sack mit einer einzigen Öffnung, die als Mund und After dient, und einem Kranz von mehreren Tentakeln, die oft mit Nesselzellen bestückt sind. Polypen teilen sich immer wieder durch Knospung und bilden Kolonien, die wenige Zentimeter bis mehrere Meter groß werden können und an ihrer Unterseite ein Skelett aus Kalziumkarbonat ausbilden. Steinkorallen leben oft in Symbiose mit einzelligen, dinoflagellaten Algen der Gattung *Symbiodinium*, welche auch als Zooxanthellen bezeichnet werden.

Die Polypen sind meist farblos; es sind die Algen, die maßgeblich für die bräunlich-grünen Färbungen der Korallen verantwortlich sind. Die Zooxanthellen finden im Gewebe des Korallenwirts Schutz und Lebensraum. Gleichzeitig decken sie durch Photosynthese (Umwandlung von inorganischem Kohlendioxid in organische Zuckermoleküle mit Hilfe von Sonnenlicht) und eine effektive Verarbeitung der Abfälle aus dem Stoffwechsel ihres Wirts den überwiegenden Energiebedarf der Koralle. Durch die Fixierung von Kohlenstoff während der Photosynthese kommt es, geschützt durch das Korallengewebe, zu einer Verschiebung des chemischen Gleichgewichts an der Unterseite des Polypen. Hierbei gebildete Karbonationen begünstigen, in Kombination mit unlimitierten Mengen an Kalziumionen im Umgebungswasser, die Abscheidung von Aragonit (einer Form von Kalziumkarbonat, CaCO_3), aus dem die Skelette der Steinkorallen aufgebaut sind (GATTUSO et al. 1999). Diese biologisch angetriebene Mineralbildung, auch Kalzifizierung genannt, ist Grundlage für

die Bildung von Korallenriffen. Durch das chemische Zusammenspiel von Photosynthese und Kalzifizierung ist die Skelettbildung von Korallen unter Sonnenlicht um ein Vielfaches gesteigert. Die Prozesse zum Aufbau von Biomasse (durch Photosynthese) und zur Bildung dreidimensionaler Strukturen (durch Kalzifizierung) in Korallenriffen sind somit eng gekoppelt und maßgeblich gesteuert durch die Korallen-Zooxanthellen-Symbiose, aber auch beeinflusst durch die Umwelt (Abb. 4.7-1).

Ausschlaggebende Umweltfaktoren sind vor allem Temperatur, Lichtverfügbarkeit und Aragonitsättigung, welche teilweise auch in Abhängigkeit zueinander stehen (KLEYPAS et al. 1999). So wachsen Riffe in Gewässern, die Temperaturen von 18 °C nicht unterschreiten. Geografisch gesehen hängt diese Eigenschaft eng zusammen mit dem Sonnenstand, welcher in den Tropen und Subtropen ganzjährig hoch genug ist, im flachen Wasser ausreichend Sonnenlicht und Wärme für das Korallenwachstum zu spenden. Tropisches Flachwasser ist ausserdem mit Aragonit übersättigt, was dessen Ausfällung beim Skelettbau wesentlich erleichtert. Die Aragonitsättigung wird maßgeblich von Temperatur, Salzgehalt und Druck mitbestimmt.

Vorkommen und Biodiversität der Korallenriffe

Tropische und subtropische Korallenriffe säumen meist Küstengebiete in warmen Gewässern. Schon Charles Darwin registrierte den Kontrast zwischen der Fülle

von Leben in den Korallenriffen, und der Nährstoffarmut in den kristallklaren Gewässern, wo sie gedeihen. Dieser scheinbare Widerspruch (heute als Darwinsches Paradoxon bekannt) ist durch die außerordentliche Fähigkeit zu erklären, mit der Nährstoffe innerhalb dieser Ökosysteme recycelt werden.

Infolge der effektiven Korallensymbiose, hoher Biodiversität und dadurch begünstigter hoher Anpassungsfähigkeit können Riffe die vorherrschenden Umweltbedingungen entlang tropischer Küsten so gut nutzen, dass sie die größten biogenen Bauwerke unserer Erde bilden. Die lebendigen dreidimensionalen Strukturen bieten Ressourcen und zahlreiche Nischen für andere Lebewesen und stellen so die Grundlage für eine hohe Biodiversität: Heute sind etwa 100.000 verschiedene in Riffen lebende vielzellige Pflanzen- und Tierarten bekannt, darunter 1.400 riffbildende Korallenarten. Die gesamte Artenvielfalt in Korallenriffen wird auf 550.000 bis 1,3 Mio. Arten geschätzt, von denen ein Großteil bis heute unbeschrieben ist (FISHER et al. 2015).

