

Philipps-Universität-Marburg
Masterstudiengang Physische Geographie
Seminar „Geographische Informationssysteme“

Exposé zur Projektarbeit

Monitoring von Korallenriffen basierend auf Sentinel Daten

vorgelegt von
Joachim Werner Münch
aus Lohra (Hessen)

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Untersuchungsgebiet	5
Methodik	7
Daten	11
Ergebnisse	12
Schlussfolgerung und Diskussion	31
Literatur	32

Einleitung

Korallenriffe gelten als Hot Spots mit extrem hoher Biodiversität und als Reservate für unzählige seltene Arten und Lebensgemeinschaften. Vor diesem Hintergrund sind sie besonders sensibel für Klima- und Umweltveränderungen. Trotz umfangreicher nationaler und internationaler Schutzmaßnahmen ist gerade bei den größten und mächtigsten Riffen wie dem Great Barrier Reef vor der Nordostküste Australiens ein Rückgang festgestellt worden, dessen Ursachen aber noch nicht bis in alle Einzelheiten erfasst werden konnten. Ein Teil davon ist aber sicherlich auf Korallenbleiche zurückzuführen, die in den letzten Jahrzehnten immer mehr zugenommen hat (Anthony 2016, Dubinsky und Stambler 1996, Eddy et al. 2021, Hoegh-Guldberg et al. 2007), so dass eine Regeneration in immer mehr Fällen nicht möglich war und ist.

Bereits seit den 1970er Jahren versucht man die Riffe auch mit Fernerkundungsdaten zu erfassen, um Veränderung in Riffgröße und Zusammensetzungen zu fixieren und mit allgemeinen Umweltdaten in Zusammenhang zu bringen. Im Jahre 1979 wurde erstmals in Australien eine Empfangsstation für LANDSAT eingerichtet, von der aus Aufnahmen des Great Barrier Reefs genommen und diese mit Orthofotos verglichen wurden (Hopley et al. 2007, 139). Vor allem für groß angelegte Korallenstudien werden Spektralbilder ausgehend von Satelliten eingesetzt. (Bajjouk et al. 2019, Bertels et. al. 2008) Dabei versucht man über Riff- und Wasseroberflächentemperatur die Bleichereignisse einzuordnen und das Risiko von Bleichereignissen einzuschätzen. (Weeks et al. 2013)

In den letzten Jahren konnte man dafür verstärkt auf hochauflösende, in regelmäßigen Zeitabständen vorhandene Sentinel Daten zurückgreifen. Da das räumliche und zeitliche Netz verfügbarer Klimadaten immer enger geworden ist, bieten sich auf künstlicher Intelligenz basierende Methoden zur Feststellung von Korrelationen von Riffwachstum bzw. Zerstörung durch massive Zunahme an Korallenbleiche an, die eine Regeneration in der Folgezeit unmöglich werden lässt. Die Korallenbleiche entsteht, wenn länger anhaltend hohe Temperaturen die Algen, die sich im Korallengewebe befinden und die Koralle in symbiotischer Beziehung mit wichtigen Mikronährstoffen versorgen, zum Verlassen ihres Lebensraums drängen. (Lesser 2011)

Die Algen übernehmen zahlreiche lebenswichtige Funktionen für die Koralle ein, von der Stabilisierung des Riffgerüsts über die Produktion tropischer Sande und die Nährstoffspeicherung bis hin zur Regelung der Trophie (Fong und Paul 2011). Bei längerem Fehlen dieser Nährstoffquelle stirbt anschließend auch die Koralle selbst ab. Das Verlassen der Algen geschieht vor allem, wenn die Meeresoberflächentemperatur den Toleranzbereich der Korallenkolonie für einen längeren Zeitraum von mehreren Tagen oder sogar Wochen übersteigt. Diese Situation kann schon eintreffen, wenn die Sommertemperaturen nur um 1-2°C über dem bisherigen Durchschnittswert liegen (Liu und Strong 2003).

Diskutiert wird dabei vor allem, inwieweit durch den Klimawandel hervorgerufene, langanhaltende sommerliche Hitzeperioden mit geringem Stoffaustausch, sowohl in der Luft als auch im Wasser, diese Korallenbleiche qualitativ und quantitativ so stark begünstigen, dass eine Regeneration in der Zwischenzeit nicht mehr möglich ist. Um hierfür brauchbare Vorhersagen

treffen zu können, die nicht nur für einzelne Korallen, sondern für große Riffgebiete wie das in der Nordsüdausdehnung über 2300 km mächtige Great Barrier Reef oder gar im globalen Maßstab gültig sind, braucht es durchgängig verfügbare Aufnahmedaten, die zugleich eine Auflösung besitzen, die sich für die großflächige Markierung von Korallenbleiche und ihre berechnete und modellhaft vorhergesagte Zu- bzw. Abnahme eignet.

In der Vergangenheit sind Korallenriffe im Wesentlichen mittels Orthofotos von Flugzeugen und Meerestauchern untersucht worden. Um die Jahrtausendwende kamen LIDAR - Daten und Aufnahmen von LANDSAT hinzu, die jedoch immer nur in mehrjährigen Zeitabständen verfügbar sind. Mittels Sentinel Satelliten verfügt das Satellitenprogramm der europäischen Raumfahrtbehörde ESA seit vergangenem Jahrzehnt über regelmäßige Aufnahmen vom gesamten Globus, wobei vor allem Sentinel 2 A (seit 2015) und 2 B (seit 2017) Bilder relativ kleiner Erdabschnitte in hoher Auflösung garantieren, mit denen es prinzipiell möglich erscheint, gebleichte Korallenabschnitte von gesunden Korallenabschnitten zu unterscheiden. So ist es im Februar 2017 beispielsweise zu einer großflächigen Bleiche der Riffe vor der australischen Küste gekommen, die mit Sentinel 2a Daten umfangreich dokumentiert werden konnte (Hedley et al. 2018).

Wenn diese wahrgenommenen Veränderungen sich anhand weniger markierter Befunde in ihrem Gesamtausmaß sowohl räumlich als auch zeitlich errechnen und modellhaft vorhersagen ließen, hätte man ein geeignetes Werkzeug, um ein kostengünstiges Korallen-Monitoring durchzuführen und in Abhängigkeit von Umwelt- und Klimaparametern überzeugende Vorhersagen zu treffen.

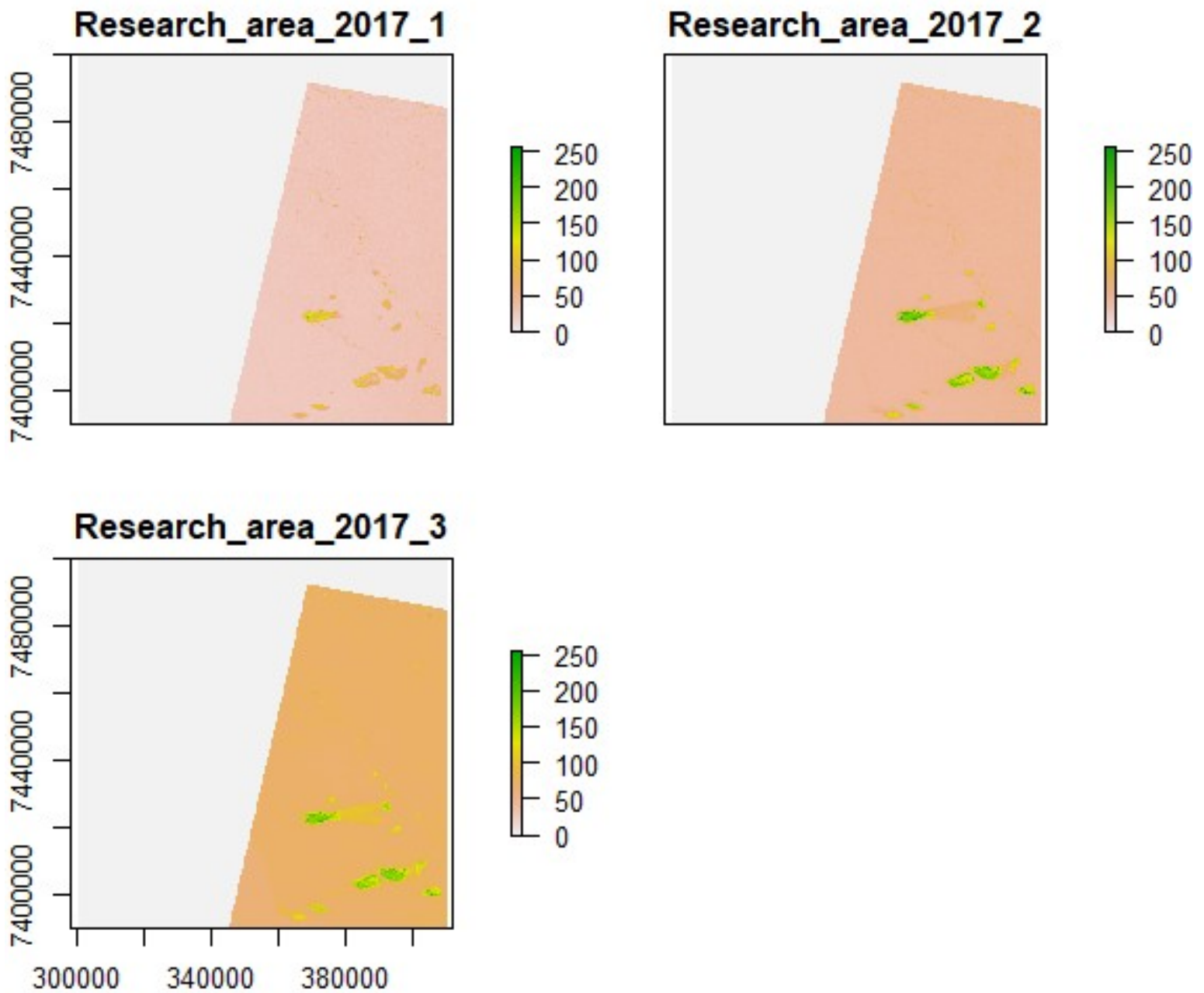
- Lässt sich aus einer begrenzten Zahl an markierten Bleichabschnitten das Gesamtausmaß eines regionalen Bleichereignisses einigermaßen exakt erfassen?
- Lässt sich die zeitliche Dauer und Intensität der Bleichen so weit vorhersagen, dass bei Kenntnis der regionalen Umweltbedingungen der Anteil an Regeneration bzw. totaler Zerstörung in Abhängigkeit von der Zeit ebenfalls vorhergesagt werden kann?
- Eignen sich Sentinel-2 Aufnahmen als Grundlage für ein langfristig und großräumig angelegtes Riffmonitoring?

