

Korallenriffe im Klimawandel – Wie sich steigende Meerestemperaturen auf die Vitalität von Korallen auswirken

Einleitung:

Korallenriffe gehören zu den vielfältigsten und produktivsten marinen Lebensräumen. Sie bieten Nahrung und Küstenschutz für eine halbe Milliarde Menschen in den Tropen. Doch der wachsende Nutzungsdruck stellt auch eine zunehmende Bedrohung für diese „Regenwälder der Meere“ dar: Überfischung und Verschmutzung tragen zum Rückgang der Korallen in allen Riffprovinzen bei und befördern die Ausbreitung von Raumkonkurrenten, eingeschleppten Arten und Krankheiten. Zu den lokalen Faktoren gesellt sich der globale Klimawandel, der das Schicksal dieser einzigartigen marinen Schatzkammern zu besiegeln droht.

Wenn es um den Einfluss der globalen Erwärmung auf das marine Leben geht, denken wir an schmelzende Polkappen und das Schicksal der Eisbären. Dass die tropischen Flachmeere ebenso vom Temperaturanstieg bedroht sind, mag zunächst überraschen, da warm-angepasste Organismen mit einer Temperaturerhöhung doch besser zurechtkommen müssten als kalt-angepasste. Die meisten tropischen Korallen reagieren aber überraschend empfindlich auf ansteigende Meerestemperaturen. Sie leben in obligater Photosymbiose mit einzelligen Mikroalgen, die als „Zooxanthellen“ dicht gedrängt im Korallengewebe vorkommen und den Korallen über Photosynthese >90% des organischen Kohlenstoffs liefern. Umwelteinflüsse wie außergewöhnliche Hitze können die Photosymbiose beeinträchtigen und zu Schwankungen in den Bestandsdichten (Fagoonee, 1999) bis hin zum Verlust der Zooxanthellen führen (Brown, 1997). Ohne die goldbraunen Zooxanthellen-Pigmente scheint das kalkweiße Korallenskelett unter dem durchsichtigen Korallengewebe durch, und die Korallen bleichen (Foto 1). Die Auswirkungen einer Korallenbleiche sind gravierend, da mit dem Verlust der photosynthetischen Zooxanthellen die Energieversorgung der Koralle zusammenbricht. Bei guter Strömung, ausreichender Planktonnahrung und vorhandenen Energiereserven kann eine gebleichte Koralle zwar noch einige Zeit überleben (Grottoli et al., 2006). Je nach Intensität und Dauer des Hitzestresses kommt es aber letztlich zur Erschöpfung der Energiereserven und zum Absterben der Korallen.