Konsequenzen von steigenden Wassertemperaturen und sinkendem pH

Durch die vermehrte Emission von Treibhausgasen erwärmt sich unsere Atmosphäre. Wärme und Gase werden aus der Atmosphäre auch in die Weltmeere transportiert und verursachen dort chemische und biologische Veränderungen.

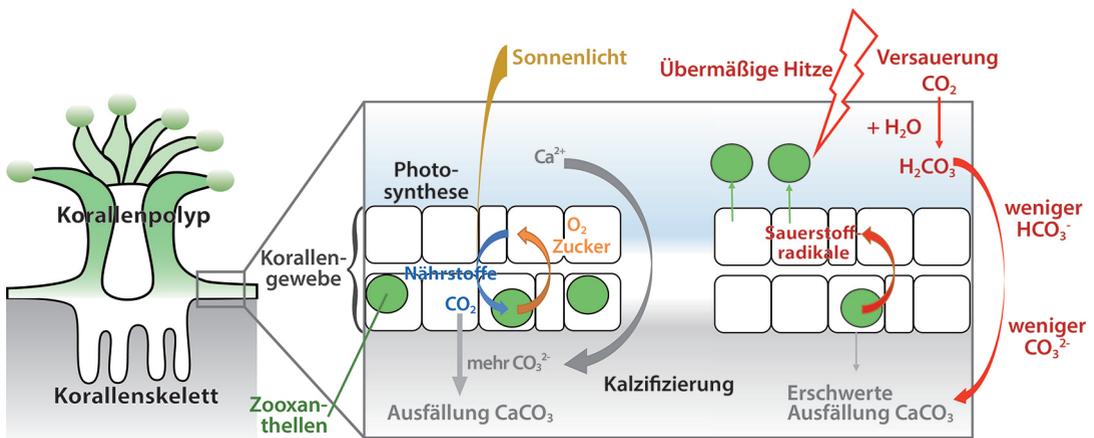


Abb. 4.7-1: Querschnitt durch einen Korallenpolypen: In den Zellen des Wirtstieres leben Zooxanthellen. Die effektive Symbiose zwischen Korallentier und Zooxanthellen ist die Grundlage der Riffbildung. Nährstoffe/Stoffwechselprodukte der Koralle werden mit Hilfe von Sonnenlicht und Kohlendioxid (CO₂) zu Sauerstoff (O₂) und Zucker umgewandelt (Photosynthese). Durch den Verbrauch von CO₂ kommt es zu einer Steigerung der Karbonat(CO₃²⁻)-Konzentration, welche die Bildung von Aragonit (CaCO₃) begünstigt (Kalzifizierung). Durch übermässige Hitze wird der Photosyntheseapparat der Zooxanthellen beschädigt, welche für den Wirt giftige Sauerstoffradikale bilden. Es kommt zur Abstossung der Zooxanthellen (Korallenbleiche) und zum Verlust der Energieproduktion. Gleichzeitig sinkt die Konzentration des photosynthetisch produzierten Karbonats, was einen erhöhten Energieaufwand bei der Kalzifizierung bewirkt. Diese wird in saurem Wasser aufgrund der Verschiebung im Karbonatsystem noch erschwert.