Da bereits in den ersten Jahren der Sentinel-2 Datenverfügbarkeit Bleichereignisse an einzelnen Korallen ziemlich exakt in räumlicher und zeitlicher Ausdehnung erfasst wurden, besteht die Zuversicht, dies modellhaft auch für größere Riffabschnitte so exakt errechnen und vorhersagen zu können, um sich die Untersuchung von Einzelkorallen über Orthofotos, LIDAR-Aufnahmen oder gar Taucherproben mit Laboranalysen zu ersparen. Die fehlende exakte Kenntnis der Regenerationsfähigkeit unterschiedlicher Korallenarten dürften derartige Untersuchungen mittelfristig jedoch noch nicht vollständig ersetzen können.

Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet ist ein Ausschnitt aus dem südlichen Abschnitt des Great Barrier Reef nördlich der K'gari Insel und westlich der Küstenstädte Gladstone und Mackay im Süden des australischen Bundesstaats Queensland ausgewählt worden. Von diesem Riffabschnitt waren Sentinel-2 Aufnahmen verschiedener Aufnahmejahre seit dem Start von Sentinel-2 zeitnah online verfügbar und konnten demzufolge im Hinblick auf gebleichte Korallenabschnitte miteinander verglichen werden. Abbildung 1 zeigt den gesamten analysierten Abschnitt auf drei Echtfarbenbildern vom 27. Oktober 2017. Nach dem European Petroleum Survey Group Geodesy (EPSG) befindet sich das Gebiet im Bereich 32756 im World Geodetic System 1984 (WSG 84) in der UTM Zone 56S. Dabei liegen die Rechtswerte zwischen 30000 und 40000 und die Hochwerte zwischen 7350000 und 7500000. Umgerechnet ergibt sich damit ein Koordinatenbereich zwischen 20,4° und 23,2° südliche Breite sowie 152,1° und 153,8° östliche Länge.

Abbildung 1: Echtfarbaufnahmen des Untersuchungsgebiets vom 27. Oktober 2017
mit Rechts- und Hochwerten nach EPSG 32756 in WSG 84/UTM Zone 56S

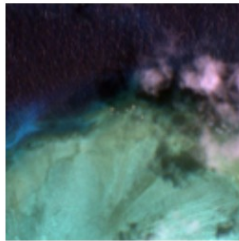


Methodik

Zuerst wurden die Sentinel 2 Aufnahmen mit QGIS von jp2- in ein tif- Format umgewandelt. Außerdem wurde eine shape Datei mit Trainingsdaten erstellt, die bestehend aus ausgewählten Polygonen, gespeichert als verschiedene Klassen, markiert wurden. Dabei wurden die Polygone vier verschiedenen Klassen zugeordnet, Koralle (bestehend aus nicht erkennbar gebleichten Korallenabschnitten), gebleichte Koralle, Meerwasser und Wolken. Aus dem gleichen Riffabschnitt, in dem im südlich Teil sich die Trainingsdaten und im nörlichen Teil die Testdaten befinden, wurde mit dem R Paket „raster“ ein Rasterdatensatz erstellt und aus diesen Vektordaten Masken gebildet. Dabei wurde eine Teilmenge der Gesamtaufnahme herausgegriffen und hiervon ein Rasterbild sowie gleichzeitig eine gerasterte Maske erzeugt. Abbildungen 2 bis 5 (a und b) lassen erkennen, dass die Masken jeweils einen Grundriss dieses Bildes darstellen. Wenngleich man durchaus Unterschiede zum Originalbild feststellt, lässt sich hiermit erahnen, welche Bereiche den einzelnen Klassen zugeordnet werden können.

Abbildung 2: Gerasterte Teilmenge einer Aufnahme von 2018 nach Trainingsdaten des gleichen Abschnitts von 2022

a) gerastertes Sentinelfoto

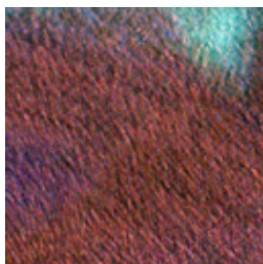


b) Maske



Abbildung 3: Gerasterte Teilmenge einer Aufnahme von 2017 nach Trainingsdaten des gleichen Abschnitts von 2022

a) gerastertes Sentinelfoto

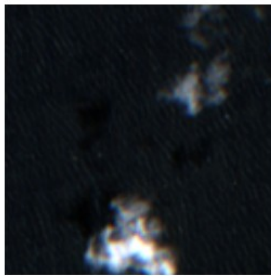


b) Maske



Abbildung 4: Gerasterte Teilmenge einer Aufnahme von Ende März 2022 nach Trainingsdaten des gleichen Abschnitts vom Winter des gleichen Jahres

a) gerastertes Sentinelfoto

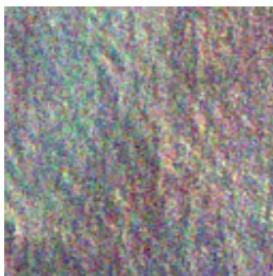


b) Maske



Abbildung 5: Gerasterte Teilmenge einer Aufnahme von 2022 nach Trainingsdaten des gleichen Abschnitts aus der gleichen Aufnahme

a) gerastertes Sentinelfoto



b) Maske



Mit Hilfe neuronaler Netze (U-Net) galt es nun, ein Modell zu trainieren, um gesunde und gebleichte Korallen, zur Gegenüberstellung aber auch reines Meerwasser und Wolkenbedeckung, in einem größeren Testgebiet bzw. in Aufnahmen eines divergenten Zeitpunktes vorherzusagen. Dabei wird das Gesamtbild geclustert und die einzelnen Segmente werden klassifiziert. Faltungsneuronale Netze (Convolutional Neural Network, kurz CNN) stellen die häufigsten neuronalen Netzwerke für die visuelle Analyse im Deep Learning dar (Valueva et al. 2020) und sollten auch bei der Vorhersage von Korallenbleiche Anwendung finden. Diese Testdaten dienen der Vergewisserung, dass das Modell nicht nur die Korallen, sondern auch ihre gebleichten Stellen möglichst exakt in ihrer räumlichen Ausdehnung vorhersagen kann. Anschließend wurde anhand der Testdaten getestet, in wie weit das Modell in der Lage ist, Veränderungen in der Korallenausdehnung eines gegebenen Riffausschnittes zwischen den Aufnahmen aus mindestens zwei unterschiedlichen Zeitpunkten festzustellen und aus den wahrgenommenen Veränderungen, Tendenzen abzulesen, die auch Vorhersagen in die nähere Zukunft ermöglichen.

Um die Bleiche in ihrer quantitativen Dimension aufzuzeigen und zugleich die Lokalitäten zu fixieren, wurde mit QGIS eine Change Detection durchgeführt. Hierzu wurde auf das Semi Classification Plugin (kurz: SCP)(Congedo 2021) zurückgegriffen, indem Aufnahmen des gleichen Gebietes unterschiedlicher Zeitpunkte gegenübergestellt wurden. Aufbauend auf jeweils 10 Polygonen sicher erkannter gebleichter und ungebleichter Korallen wurden Supervised Classifications durchgeführt, wobei der Unterscheidbarkeit halber reines Meerwasser und Wolkenbedeckung erneut als zwei weitere Klassen mit zugehörigen Polygonen gesetzt wurden. Die beiden klassifizierten Aufnahmen wurden anschließend miteinander in Form einer Land-Cover-Change gegenübergestellt. Anhand der Pixelanzahl sollte zum einen das relative Ausmaß der Bleiche in dem Untersuchungsabschnitt im entsprechenden Zeitintervall vorhergesagt und zum andern nach Pixelmenge und dementsprechend Fläche quantifiziert werden.