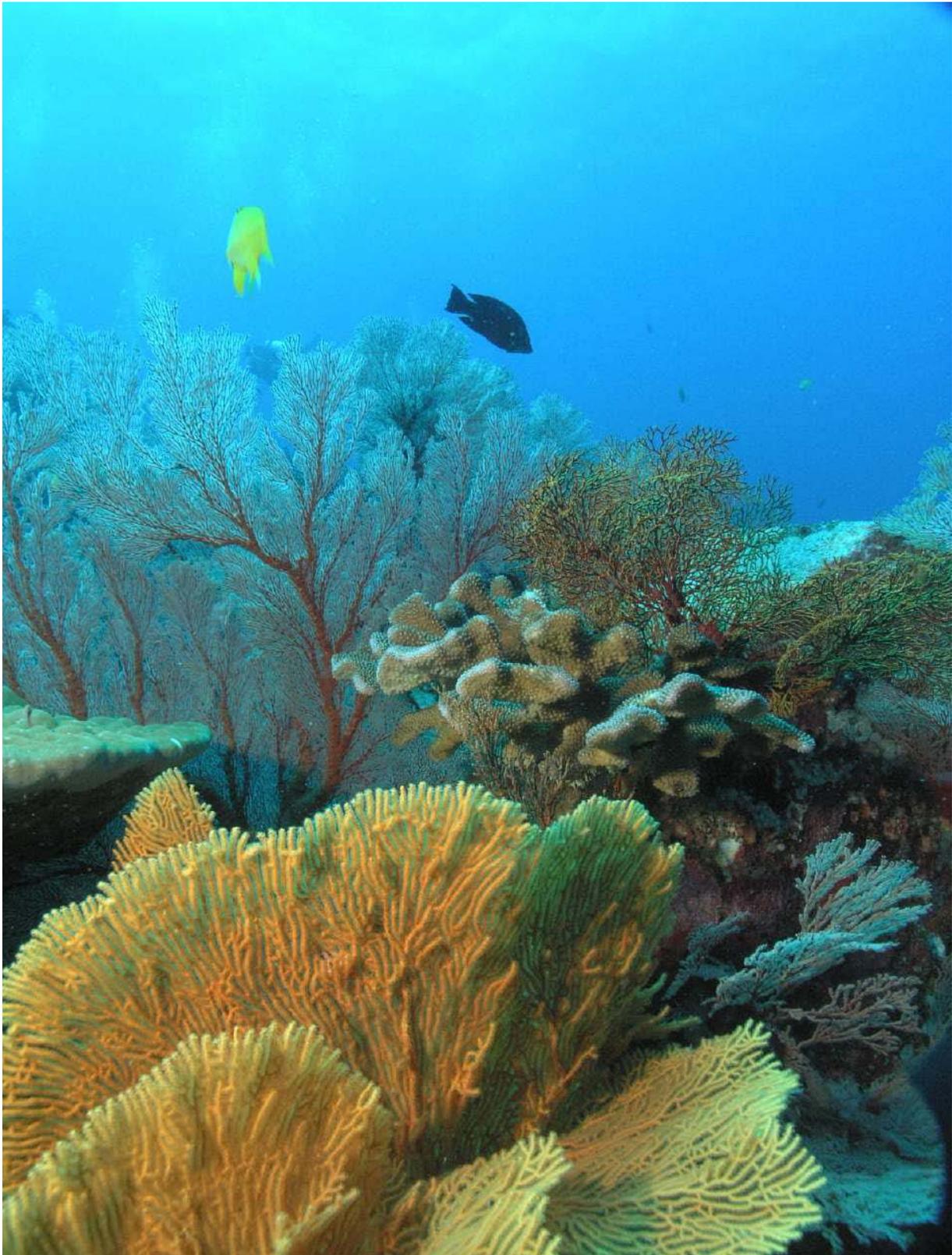


Foto 1: Intakte Korallenriffe gehören zu den vielfältigsten marinen Lebensräumen (Foto: N. Phongsuwan, Phuket Marine Biological Centre (PMBC))

Temperaturentwicklung und Korallenbleichen

Die ersten Korallenbleichen in der Mitte des letzten Jahrhunderts waren sporadische und lokal begrenzte Phänomene (Hoegh-Guldberg, 1999). Zur ersten Massenbleiche von Korallen kam es 1982/83 im Zuge eines ungewöhnlich starken *El Niño*, dem vor allem in den

Galapagos-Inseln und in der Karibik anhaltende Hitzewellen vorausgingen (Gardner et al., 2003; Glynn, 1988). Während sich die früheren *El Niño* Ereignisse mit kühlen *La Niña* Phasen abwechselten, befinden sich die Oberflächentemperaturen in den Tropen seit den 70er Jahren in einem steilen Aufwärtstrend (Abbildung, a). Die Temperaturunterschiede zwischen *El Niño* und *La Niña* verschwinden (Überlappen der roten und blauen Flächen in Abbildung, A) und die *La Niñas* heute sind wärmer als die *El Niños* der 80er Jahre. Es überrascht daher nicht, dass die Korallenbleichen an Umfang und Häufigkeit zugenommen haben (Abbildung, b). Tatsächlich vergeht kein Jahr, in dem nicht irgendwo auf der Welt eine Korallenbleiche auftritt. Besonders verheerende Korallenbleichen traten in den Jahren 1998, 2010 und 2016 auf. Die Zahl der Riffe, die von Bleichen verschont geblieben sind, ist praktisch auf Null zurückgegangen (Abbildung, c), und bei der zunehmenden Zahl von Korallenriffen, die von wiederkehrenden Bleichen betroffen sind, werden die Erholungsphasen immer kürzer (Hughes et al., 2018). Da Korallenriffe 5-10 Jahre benötigen, um sich von schweren Störungen zu erholen, scheint das Ende der Korallenriffe daher nur eine Frage der Zeit.