Erwärmung

Erhöhte Wassertemperaturen können die lebensnotwendige Symbiose zwischen Koralle und Zooxanthellen stören und die »Korallenbleiche« verursachen (Abb. 4.7-2), welche am stärksten für den globalen Rückgang von Korallenriffen verantwortlich ist: Übermäßige Wärme schädigt die Photosysteme der Symbionten und verursacht eine Störung der Photosynthese, was zur Produktion von Sauerstoffradikalen führt, welche wiederum toxisch für das Korallentier sind (LESSER 1996). Als Konsequenz kommt es zum Pigmentverlust oder zur Ausscheidung der Zooxanthellen durch den Wirtsorganismus (Abb. 4.7-1). Die gebleichte, (durch das darunterliegende Korallenskelett) weiß scheinende Koralle ist anschliessend gezwungen, ohne photosynthetische Nahrungsgrundlage auszukommen. Während der Korallenbleiche wird auch die Widerstandsfähigkeit der Koralle in Mitleidenschaft gezogen, was die Tiere anfälliger für andere Störfaktoren wie z.B. Bakterien, Viren und Pilze macht. Bei anhaltender Dauer der Korallenbleiche kann die Symbiose nicht wieder etabliert werden und die Koralle stirbt in Folge von Nährstoffmangel oder Krankheitsbefall (BROWN 1997). Bereits Temperaturanstiege von 1 bis 2 °C über einen Zeitraum von 3 bis 4 Wochen haben weltweite Massenbleichen von ganzen Korallenriffen verursacht (HOEGH-GULDBERG 1999). In den Jahren 1998 und 2010 haben Unterwasser-Hitzewellen, ausgelöst durch das Klimaphänomen »El Niño«, weltweite Korallenbleichen bewirkt, die ein Fünftel aller Riffe nachhaltig geschädigt oder zerstört haben. Im Jahr 2015 entstand eine erneute globale Hitzewelle, welche bereits länger andauert als alle vorher aufgezeichneten Wärmepetoden und deren Konsequenzen heute noch nicht abzusehen sind. Durch übermäßig erhöhte Temperaturen und den dadurch verursachten Photosyntheseverlust wird neben der Energiegewinnung gleichzeitig auch die Kalzifizierung der Koralle negativ beeinträchtigt (Abb. 4.7-1).

Versauerung

Eine weitere Konsequenz des erhöhten Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre ist die zunehmende Versauerung des Meerwassers. Diese hat negative Auswirkungen für Organismen, die ihre Schalen oder Skelette aus Kalziumkarbonat (Kalzit oder Aragonit) aufbauen. Löst sich CO_2 im Meerwasser (H_2O), geht es mit diesem in Verbindung und beeinflusst dort das sogenannte Karbonatsystem, nämlich das Verhältnis der drei gelösten inorganischen Kohlendioxidverbindungen Kohlensäure (H_2CO_3), Bikarbonat (HCO_3^-) und Karbonat (CO_3^{2-}). Diese liegen in thermodynamischem Gleichgewicht vor ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$) und regulieren den pH-Wert des Wassers (GATTUSO et al. 1999). Steigt die Konzentration von ge-

löstem CO_2 im Meerwasser, verschiebt sich das Gleichgewicht zwischen den inorganischen Kohlendioxidverbindungen zugunsten von Kohlensäure. Das Wasser wird saurer und es verringert sich die Konzentration der Karbonationen, was wiederum eine Abnahme der Aragonitsättigung zur Folge hat. Die Konsequenz ist ein höherer Energieaufwand für die Kalzifizierung (Bildung von Kalziumkarbonat-Verbindungen unter Verbrauch von Ca^{2+} und CO_3^{2-}) bzw. deren Rückgang (Abb. 4.7-1). Da ein Nettowachstum von Korallenriffen nur stattfinden kann, wenn die Zunahme an Kalk durch Wachstum von Korallen und anderen kalkproduzierenden Organismen die stetigen Erosionsprozesse von mechanischem Abrieb (z.B. durch Wellen oder Strömung) und Bioerosion (z.B. durch Fische, Seeigel, Würmer, Muscheln oder Schwämme) übersteigt, kann es so zu »negativem« Riffwachstum, also Rifferosion, kommen. Desweiteren kann eine Korallenriffabnahme auch aufgrund einer schnelleren Auflösung bestehender Riffstrukturen durch sinkende pH-Werte im Wasser angetrieben werden.

Auswirkungen auf die Biodiversität

Trotz absehbarer negativer Konsequenzen durch Biodiversitätsabnahme, wie den Rückgang von Ökosystemleistungen, -beständigkeit und -belastbarkeit, sind die Wechselwirkungen zwischen menschlichem Handeln und Artenverlust in Korallenriffen wenig erforscht. Dies liegt daran, dass Zusammenhänge von Prozessen in diesem Ökosystem komplex sind, aber auch an der Tatsache, dass die gewaltige Artenvielfalt in Riffen bis heute weitgehend unbeschrieben ist. Desweiteren fehlen census-basierte und langfristige Studien zur Schadenanfälligkeit und Gesundung von Riffsystemen und der damit verbundenen tatsächlichen Quantifizierung von Artensterben (KNOWLTON 2001).