Wichtig für ein aussagekräftiges Ergebnis erweist sich, exakt die gleichen Klassen mit möglichst der gleichen Anzahl an Polygonen zu verwenden. Um ein weitgehend sicheres Ergebnis zu erhalten, sollten die Aufnahmen von allen, in Sentinel- 2 eingesetzten Bändern (1-12 und 8a) außer dem Echtfarbbild (True Colour Image) einbezogen werden. Da bei neueren Aufnahmen aus den Jahren 2022 und 2023 die Aufnahmen in 10 Metern, 20 Metern und 60 Metern Auflösung vielfach in getrennten Ordnern existieren, bietet sich hier die Change Detection für jede der drei Auflösungsstärken einzeln an. Doch auch hierbei ist es wesentlich, für beide miteinander zu vergleichenden Zeitpunkte die gleichen Bänder zu verwenden. Zudem sollten möglichst Aufnahmen verwendet werden, auf denen unmittelbar über den Korallen Wolkenfreiheit herrscht, so dass die Korallen in ihrer vollständigen Ausdehnung in den Aufnahmen zu erkennen sind. Weiterhin empfiehlt es sich, die über Teilen der Meeresumgebung vorhandenen Wolken, die gewöhnlich ebenfalls deutlich heller erscheinen als das Meerwasser, als eigene Klasse einzugeben, um Missinterpretationen zu den gebleichten Korallenabschnitten zu vermeiden.

Um die Ergebnisse im Hinblick auf die Regenerationsfähigkeit der gebleichten Korallen angemessen zu interpretieren, wurde eine Change Detection sowohl für ein relativ kurzes Zeitintervall aus zwei verschiedenen Jahreszeiten innerhalb desselben Jahres als auch für etwas längere Intervalle (mehrere Jahre) durchgeführt. Ein überdurchschnittlich heißer Sommer, der

großflächige Bleiche verursacht, muss schließlich nicht zwangsläufig eine nachhaltige Störung eingehend mit Absterben der betroffenen Korallen bedeuten. Die Widerstandsfähigkeit dürfte vielmehr von der Häufigkeit dieser Bleichereignisse einerseits und der Wiederbesiedlungsgeschwindigkeit der bei der Bleiche verschwundenen, in Symbiose mit den Korallen lebenden Algen andererseits abhängen.

Um zu testen, ob und wie stark einem Bleichereignis Regeneration gefolgt ist, empfiehlt es sich, vor allem Spätsommernaufnahmen und Spätherbst- bzw. Winternaufnahmen (auf der Südhemisphäre von Ende März oder Anfang April sowie von Juni oder Juli) miteinander zu vergleichen, was hier nur für das Jahr 2022 durchgeführt wurde, von dem ausreichend Daten zeitnah zu bekommen waren. Ältere Aufnahmen existieren zwar auch, waren aber nicht in so großer Zahl zeitnah online verfügbar. Zudem waren für 2022 sowohl Spätsommer- als auch Winternaufnahmen in allen drei Auflösungsstärken (10 Meter, 20 Meter und 60 Meter) in den jeweils gleichen Kanälen verfügbar, womit sich auch eine Gegenüberstellung aller drei Auflösungsstärken durchführen ließ. Die Change detection für ein größeres Intervall von mehreren Jahren sollte dazu dienen, das längerfristige Verhältnis zwischen neuer Bleiche und Regeneration zu analysieren.

Die Change Detection wurde auf folgende Weise durchgeführt. Zuerst wurden von der älteren Aufnahme alle verfügbaren Kanäle ausgewählt und davon ein virtueller Rasterlayer erstellt. Daraufhin wurden für jede Klasse je 10 Polygone markiert, mit denen eine Supervized Classification durchgeführt wurde, welche anschließend im gleichen Ordner abgespeichert wurde. Das gleiche Verfahren wurde daraufhin mit der jüngeren Aufnahme wiederholt. Abschließend galt es, die beiden erstellten Tif-Dateien in einer sogenannten Land-Cover-Change gegenüberzustellen, wobei die ältere Aufnahme den Referenz-Layer und die jüngere den neuen Layer darstellt. Das Programm rechnete nun für beide Aufnahmen die Anzahl der Pixel aus, die der Vorhersage nach jeder Klasse zugeordnet werden und erhält so die Pixelanzahl, die in einer Klasse geblieben oder in eine andere Klasse gewechselt sind. In Kenntnis des Georeferenzsystems wurde hierfür zugleich die jeweilige zugehörige Fläche in m² angegeben.

Die Zuordnung zu einer Klasse kann übrigens nach drei verschiedenen Methoden vorgenommen werden, der Minimumdistanz, der maximalen Ähnlichkeit und der Spektralwinkelkartierung. Da die Bleichung im Wesentlichen an den Außenrändern der Korallen stattfindet und im Verhältnis zu den anderen drei Klassen einen relativ kleinen Bereich abdeckt, waren die Polygone für die gebleichten Korallen in den meisten Fällen so klein, dass die maximale Ähnlichkeit hiermit nicht erfolversprechend durchgeführt werden konnte. Auch mittels Spektralwinkelkartierung ließ sich für die vier ausgewählten Klassen keine handhabbare Klassifikation durchführen. Deswegen musste sich diese Untersuchung auf die Minimumdistanz als Unterscheidungsmaß beschränken, was aber nicht bedeutet, dass bei anderen Aufnahmen nicht auch die anderen Klassifikationsmethoden Anwendung finden können. Neben der Pixelanzahl und der Fläche, die in dem gewählten Zeitabschnitt in eine andere Klasse gewechselt oder in der gleichen Klasse geblieben ist, und in einer vom Programm erstellten CSV-Datei angezeigt wird, lässt sich die Änderung anschließend durch Einfärbung der neu erstellten Tif-Datei auch kartographisch markieren.

Problematisch für die Aussagekraft einer Change Detection basierend ausschließlich auf Sentinel-2 Aufnahmen könnte sich allerdings die Tatsache erweisen, dass diese erst seit wenigen Jahren vorhanden sind. Man kann daher auch nur relativ kurze Zeitabschnitte miteinander vergleichen, die nicht unbedingt im Hinblick auf langfristige Vorhersagen, die den Klimawandel angemessen mit einbeziehen, aussagekräftig sind. Für ein längerfristiges, im Hinblick auf Zukunftsprognosen taugliches Korallenmonitoring, das mit Umwelt- und Klimaveränderungen globaler und regionaler Ausmaße in einem gemischten Modell in Zusammenhang gebracht werden kann, wären zusätzlich Daten aus älteren Zeiträumen zum Abgleich hilfreich, die - wenn überhaupt - nur von Landsat oder LIDAR mit großen Zwischenintervallen vorhanden sind. Die Aufnahmen verschiedener Satelliten lassen sich in einer SCP Land-Cover-Change allerdings nicht miteinander vergleichen, da jeweils andere Bänder in anderen Wellenlängenbereichen eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund sollten auch gemischte Modelle auf Sentinelbasis, die z.B. Klimavorhersagen einbeziehen, noch auf ihre Aussagekraft auf längere Zeitreihen hinterfragt werden.

Außerdem werden den Korallen Anpassungsfähigkeiten an Klimaveränderungen nachgesagt, die aber in wenigen Jahren mit Extremereignissen noch nicht zum Tragen kommen dürften. Ein großes festgestelltes Bleichereignis in einem extrem heißen Sommer muss infolgedessen noch keineswegs bedeuten, dass zunehmende Häufigkeit dieser Extremhitzeperioden in gleichem Maße Zunahme der Bleiche und damit einhergehend eine nicht wiederherstellbare Zerstörung der Korallenriffe mit sich bringen. Vor diesem Hintergrund konnte nur getestet werden, in wie weit die Veränderungen durch die Bleichereignisse sich anhand von Sentinel-2 Aufnahmen insgesamt vorhersagen lassen, bzw. zu welchem Zeitpunkt die Zerstörung oder Schädigung durch Bleiche die größte Wirkung entfaltet.

Daten

Für die Trainings- und Testdaten wurden Spektralbilder des europäischen Satelliten Sentinel-2 (A oder B) aus den Jahren 2017, 2018 und 2022 über den Copernicus Open Access Hub angefordert. Dabei handelte es sich um atmosphärisch korrigierte Oberflächenreflexionsbilder, die von zugehörigen Level-1C-Produkten abgeleitet worden sind. Diese Level-2-Produkte bestehen aus 110x110 km² in kartographischer Geometrie (EPSG 32756, UTM25S-WGS84-Projektion).

In der einen Change Detection wurden zwei Frühlingsaufnahmen, nämlich von Oktober 2017 und November 2018, miteinander abgeglichen. Die zweite Change Detection beinhaltet einen Vergleich von Daten aus dem Frühling (Oktober) 2017 mit Winterdaten aus dem Juli 2022. Testhalber sind auch die Aufnahmen von November 2018 noch einmal mit jenen von Juli 2022 abgeglichen worden. In der vierten Change Detection sind beides Aufnahmen des Jahres 2022 gegenübergestellt worden. Sie stammten von Ende März und Mitte Juni und somit aus dem Spätsommer und Spätherbst des entsprechenden Jahres. Da diese beiden Aufnahmen nach unterschiedlicher Auflösung getrennte Bilder enthalten, sind alle drei Auflösungsstärken, 10 Meter, 20 Meter und 60 Meter, miteinander verglichen worden.