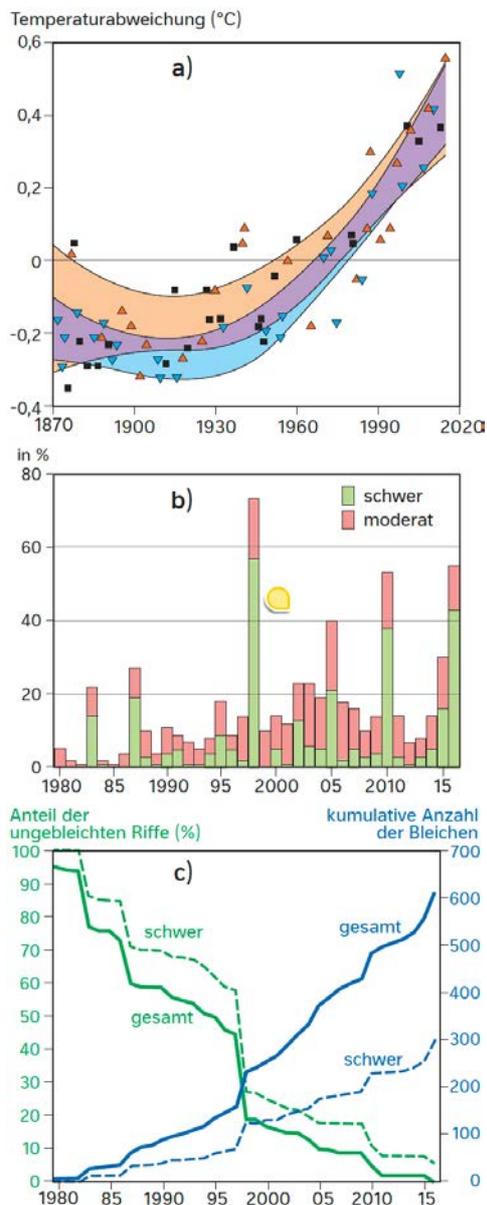


Abbildung (a) Entwicklung der mittleren Meeresoberflächentemperatur über alle Riffprovinzen von der industriellen Revolution bis heute. Angegeben sind die Abweichungen

relativ zum Zeitraum 1960-1990. Die roten und blauen Dreiecke symbolisieren *El Niño* und *La Niña* Ereignisse; die schwarzen Quadrate Niño/a neutrale Jahre. Die blaue und rote Flächen zeigen die 95% Konfidenz-Intervalle für die El Niño bzw. La Niña Jahre, die violette Fläche die Überlappung, die in den letzten Jahrzehnten überwiegt. (b) Entwicklung der Korallenbleichen von 1980 bis 2016. Grün sind die schweren (>30% Korallen betroffen), rot die moderaten (<30%) Bleicheereignisse. (c) Kumulative Zunahme der schweren und moderaten Korallenbleichen (grün) und Abnahme des Anteils der von Bleiche verschonten Korallenriffe (blau). Modifiziert nach (Hughes et al., 2018).

Hitzeresistenz und Anpassung

Auch wenn es angesichts wiederkehrender Korallenbleichen wenig Grund zur Entwarnung gibt, zeigt sich bei näherer Betrachtung ein differenzierteres Bild. So wissen wir heute, dass nicht alle Korallenarten gleich empfindlich auf Temperaturstress reagieren: manche bleichen eher und andere später oder gar nicht. Es gibt darüber hinaus auch innerartliche Unterschiede: manche Kolonien bleichen und andere nicht (Foto 2). Und selbst innerhalb einer Kolonie kann es vorkommen, dass Teilbereiche bleichen und andere nicht. Die Vielfalt biologischer Reaktionen führt dazu, dass der Anstieg der Temperatur in den tropischen Flachmeeren nicht nur quantitative sondern auch qualitative Veränderungen in den Korallengemeinschaften nach sich zieht, so dass sich hitzeresistentere Formen nach Bleichen durchsetzen, während hitzeempfindlichere Varianten verschwinden. Die Faktoren, die die Unterschiede in der Temperaturempfindlichkeit bedingen, sind noch nicht vollständig verstanden. Zunächst ging man davon aus, dass es sich bei den Zooxanthellen um nur eine Art handelt, *Symbiodinium microadriaticum*, die in allen Korallen vorkommt (Freudenthal, 1962). Mit dem Einzug molekulargenetischer Untersuchungsmethoden in die Korallenforschung wurde jedoch bald klar, dass sich hinter der morphologisch vermeintlich einheitlichen Fassade (Blank and Trench, 1985) genetisch sehr unterschiedliche Schwestergruppen verbergen (Rowan and Powers, 1991). Mittlerweile werden 15 verschiedene Gattungen von Zooxanthellen unterschieden mit über hundert Arten, die mit Korallen, Riesenmuscheln oder Kammerlingen assoziiert sind (LaJeunesse et al., 2018). Durch den Umstand, dass Korallen nicht nur mit einer sondern in vielen Fällen mit mehreren Zooxanthellenarten gleichzeitig vergesellschaftet sein können, ergibt sich aufgrund der großen Diversität der Korallen (fast 1000 Arten) eine Fülle potenzieller Wirts-Symbionten-Kombinationen. Diese scheinen unterschiedlich empfindlich auf Licht- und Temperatur-Stress zu reagieren (Rowan et al., 1997). So werden hitzetolerante von eher gemäßigten Zooxanthellen unterschieden, deren Verhältnis sowohl räumlichen als auch zeitlichen Schwankungen unterliegt. So wurde in heißen Meeresgebieten wie dem Persischen Golf ein größerer Anteil an hitzetoleranten Zooxanthellen gefunden als im benachbarten aber kühleren Golf von Oman. Auch nach Korallenbleichen scheinen hitzetolerante Symbionten vorzuherrschen. Nach einiger Zeit stellt sich dann aber oft wieder die Ausgangssituation ein, in der Zooxanthellen dominieren, die zwar weniger hitzeresistent sind, aber ein schnelleres Korallenwachstum befördern.