Unter anderem ist bekannt, dass Erwärmung und Versauerung sich unterschiedlich stark auf unterschiedliche Organismengruppen, Lebensweisen und physiologische Prozesse auswirken. Während Beobachtungen bei Mollusken, Stachelhäutern oder Krustazeen nicht eindeutig sind, gelten unter anderem einige Fisch- und Algenarten als weniger empfindsam gegenüber Wärme und/oder Versauerung. Taxonomische Gruppen wie die Steinkorallen wiederum stehen in Verdacht besonders betroffen zu sein, gerade weil die wichtigen Prozesse von Photosynthese und Kalzifizierung beeinflusst werden und Korallen mit ihrer sessilen Lebensweise und langen Generationsdauer enormem Anpassungsdruck standhalten müssen (KROEGER et al. 2013). Aber auch innerhalb einer Organismengruppe gibt es Unterschiede. So können manche Korallenarten besser mit Temperaturschwankungen umgehen als andere, was

auch für verschiedene Korallen-assoziierte *Symbiodinium*-Arten gilt. Ein Mechanismus ist die Fähigkeit mancher Korallenarten, mit verschiedenen *Symbiodinium*-Arten in Symbiose zu gehen und somit durch den Austausch der Symbionten die Tier-Algen-Konstellation bestmöglich an die vorherrschenden Bedingungen anzupassen. Auch können manche Korallenarten ohne Riffbildung in Form einzelner Kolonien bestehen und die Polypen in einer versauerten Umgebung ohne Kalzifizierung überleben. Allerdings sind sekundäre Folgen wie eine verringerte Möglichkeit zur Fortpflanzung an isolierten Standorten oder ein erhöhter Fraßdruck durch fehlenden Schutz des Kalkskeletts nicht näher bekannt. Inwieweit ein Schwinden der Korallenriffe auch ein Aussterben von Korallen- und *Symbiodinium*-Arten bedeutet ist daher heute nicht bezifferbar.

Der Rückgang der Korallenriffe hat auch sekundäre Konsequenzen für deren Bewohner, zu denen unzählige Mengen Algen, Schwämme, Mollusken, Krebstiere, Stachelhäuter, Fische und andere Tiergruppen zählen. Entscheidend für die ortsansässige Biodiversität ist hierbei vor allem der Grad der Abhängigkeit vom Habitat. Viele Riff-assoziierte Arten können auch ausserhalb von Riffen vorkommen und sind somit nicht zwingend von dessen Strukturen abhängig. Eine fakultative Ortsansässigkeit resultiert somit nicht notwendigerweise im Aussterben einer Art, sondern zwingt diese zu einer Anpassung ihres Lebenswandels. Zeitgleich bildet ein durch Umwelteinflüsse modifiziertes Riff Lebensgrundlage für Organismen, die besser an die neuen Konditionen angepasst sind, in das neue Habitat drängen und

dieses kolonisieren (Abb. 4.7-2). Während aufgrund geringerer Habitatkomplexität und weniger Riffbedeckung auch die Abundanzen der Riffbewohner sinken, bleibt unklar, wie viele Arten in letzter Konsequenz tatsächlich aussterben. Dass sich aber sowohl physiologische Prozesse, wie auch Artenzusammensetzung, Biomasse und Vielfalt der Korallenriffe durch modifizierte Umweltbedingungen verändern, ist unbestritten (Abb. 4.7-3).

Letzlich sind auch angrenzende Ökosysteme in unbekanntem Maß durch den Rückgang der Korallenriffe beeinträchtigt. Durch negatives Riffwachstum kommt es zum Verlust der Wellenbrecher-Funktion von Riffen und somit abnehmendem Küstenschutz. Betroffen sind dann unter anderem Mangrovenwälder, Seegraswiesen und Strände, welche erhöhter Wellen- und Strömungsenergie ausgesetzt sind.