Ergebnisse

Aufbauend auf den in QGIS erstellten Polygonen konnten mit dem Raster Paket in R Masken erstellt werden, die sich mittels neuronaler Netzwerke trainieren ließen, welche für den gesamten Riffabschnitt Vorhersagen erlaubten. Hierbei ließ sich nicht nur vorhersagen, an welchen Stellen sich die Korallen befinden, sondern großteils auch, an welchen Stellen Bleiche an ihnen stattgefunden hatte. (siehe Abbildungen 14 und 15) Somit konnte mosaikartig ein einigermaßen genau vorhergesagtes Bild für den gesamten untersuchten Riffausschnitt für die Situation in 2017, 2018 und 2022 erstellt werden, worin Lage und Vitalität der Korallen zu den verschiedenen Zeitpunkten einigermaßen zum Ausdruck kommt. (Abbildungen 10 bis 13) Die errechnete Genauigkeit der Trainingsdaten zeigt sich auch als sehr hoch an (siehe Abbildungen 6 bis 9), doch ist auf den als Mosaik zusammengesetzten Vorhersagebildern die Bleiche in ihrer absoluten wie relativen Ausdehnung zur Korallendichte nur schwer quantitativ abzuschätzen.

Abbildung 6: Aufzeichnung des 10 Epochen dauernden Trainingsprozesses für Ende März 2022 mit Trainingsdaten vom Winter des selben Jahres

Werteverlust und Genauigkeit pro Epoche

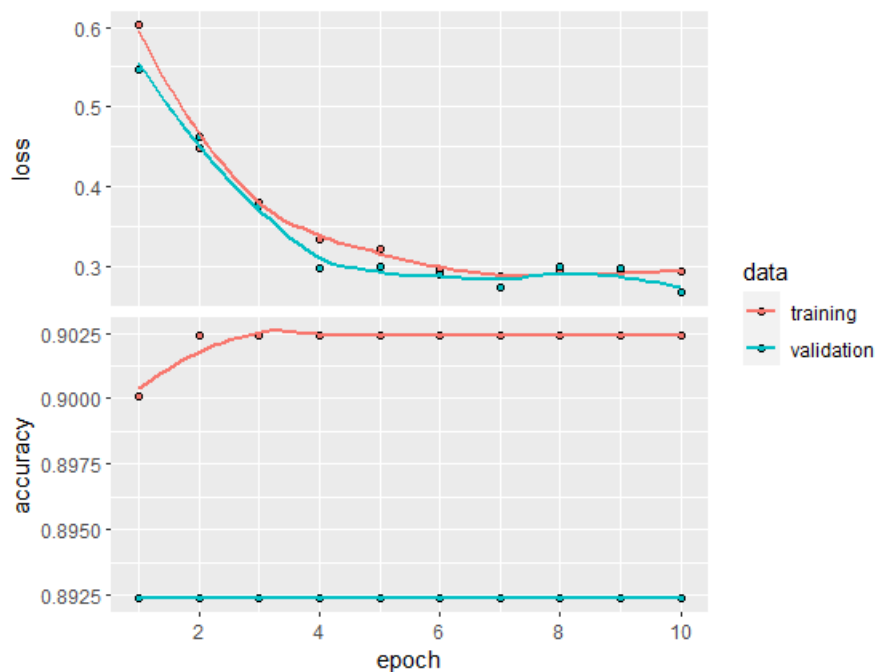


Abbildung 7: Aufzeichnung des 10 Epochen dauernden Trainingsprozesses für Juni 2022 mit Trainingsdaten der selben Aufnahme

Werteverlust und Genauigkeit pro Epoche

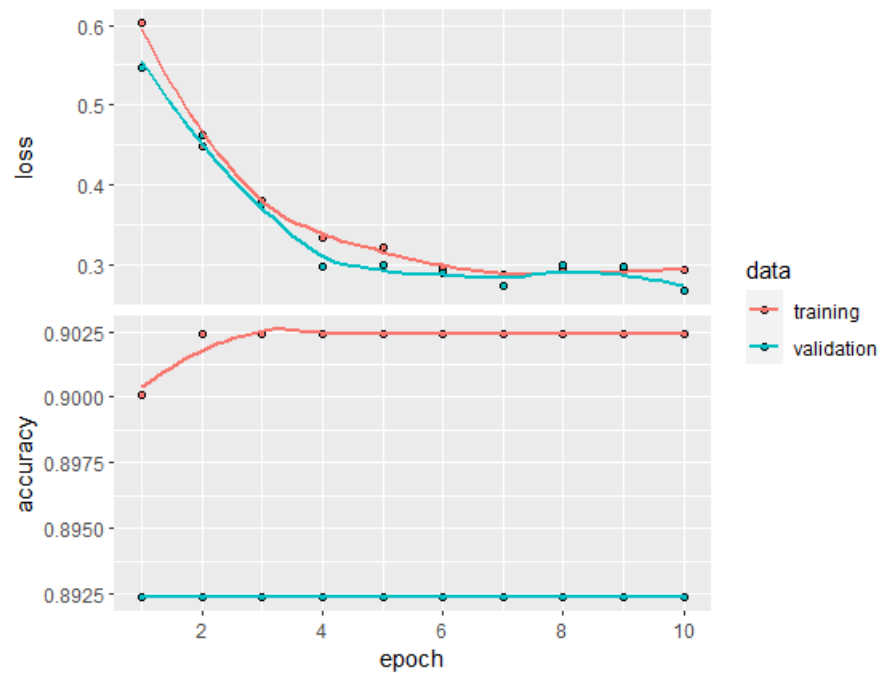


Abbildung 8: Aufzeichnung des 10 Epochen dauernden Trainingsprozesses für 2017 mit Trainingsdaten von 2022

Werteverlust und Genauigkeit pro Epoche

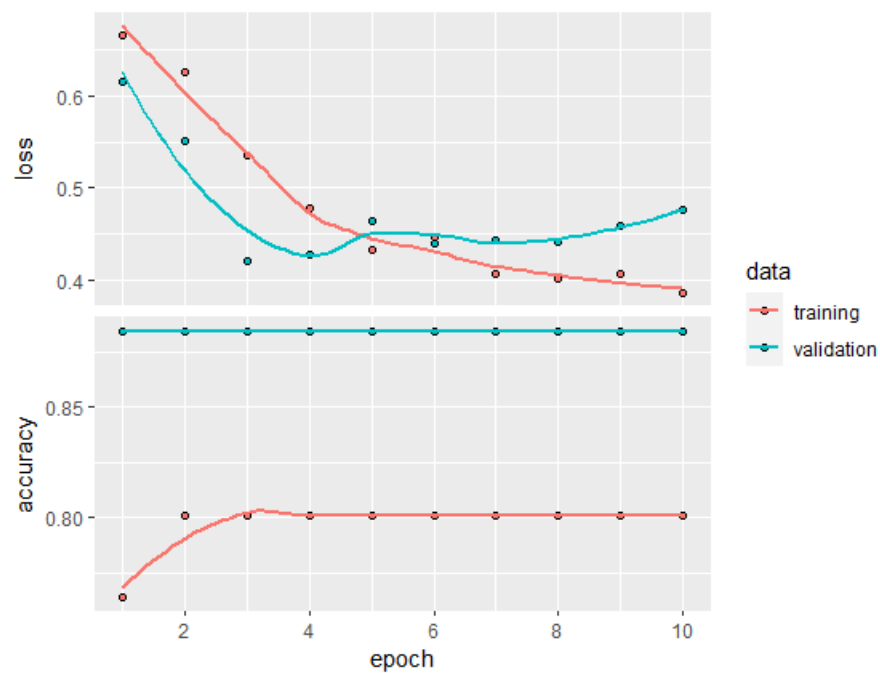


Abbildung 9: Aufzeichnung des 10 Epochen dauernden Trainingsprozesses für 2017 mit Trainingsdaten von 2022