Foto 2: Massenbleiche von *Porites* Steinkorallen während der 2010 Hitzewelle in der Andamanensee, Thailand. Foto: Carin Jantzen (AWI/SCORE)

Ausblick

Die flexible Auswahl geeigneter Zooxanthellenarten an die jeweils vorherrschenden Umweltbedingungen sind eine Möglichkeit, mit der sich die sehr langlebigen Korallen an kurzfristige Umweltveränderungen anpassen können. Die Korallenbleiche selbst wird von einigen Forschern als Ventil angesehen, mit dem Korallen ungeeignete Zooxanthellen loswerden können, um Platz zu machen für geeignetere Symbionten (*adaptive bleaching*, (Buddemeier and Fautin, 1993). In der Tat konnte in einem Transplantationsexperiment gezeigt werden, dass Korallen mithilfe einer Bleiche die Zusammensetzung ihrer Symbionten an veränderte Umweltbedingungen anpassen konnten, während andere Korallen, die ohne Bleiche mit den gleichen Symbionten verharren mussten, abstarben (Baker, 2001). Selbst innerhalb ein und derselben Zooxanthellenart lassen sich lokale Anpassungen feststellen, die zu erhöhten thermischen Toleranzen in Korallen führen (Howells et al., 2012). Die große geographische Verbreitung der meisten Korallen führt dazu, dass manche Arten über ein riesiges Temperaturspektrum von 24°C im südlichen Barriereriff bis 34°C im Persischen Golf zu finden sind (Hughes et al., 2003). Saisonale und tageszeitliche Umweltfluktuationen scheinen hierbei die Korallen zusätzlich abzuhärten und Temperaturtoleranzen zu stärken (Loya, 1976; Wall et al., 2014), die von Elternkolonien offenbar an den Nachwuchs weitergegeben werden können (Putnam and Gates, 2015). Auch wenn die Mechanismen dieser sog. transgenerationalen Plastizität nicht im Einzelnen verstanden sind, ergibt sich im Zusammenspiel mit der Rekombination und Umverteilung des existierenden Korallen-Genpools ein großes Potenzial an genetischer Anpassung, ohne dass es zwingend des

Auftretens neuer zuträglicher Mutationen bedarf (Torda et al., 2017). Anpassung könnte daher bei Korallen sehr viel schneller verlaufen als deren sprichwörtliche Langlebigkeit vermuten lässt. Ob sie allerdings mit dem rasanten Klimawandel Schritt halten kann, lässt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abschließend sagen.



Foto 3: *Porites lutea* Steinkorallen während der 2010 Hitzewelle in der Andamanensee, Thailand. Die rechte Kolonie ist gebleicht, die linke Kolonie intakt. Foto: L. Putschim (AWI/PMBC)

Autor

Prof. Dr. Claudio Richter, geb. 1964

Sektionsleiter

crichter@awi.de

Schwerpunkte: Ökologie mariner Tiere, Korallenriffe, Antarktisches Benthos

awi – Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung,
Bremerhaven

Summary

Coral reefs in a changing climate - the effect of rising sea temperatures on the vitality of corals

Claudio Richter

Most tropical shallow-water corals live in obligate symbiosis with unicellular algae embodied in their tissues, so-called 'zooxanthellae', where the zooxanthellae provide photosynthetic energy and the coral host returns carbon dioxide and inorganic nutrients to the zooxanthellae. Rising sea-surface temperatures disrupt the photosymbiosis between corals and their zooxanthellae, leading to expulsion of zooxanthellae by the coral host and subsequent bleaching of the coral. Because zooxanthellae provide >90% of energy to the coral host, bleaching may compromise the health of the coral with extended bleaching often leading to coral mortality. Here, I unveil the causes of bleaching, report on the history of coral mass bleaching events and provide an outlook on the future of coral reefs in a warming ocean.