Wechselwirkungen von Stressoren

Wechselwirkungen von Erwärmung und Versauerung

Das Zusammenspiel von Erwärmung und Versauerung im Hinblick auf Ökosystemveränderungen in Riffen ist heute nur theoretisch diskutiert. Mit zunehmender Aufnahme von CO_2 im Oberflächenwasser verschiebt sich die für Riffbildung nötige Aragonitsättigung Richtung Äquator. Auf der anderen Seite kommt es durch die Erwärmung zu einer Verschiebung der Mindesttemperaturen im Wasser in Richtung der Pole. Folgerichtig würde eine hauptsächlich Temperatur-gesteuerte Riffverbreitung eine Ausbreitung oder Verdrängung der



Abb. 4.7-2: Korallenriff vor, während und nach einer Korallenbleiche (Amerikanisch-Samoa). Dauert die Korallenbleiche zu lange, sterben die Korallen ab. Zurück bleibt das Skelettgerüst, welches von anderen Organismengruppen, z.B. Algen oder Schwämmen besiedelt wird und im Laufe der Zeit erodiert (Foto: XL Catlin Seaview Survey - mit freundlicher Genehmigung durch »the ocean agency« - www.globalcoralbleaching.org/wp-content/uploads/2015/12/American-Samoa-Before-During-After2.jpg).

Riffe polwärts bedeuten, während eine Aragonitsättigungs-gesteuerte Verbreitung das Gegenteil bewirken würde. Gleichzeitig hängt die vom Ozean aufgenommene Menge an CO₂ unmittelbar von der Temperatur ab. Unter niedrigen Temperaturen wird mehr CO₂ aus der Atmosphäre aufgenommen, als sich in warmem Wasser lösen kann. Tropische und subtropische Gewässer nehmen daher weniger Gas auf als ihre nördlichen bzw. südlichen Gegenüber, was eine höhere Aragonitsättigung in warmem Wasser zur Folge hat. Somit könnten ansteigende Temperaturen der Versauerung entgegenwirken. Solange also die Thermotoleranz einer Art nicht überschritten ist und die interne pH-Regulierung zwischen Gewebe und Skelett weiter funktioniert, kann eine Reduktion der Kalzifizierung aufgrund von Ozeanversauerung durch warme Temperaturen aufgehoben werden. Da die relativen Signifikanzen der einzelnen Messgrößen für das Riffwachstum bis heute nicht quantifiziert sind, ist unklar, welches Szenario letztendlich greifen würde (GATTUSO et al. 1999, KLEYPAS et al. 1999).

Wechselwirkungen mit lokalen Faktoren

Ein wichtiger Aspekt bei der Evaluierung globaler Einwirkungen auf Korallenriffsysteme ist die Betrachtung lokaler Stressfaktoren, die maßgeblich die Resilienz und den Umgang des Riffes mit großskaligen Ereignissen wie z.B. der Korallenbleiche beeinflussen. Bekannt ist, dass eine übermäßige Ausbeutung von Ressourcen und verminderte Wasserqualität Korallenriffe anfälliger für Epidemien von Krankheiten oder Überwucherung durch Konkurrenten wie Algen machen. Daher gilt es als erwiesen, dass lokale Störgrößen wie

Überfischung oder Verschmutzung die Reaktionen eines Riffes und dessen Bewohner auf globalen Wandel signifikant mitbestimmen und deren Degradierung noch beschleunigen (PANDOLFI et al. 2005).

Kaltwasser- und Tiefseeriffe

Ein anderer Typ von Korallenriffen sind die Riffe, die in kalten, dunklen oder tiefen Arealen wachsen und daher den Augen der Wissenschaft bis vor wenigen Jahren weitgehend verborgen blieben. Korallen, die diese Riffe aufbauen, beherbergen keine Symbionten, benötigen daher kein Licht zum Gedeihen und können auch nicht bleichen. Man findet diese Riffe bevorzugt in Tiefen von 200 bis 1.000 m bei Wassertemperaturen von 3-14 °C, in Ausnahmefällen wachsen sie aber auch in flacherem Wasser oder bei wärmeren Temperaturen. Sie ernähren sich von tierischem Plankton und organischen Partikeln aus dem Meerwasser, dementsprechend sind sie in Gebieten verbreitet, die von nährstoffreichen Strömungen versorgt werden. Insbesondere sind sie als Brutgebiete für Fische von großer Bedeutung. Kaltwasserriffe gelten mit Hunderten von Tier- und Pflanzenarten (Korallen, Fischen, Weichtieren u.v.m.) in der artenarmen Tiefsee als Biodiversitäts-Hotspots (ROBERTS et al. 2006) und inzwischen kennt die Wissenschaft mehr Korallenarten, die tiefer als 50 m vorkommen als in den Flachwasserriffen der Tropen und Subtropen bekannt sind (CAIRNS 2007). Die Auswirkungen der Erwärmung und Versauerung der Meere auf Kalt- und Tiefwasserriffe sind noch weitgehend unbekannt, jedoch wird befürchtet, dass etwa zwei Drittel der bisher bekannten Kaltwasserriffe bis zum Ende des Jahrhunderts aus Gebieten mit ausreichender