Werteverlust und Genauigkeit pro Epoche

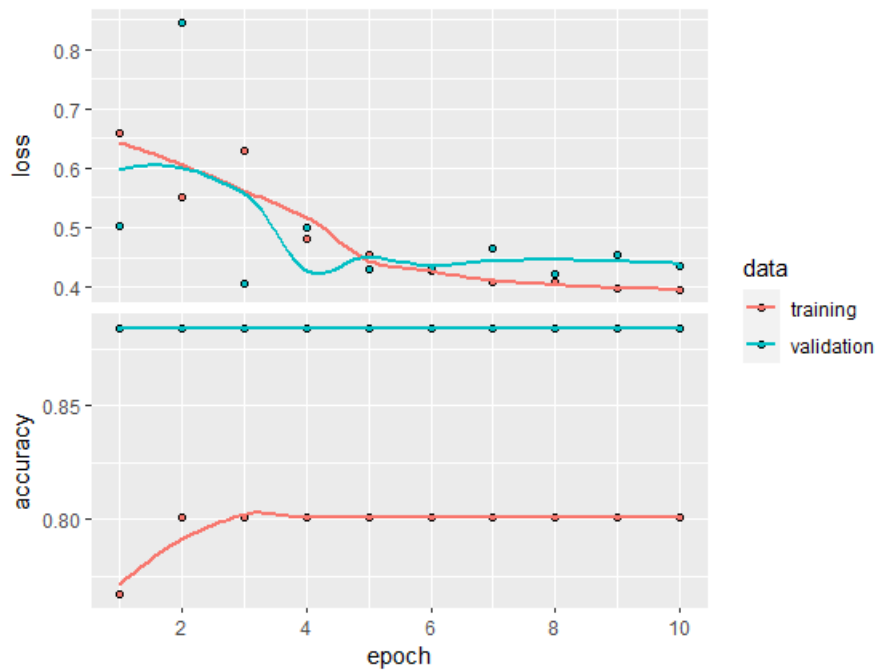


Abbildung 10: Vorhersage für den März 2022 nach 10m Auflösung

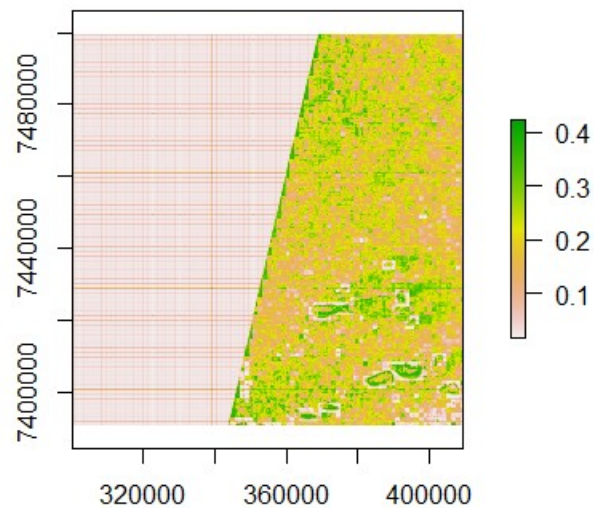


Abbildung 11: Vorhersage für den Juni 2022 nach 10m Auflösung

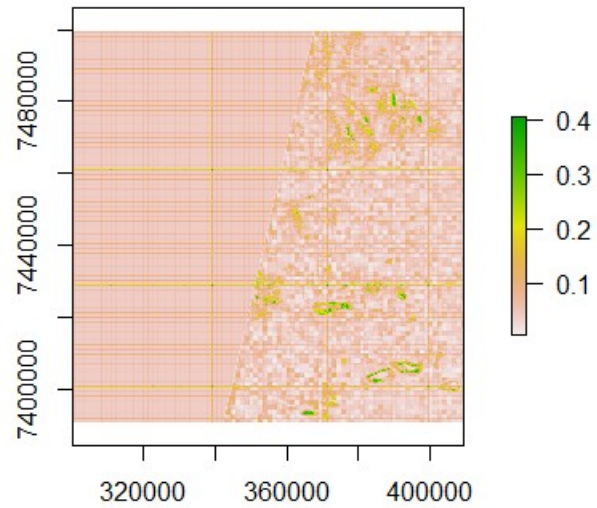


Abbildung 12: Vorhersage für Oktober 2017

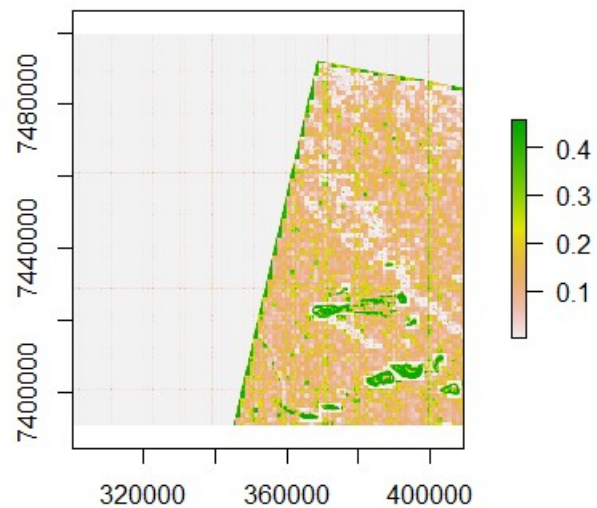
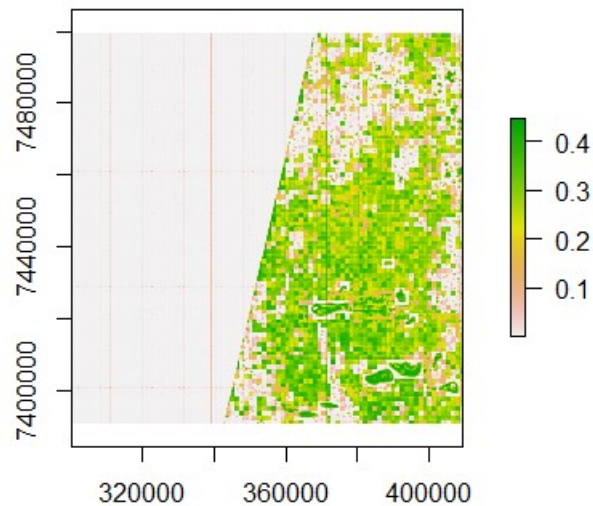


Abbildung 13: Vorhersage für November 2018



Die Korallen sind zwar auf allen, als Mosaik zusammengesetzten vorhergesagten Bildern deutlich von dem sie umgebenden Meerwasser, einschließlich den von Wolken bedeckten Gebieten zu unterscheiden, die gebleichten Stellen sind jedoch vielfach kaum zu erkennen. Schaut man sich einzelne Vorhersageabschnitte an (Abbildungen 14 und 15), auf denen es mutmaßlich Bleichereignisse gegeben hatte, erscheinen diese allerdings korrekt vorhergesagt.

Bei der Gegenüberstellung der Vorhersagen des gleichen Ausschnittes für verschiedene Jahre scheint zudem eine Zunahme der Bleiche mit der Zeit erkennbar. Anhand der weißen Färbung lässt sich die Bleiche auf diesem Ausschnitt allerdings nur erahnen und allenfalls im Zusammenhang mit den benachbarten Ausschnitten einigermaßen sicher feststellen. Eine Gegenüberstellung des gleichen Abschnittes von Frühling (November) 2018 und Winter (Juni) 2022 zeigt in der späteren Aufnahme dennoch eine deutlich stärker ausgedehnte Weißfärbung, die fast den gesamten Abschnitt abdeckt. Eine deutliche Zunahme der Bleiche an dieser Stelle innerhalb dieser dreieinhalb Jahre ließ sich also durchaus vorhersagen. Ob diese Vorhersage jedoch schon so ausgereift ist, dass sie sich für ein größeres Gebiet, vielleicht sogar für das ganze Great Barrier Reef zuverlässig treffen und mit konkreten Klima- und Umweltdaten im Zusammenhang bringen lässt, scheint angesichts der mangelhaften Schärfe noch zweifelhaft.

Abbildung 14: Vorhersage eines mutmaßlich gebleichten Abschnittes von 2018 nach Trainingsdaten von 2022

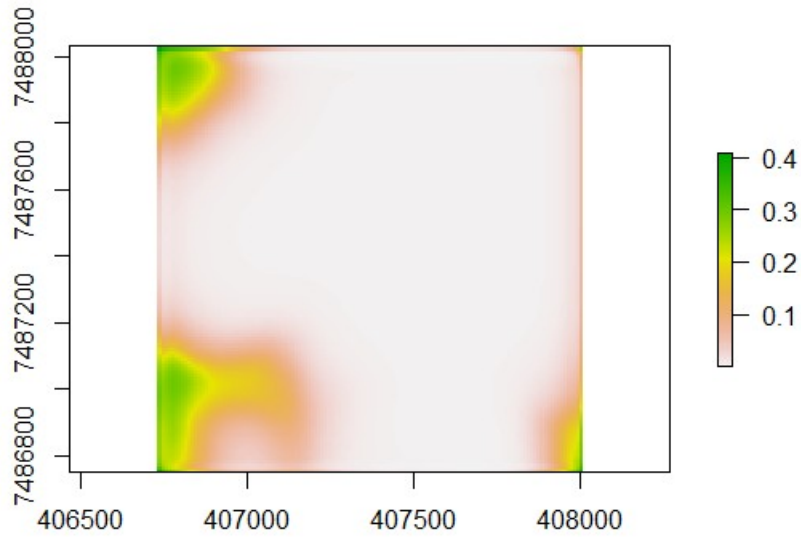
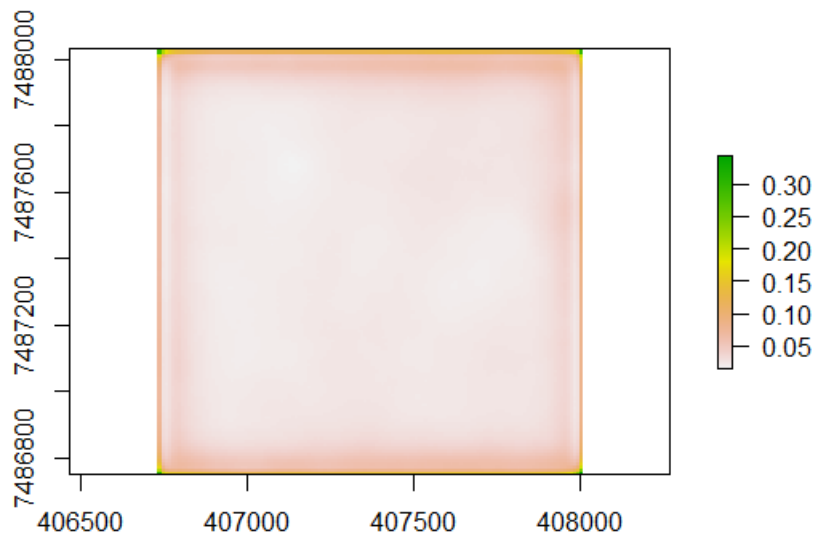


Abbildung 15: Vorhersage des gleichen Abschnittes für Juni 2022



Die demonstrierte, einigermaßen sichere Vorhersage belegt nichtsdestotrotz, dass die Methode der neuronalen Netzwerke für die Vorhersage von Korallenbleiche nach Sentinel-2 Aufnahmen prinzipiell geeignet ist. Sofern die gleiche Stelle regelmäßig untersucht wird, erscheint damit auch eine Entwicklung vorhersagbar, die mit Klima- und Umweltdaten auf eine Korrelation getestet und gegebenenfalls in Modelle für verschiedene Zukunftsszenarios und Rückschlüsse in fernere Vergangenheit herangezogen werden kann. Sofern die errechnete Genauigkeit der Trainingsdaten außergewöhnlich hoch ausgewiesen wird, sind die gezeigten Vorhersagen zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch noch großen Zweifeln zu unterziehen.