Literatur

- Baker, A.C. (2001) Corals bleach to survive change. *Nature* 411, 765–766.
- Blank, R.J., Trench, R.K. (1985) Speciation and symbiotic dinoflagellates. *Science* 229, 656-658.
- Brown, B.E. (1997) Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* 16, S129-S138.
- Buddemeier, R.W., Fautin, D.G. (1993) Coral Bleaching as an Adaptive Mechanism. *Bioscience* 43, 320-326.
- Fagoonee, I. (1999) The Dynamics of Zooxanthellae Populations: A Long-Term Study in the Field. *Science* 283, 843-845.
- Freudenthal, H.D. (1962).
- Gardner, T.A., Cote, I.M., Gill, J.A., Grant, A., Watkinson, A.R. (2003) Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science* 301, 958-960.
- Glynn, P.W. (1988) El Nino-Southern Oscillation 1982-1983: Nearshore Population, Community, and Ecosystem Responses. *Annual Review of Ecology and Systematics* 19, 309-346.
- Grottoli, A.G., Rodrigues, L.J., Palardy, J.E. (2006) Heterotrophic plasticity and resilience in bleached corals. *Nature* 440, 1186-1189.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999) Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research* 50, 839.
- Howells, E.J., Beltran, V.H., Larsen, N.W., Bay, L.K., Willis, B.L., van Oppen, M.J.H. (2012) Coral thermal tolerance shaped by local adaptation of photosymbionts. *Nature Climate Change* 2, 116-120.
- Hughes, T.P., Anderson, K.D., Connolly, S.R., Heron, S.F., Kerry, J.T., Lough, J.M., Baird, A.H., Baum, J.K., Berumen, M.L., Bridge, T.C., Claar, D.C., Eakin, C.M., Gilmour, J.P., Graham, N.A.J., Harrison, H., Hobbs, J.A., Hoey, A.S., Hoogenboom, M., Lowe, R.J., McCulloch, M.T., Pandolfi, J.M., Pratchett, M., Schoepf, V., Torda, G., Wilson, S.K. (2018) Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science* 359, 80-83.
- Hughes, T.P., Baird, A.H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S.R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J.B., Kleypas, J., Lough, J.M., Marshall, P., Nystrom, M., Palumbi, S.R., Pandolfi, J.M., Rosen, B., Roughgarden, J. (2003) Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science* 301, 929-933.
- LaJeunesse, T.C., Parkinson, J.E., Gabrielson, P.W., Jeong, H.J., Reimer, J.D., Voolstra, C.R., Santos, S.R. (2018) Systematic Revision of Symbiodiniaceae Highlights the Antiquity and Diversity of Coral Endosymbionts. *Curr Biol* 28, 2570-2580 e2576.
- Loya, Y. (1976) The Red Sea coral *Stylophora pistillata* is an r strategist. *Nature* 259, 478-480.

Putnam, H.M., Gates, R.D. (2015) Preconditioning in the reef-building coral *Pocillopora damicornis* and the potential for trans-generational acclimatization in coral larvae under future climate change conditions. *J Exp Biol* 218, 2365-2372.

Rowan, R., Knowlton, N., Baker, A., Jara, J. (1997) Landscape ecology of algal symbionts creates variation in episodes of coral bleaching. *Nature* 388, 265-269.

Rowan, R., Powers, D.A. (1991) A molecular genetic classification of zooxanthellae and the evolution of animal-algal symbioses. *Science* 251, 1348-1351.

Torda, G., Donelson, J.M., Aranda, M., Barshis, D.J., Bay, L., Berumen, M.L., Bourne, D.G., Cantin, N., Foret, S., Matz, M., Miller, D.J., Moya, A., Putnam, H.M., Ravasi, T., van Oppen, M.J.H., Thurber, R.V., Vidal-Dupiol, J., Voolstra, C.R., Watson, S.-A., Whitelaw, E., Willis, B.L., Munday, P.L. (2017) Rapid adaptive responses to climate change in corals. *Nature Climate Change* 7, 627-636.

Wall, M., Putschin, L., Schmidt, G.M., Jantzen, C., Khokiattiwong, S., Richter, C. (2014) Large-amplitude internal waves benefit corals during thermal stress. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282.