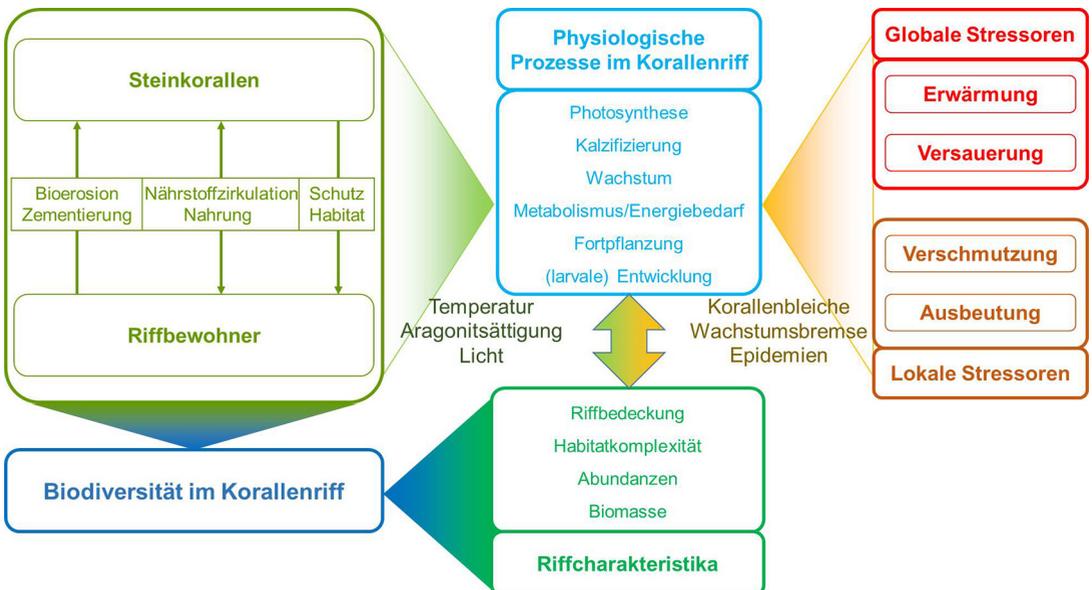


Abb. 4.7-3: Schematische Darstellung von Prozessen, die die Biodiversität im Korallenriff beeinflussen..

Aragonitsättigung in die Zone der Aragonituntersättigung geraten (GUINOTTE et al. 2006). Es scheint zudem logisch, dass wärmere Temperaturen den Metabolismus antreiben und dessen Erhalt so aufwendig wird, dass weniger Energie in Wachstum investiert werden kann. Gekoppelt mit Folgen schwindender Nahrungsquellen, zum Beispiel durch klimabedingte verringerte Planktonvorkommen oder einer temperaturbedingten schnelleren Zersetzung von organischem Material in der Tiefsee, besteht das akute Risiko eines großflächigen Verlusts der Kaltwasser- und Tiefseeriffe.

Zukunftsprognosen

Durch den Klimawandel bedingte Folgen für die Korallenriff-assoziierte Biodiversität sind nur schwer zu prognostizieren, da viele Faktoren meist in komplexem Zusammenspiel stehen und auf verschiedenen räumlichen wie zeitlichen Skalen eine Rolle spielen. Solche Wechselwirkungen finden zwischen Umweltfaktoren (wie Temperatur und CO₂-Gehalt, aber auch zwischen lokalen und globalen Stressoren) statt, wie auch zwischen Arten (sowohl zwischen Korallen und ihren Symbionten, als auch zwischen den Riffen und ihren Bewohnern) und letztlich zwischen der Umwelt und den darin ansässigen Biota.