Um die Veränderung infolge der Bleichereignisse zu quantifizieren, ist sowohl für den Zeitabschnitt 2017 auf 2018, für das Intervall 2017 auf 2022, für 2018 auf 2022 als auch für März auf Juni 2022 eine Land-Cover-Change, aufbauend auf einer Supervized Classification mit dem SCP durchgeführt worden. Da hierbei neben einer Karte als Tif-Datei, die bei entsprechender Farbmarkierung die neuen bzw. nicht mehr gebleichten Stellen mit eigener Färbung darstellt sowie außerdem eine Quantifizierung nach Pixelmenge und Quadratmetern ermittelt und in einer erstellten CSV-Datei aufgelistet wird, kann man bei entsprechender Rechenkapazität auch das Gesamtausmaß an Bleiche aber auch an Regeneration für ein Gebiet vergleichbarer Bedingungen in der gegebenen Zeit quantitativ abschätzen und genauer lokalisieren, um sie mit spezifischen Umweltbedingungen wie Salzgehalt oder Wassertemperatur in Zusammenhang zu bringen.

Im Konkreten zeigte sich für den kurzen Zeitabschnitt zwischen März und Juni 2022 eine Zunahme der Bleiche, in der Form, dass erheblich mehr Pixel und Flächeneinheiten, die zu Beginn zur Klasse der gesunden Koralle gehörten, am Ende des Zeitabschnitts der Klasse der gebleichten Koralle zugewiesen wurden als umgekehrt. Dieses Ergebnis zeigte sich von der Tendenz her bei allen drei Auflösungsstärken (Tabellen 1 bis 3 und Abbildungen 16 bis 18). Erstaunlicherweise ergaben sich für den Vergleich weiter auseinanderliegender Zeitpunkte sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die Gegenüberstellung der vorhergesagten Pixel- und Quadratmeterwerte für Oktober 2017 sowohl mit November 2018 als auch Juli 2022 zeigte deutlich mehr Anteile für Bleiche in der älteren als in der jüngeren Aufnahme, d.h. einen extremen Rückgang der Bleichen (Tabelle 4 und 5 sowie Abbildung 19 und 20). Die Gegenüberstellung der Aufnahme von November 2018 und Juli 2022 (Tabelle 6 sowie Abbildung 21) ergab hingegen das erwartete umgekehrte Ergebnis mit einer starken relativen Zunahme der Bleiche.

Entweder war die Vorhersage mindestens in einem Fall falsch - vermutlich in der ältesten Aufnahme vom Frühjahr (Oktober) 2017 - oder es ist in dieser Zeit tatsächlich zu einer starken Regeneration gekommen, die um ein Vielfaches größer war als eine neu entstandene Bleiche in einem der darauf folgenden Sommern an Korallenfläche betroffen hat. Eine dritte Möglichkeit könnte auch in einer vollständigen Überwucherung der gebleichten Stellen mit Algen in diesem längeren Zeitintervall liegen, wofür die kurze Zeitspanne vom zweieinhalb Monaten in 2022 wohl kaum ausgereicht haben dürfte. Schließlich weist das Sentinel2Coral Project der ESA darauf hin, dass sowohl Absterben, Regenerieren als auch Überwucherung mit Algen auf dem Satellitenfoto eine Verdunklung hervorrufen, die in allen drei Fällen häufig als Rückgang der Bleiche fehlinterpretiert wird. (ESA 2017) Eine weitere Möglichkeit für Fehlinterpretationen könnte in einer zu hoch eingeschätzten gebleichten Fläche in den älteren Aufnahmen liegen, weil

es zu Vermischungen mit Sand gekommen sein könnte. Xu et al. (2021) betonen, dass die gemischte Reflexion von Sand und dunkleren Substraten mit bloßem Auge der gebleichten Koralle sehr ähnlich sehen und die maximale Auflösung von 10 Metern bei Sentinel-2 Aufnahmen für die genaue Fixierung kleinerer Korallenflecken von wenigen Metern Umfang kaum ausreichten.

Tabelle1: Ergebnis der Change Detection für das Untersuchungsgebiet für den Zeitraum Spätsommer bis Spätherbst 2022 in 10 Metern Auflösung

	CrossClassCode	18.06.22	30.03.22	PixelSum	Area..metre.2.
1	1	Koralle	Koralle	1174976.0	117497600.0
2	2	Koralle	Gebliche Koralle	18150.0	1815000.0
3	4	Koralle	Meerwasser	51468.0	5146800.0
4	7	Koralle	Wolke	12330.0	1233000.0
5	3	Gebliche Koralle	Koralle	50361.0	5036100.0
6	5	Gebliche Koralle	Gebliche Koralle	12604.0	1260400.0
7	8	Gebliche Koralle	Meerwasser	993547.0	99354700.0
8	11	Gebliche Koralle	Wolke	16550.0	1655000.0
9	6	Meerwasser	Koralle	3191.0	319100.0
10	9	Meerwasser	Gebliche Koralle	62686.0	6268600.0
11	12	Meerwasser	Meerwasser	112479475.0	11247947500.0
12	14	Meerwasser	Wolke	206653.0	20665300.0
13	10	Wolke	Koralle	6188.0	618800.0
14	13	Wolke	Gebliche Koralle	1702.0	170200.0
15	15	Wolke	Meerwasser	5433977.0	543397700.0
16	16	Wolke	Wolke	36542.0	3654200.0
17					
18		> LAND COVER CHANGE MATRIX [metre^2]			
19		18.06.22			
20	30.03.22	Koralle	Gebliche Koralle	Meerwasser	Wolke
21	Koralle	117497600	5036100	319100	618800
22	Gebliche Koralle	1815000	1260400	6268600	170200
23	Meerwasser	5146800	99354700	11247947500	543397700
24	Wolke	1233000	1655000	20665300	3654200
25	Total	125692400	107306200	11275200500	547840900
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20	Total				
21	123471600				
22	9514200				
23	11895846700				
24	27207500				
25	12056040000				

Abbildung 16: Kartographische Darstellung der Change Detection für Spätsommer auf Spätherbst 2022 in 10 Metern Auflösung

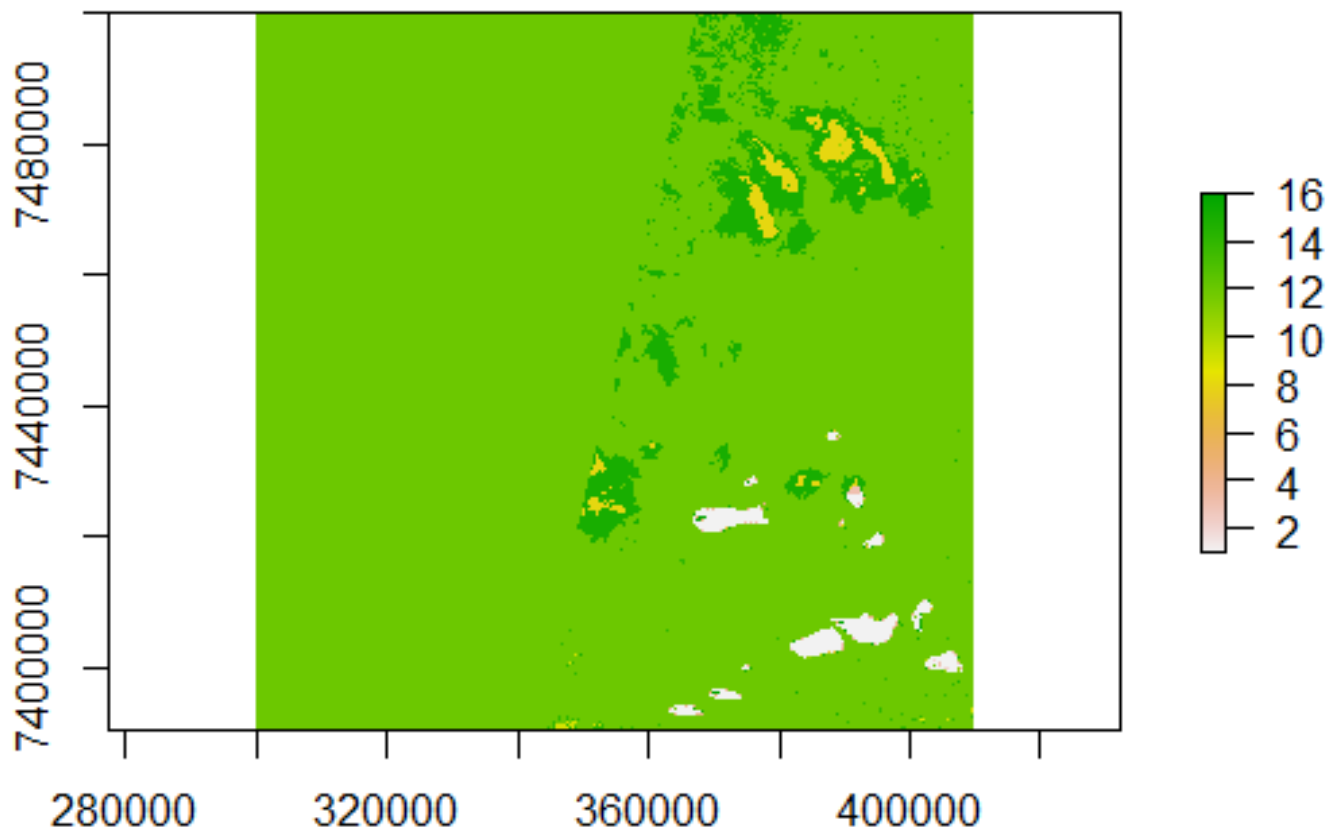


Tabelle 2: Ergebnis der Change Detection für das Untersuchungsgebiet für den Zeitraum Spätsommer bis Spätherbst 2022 in 20 Metern Auflösung

	CrossClassCode	18.06.22	30.03.22	PixelSum	Area..metre.2.
1	1	Koralle	Koralle	256745.0	102698000.0
2	2	Koralle	gebleichte Koralle	352.0	140800.0
3	4	Koralle	Meerwasser	76710.0	30684000.0
4	7	Koralle	Wolke	299.0	119600.0
5	3	gebleichte Koralle	Koralle	9923.0	3969200.0
6	5	gebleichte Koralle	gebleichte Koralle	1259.0	503600.0
7	8	gebleichte Koralle	Meerwasser	92026.0	36810400.0
8	11	gebleichte Koralle	Wolke	2681.0	1072400.0
9	6	Meerwasser	Koralle	726.0	290400.0
10	9	Meerwasser	gebleichte Koralle	780.0	312000.0
11	12	Meerwasser	Meerwasser	28597027.0	11438810800.0
12	14	Meerwasser	Wolke	37016.0	14806400.0
13	10	Wolke	Koralle	406.0	162400.0
14	13	Wolke	gebleichte Koralle	430.0	172000.0
15	15	Wolke	Meerwasser	1057701.0	423080400.0
16	16	Wolke	Wolke	6019.0	2407600.0
17					
18		> LAND COVER CHANGE MATRIX [metre^2]			
19		18.06.22			
20	30.03.22	Koralle	gebleichte Koralle	Meerwasser	Wolke
21	Koralle	102698000	3969200	290400	162400
22	gebleichte Koralle	140800	503600	312000	172000
23	Meerwasser	30684000	36810400	11438810800	423080400
24	Wolke	119600	1072400	14806400	2407600
25	Total	133642400	42355600	11454219600	425822400
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20	Total				
21	107120000				
22	1128400				
23	11929385600				
24	18406000				
25	12056040000				

Abbildung 17: Kartographische Darstellung der Change Detection für Spätsommer auf Spätherbst 2022 in 20 Metern Auflösung

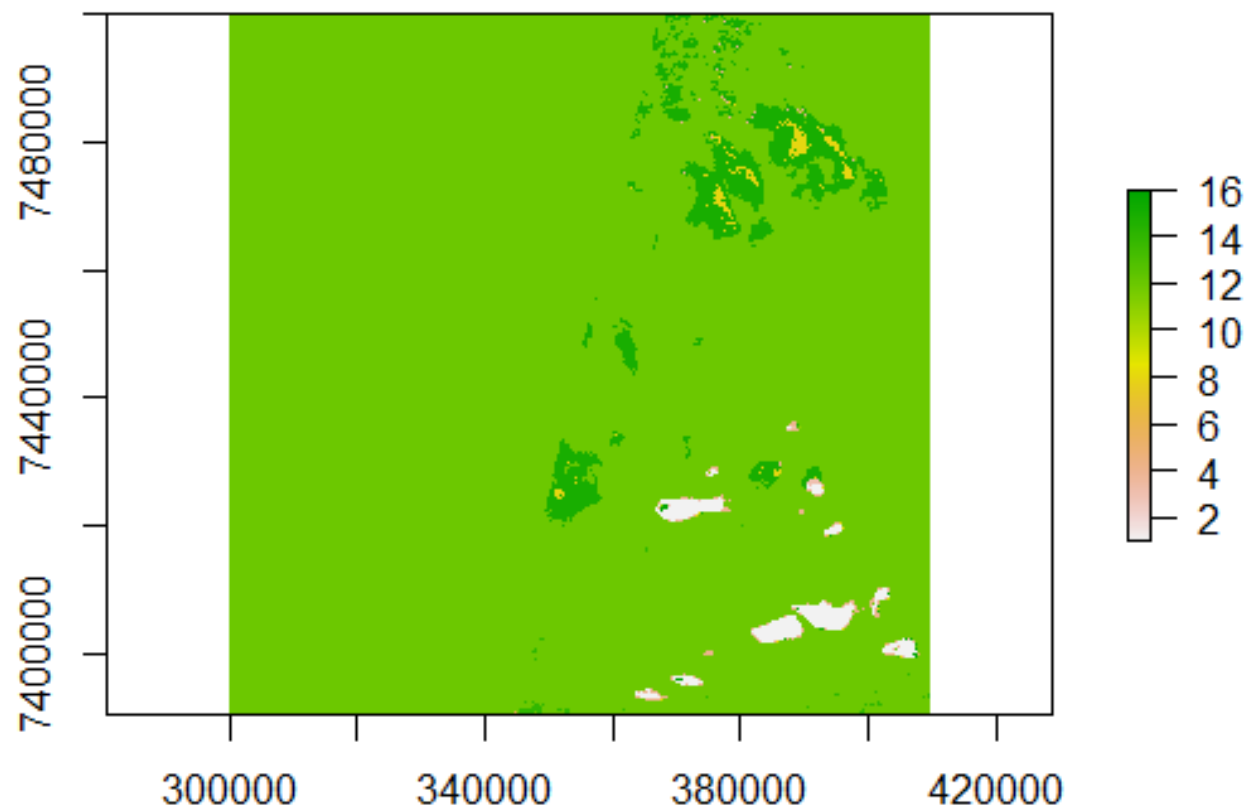


Tabelle 3: Ergebnis der Change Detection für das Untersuchungsgebiet für den Zeitraum Spätsommer bis Spätherbst 2022 in 60 Metern Auflösung

	CrossClassCode	18.06.22	30.03.22	PixelSum	Area..metre.2.
1	1	Koralle	Koralle	33180.0	119448000.0
2	2	Koralle	gebleichte Koralle	223.0	802800.0
3	4	Koralle	Meerwasser	2474.0	8906400.0
4	7	Koralle	wolke	1.0	3600.0
5	3	gebleichte Koralle	Koralle	1715.0	6174000.0
6	5	gebleichte Koralle	gebleichte Koralle	644.0	2318400.0
7	8	gebleichte Koralle	Meerwasser	3539.0	12740400.0
8	11	gebleichte Koralle	wolke	1.0	3600.0
9	6	Meerwasser	Koralle	1570.0	5652000.0
10	9	Meerwasser	gebleichte Koralle	66.0	237600.0
11	12	Meerwasser	Meerwasser	3164096.0	11390745600.0
12	14	Meerwasser	wolke	5045.0	18162000.0
13	10	wolke	Koralle	625.0	2250000.0
14	13	wolke	gebleichte Koralle	218.0	784800.0
15	15	wolke	Meerwasser	134718.0	484984800.0
16	16	wolke	wolke	785.0	2826000.0
17					
18		> LAND COVER CHANGE MATRIX [metre^2]			
19		18.06.22			
20	30.03.22	Koralle	gebleichte Koralle	Meerwasser	wolke
21	Koralle	119448000	6174000	5652000	2250000
22	gebleichte Koralle	802800	2318400	237600	784800
23	Meerwasser	8906400	12740400	11390745600	484984800
24	wolke	3600	3600	18162000	2826000
25	Total	129160800	21236400	11414797200	490845600
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20	Total				
21	133524000				
22	4143600				
23	11897377200				
24	20995200				
25	12056040000				

Abbildung 18: Kartographische Darstellung der Change Detection für Spätsommer auf Spätherbst 2022 in 60 Metern Auflösung