Vor allem die Erwärmung und Versauerung der Ozeane ist in vollem Gange und wird selbst unter den optimistischsten aller Vorhersagen noch weiter voranschreiten. Aufgrund globaler und lokaler anthropogener Belastungen ist die Rifflbedeckung weltweit bereits um ein bis zwei Drittel zurückgegangen; man geht davon aus, dass drei Viertel aller noch vorhandenen Riffe ernsthaft bedroht sind (WILKINSON 2008). Das Korallenriff wie wir es kennen ist daher das Ökosystem, dessen Aussterben im Anthropozän als erstes prognostiziert wird (HOEGH-GULDBERG et al. 2007). Da die Aussichten sehr gering sind, den globalen Klimawandel und die damit einhergehende Erwärmung und Versauerung der Meere einzudämmen, wird die Reduzierung lokaler Stressfaktoren als effizientestes Mittel angesehen, die Widerstandsfähigkeit von Korallenriffen gegenüber dem Klimawandel zu stärken.

Korallenriffe zählen zu den ältesten Ökosystemen unseres Planeten und wurden bereits in vorherigen Epochen durch Eiszeiten oder Massensterben beeinträchtigt. Auch wenn eine nachhaltige, massive Veränderung heutiger Korallenriffe, ihrer Artenzusammensetzung und ihrer Funktionsweise nicht aufzuhalten ist, so ist es doch plausibel, dass sie auf geologisch lange Frist

in Form und Diversität stark verändert wiederkommen werden (KNOWLTON 2001), was allerdings ein geringer Trost für heutige und folgende Generationen der Art *Homo sapiens* sein dürfte.

Literatur

- BROWN, B. E. (1997): Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* 16: 129-138.
- CAIRNS, S. D. (2007): Deep-water corals: An overview with special reference to diversity and distribution of deep-water scleractinian corals. *Bulletin of Marine Science* 81: 311-322.
- FISHER, R., A. REBECCA, S. O'LEARY, K. LOW-CHOY et al. (2015): Species richness on coral reefs and the pursuit of convergent global estimates – *Current Biology* 25: 500-505.
- GATTUSO, J.-P., M. FRANKIGNOULLE & S. V. SMITH (1999): Measurement of community metabolism and significance in the coral reef CO₂ source-sink debate – *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96: 13017-13022.
- GUINOTTE, J. M., J. ORR, S. CAIRNS, A. FREIWALD et al. (2006): Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? – *Frontiers in Ecology and the Environment* 4: 141-146.
- HOEGH-GULDBERG, O. (1999): Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. – *Marine and Freshwater Research* 50: 839-866.
- HOEGH-GULDBERG, O., P. J. MUMBY, A. J. HOOTEN, R. S. STENECK et al. (2007): Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification – *Science* 318: 1737.
- KLEYPAS, J. A., J. W. MCMANUS & L. A. B. MEÑEZ (1999): Environmental limits to coral reef development: where do we draw the line? – *American Zoologist* 39: 146-159.
- KNOWLTON, N. (2001): The future of coral reefs. – *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98: 5419-5425.
- KROEKER, K. J., R. L. KORDAS, R. CRIM, I. E. HENDRIKS et al. (2013): Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology* 19: 1884-1896.
- LESSER, M. P. (1996): Elevated temperatures and ultraviolet radiation cause oxidative stress and inhibit photosynthesis in symbiotic dinoflagellates. *Limnology and Oceanography* 41: 271-283.
- PANDOLFI, J. M., J. B. C. JACKSON, N. BARON, R. H. BRADBURY et al. (2005): Are U.S. coral reefs on the slippery slope to slime? – *Science* 307: 1725-1726.
- ROBERTS, J. M., A. J. WHEELER & A. FREIWALD (2006): Reefs of the deep: The biology and geology of cold-water coral ecosystems. *Science* 312: 543-547.
- WILKINSON, C. (2008): Status of coral reefs of the world: 2008. – *Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia, ISSN 1447-6185: 296 pp.*

Weiterführende deutschsprachige Literatur:

- LEINFELDER, R. R., G. A. HEISS & U. MOLDRZYK (2008): »abgetaucht«, Begleitbuch zur gleichnamigen Sonderausstellung des Museums für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin. – Konradin Verlag: 224 S.
- SCHUHMACHER, H. (2010): Korallen: Baumeister am Meeresgrund. BLV Buchverlag, München. 159 S.

Kontakt:

- Dr. Cornelia Roder (cornelia.roder@awi.de)
 Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven
- Dr. Georg Heiss
 Freie Universität Berlin
 Geologische Wissenschaften

Roder, C. & G. Heiss (2016): *Korallenriffe - Auswirkungen von Erwärmung und Versauerung auf die Biodiversität*. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Rachor (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 254-259. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.41