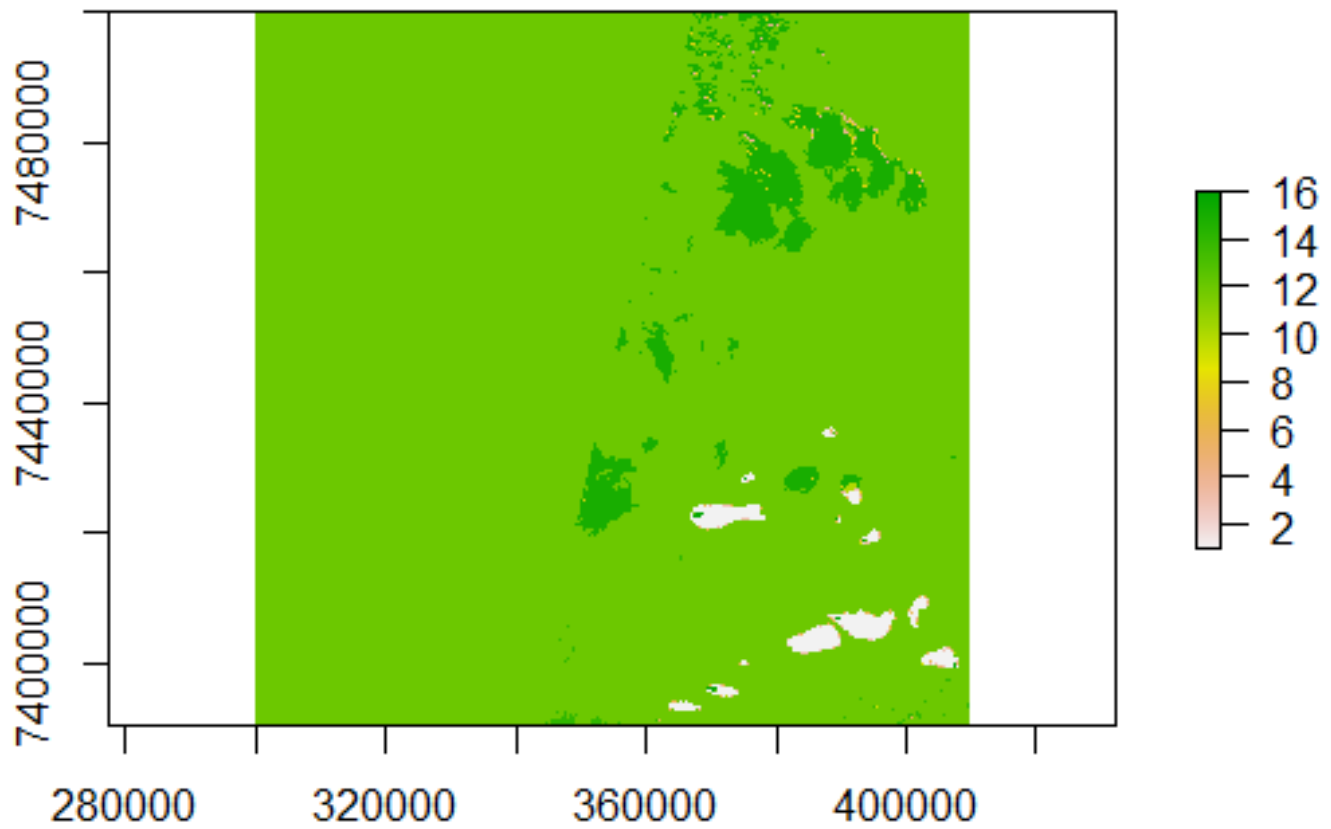


Tabelle 4: Ergebnis der Change Detection für das Untersuchungsgebiet für den Zeitraum 2017 auf 2018

	CrossClassCode	2018	2017	Pixelsum	Area..metre.2.
1	1	Koralle	Koralle	1283720.0	128372000.0
2	2	Koralle	gebleichte Koralle	54583.0	5458300.0
3	4	Koralle	Meerwasser	22765.0	2276500.0
4	7	Koralle	wolke	777.0	77700.0
5	3	gebleichte Koralle	Koralle	19741.0	1974100.0
6	5	gebleichte Koralle	gebleichte Koralle	60287930.0	6028793000.0
7	8	gebleichte Koralle	Meerwasser	7304.0	730400.0
8	11	gebleichte Koralle	wolke	3121.0	312100.0
9	6	Meerwasser	Koralle	41016.0	4101600.0
10	9	Meerwasser	gebleichte Koralle	6717727.0	671772700.0
11	12	Meerwasser	Meerwasser	49591444.0	4959144400.0
12	14	Meerwasser	wolke	220373.0	22037300.0
13	10	wolke	Koralle	4056.0	405600.0
14	13	wolke	gebleichte Koralle	507648.0	50764800.0
15	15	wolke	Meerwasser	1757318.0	175731800.0
16	16	wolke	wolke	40877.0	4087700.0
17					
18		> LAND COVER CHANGE MATRIX [metre^2]			
19		2018			
20	2017	Koralle	gebleichte Koralle	Meerwasser	wolke
21	Koralle	128372000	1974100	4101600	405600
22	gebleichte Koralle	5458300	6028793000	671772700	50764800
23	Meerwasser	2276500	730400	4959144400	175731800
24	wolke	77700	312100	22037300	4087700
25	Total	136184500	6031809600	5657056000	230989900
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20	Total				
21	134853300				
22	6756788800				
23	5137883100				
24	26514800				
25	12056040000				

Abbildung 19: Kartographische Darstellung der Change Detection für den Zeitraum von 2017 bis 2018

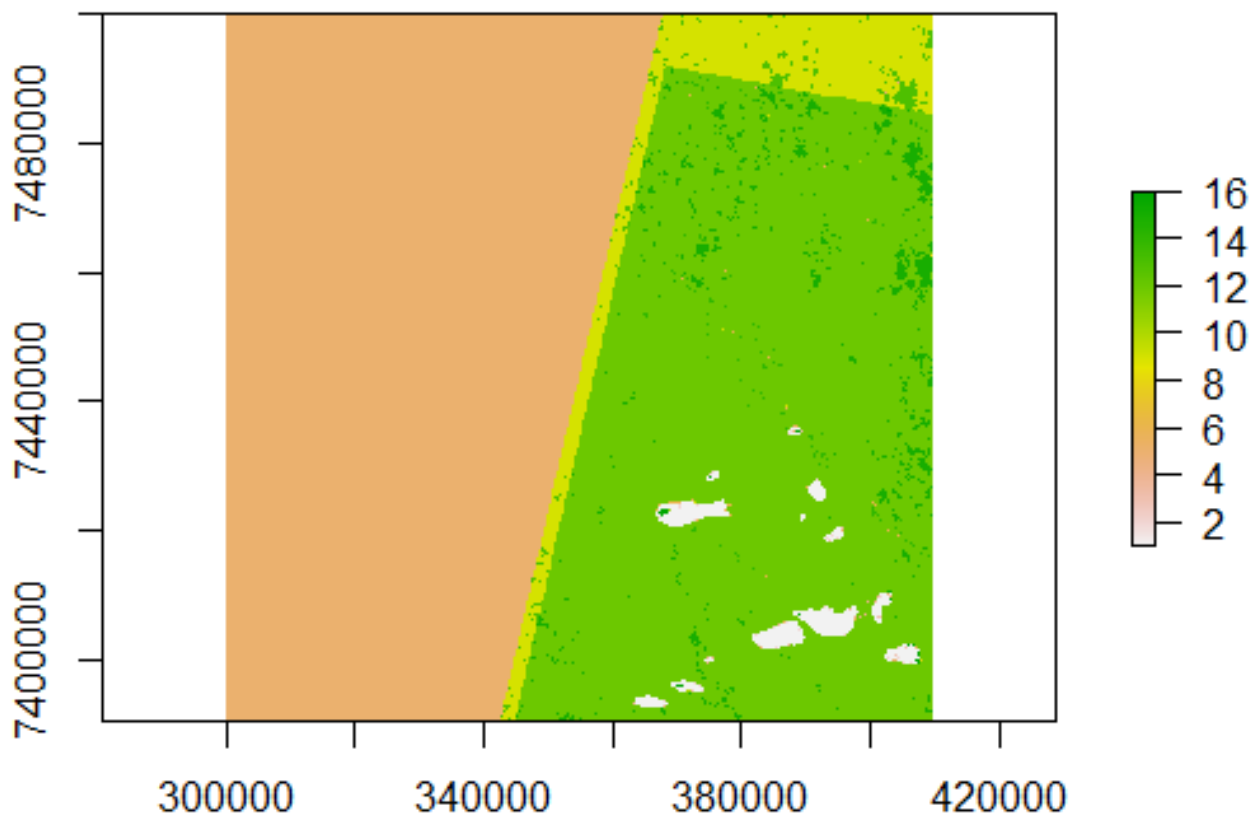


Tabelle 5: Ergebnis der Change Detection für das Untersuchungsgebiet für den Zeitraum 2017 auf 2022

	CrossClassCode	2022	2017	PixelSum	Area..metre.2.
1	1	Koralle	Koralle	1323531.0	132353100.0
2	2	Koralle	gebleichte Koralle	101211.0	10121100.0
3	4	Koralle	Meerwasser	2255937.0	225593700.0
4	7	Koralle	wolke	11899.0	1189900.0
5	3	gebleichte Koralle	Koralle	26875.0	2687500.0
6	5	gebleichte Koralle	gebleichte Koralle	17098.0	1709800.0
7	8	gebleichte Koralle	Meerwasser	413030.0	41303000.0
8	11	gebleichte Koralle	wolke	8028.0	802800.0
9	6	Meerwasser	Koralle	82088.0	8208800.0
10	9	Meerwasser	gebleichte Koralle	531.0	53100.0
11	12	Meerwasser	Meerwasser	115295998.0	11529599800.0
12	14	Meerwasser	wolke	271579.0	27157900.0
13	10	wolke	Koralle	200.0	20000.0
14	13	wolke	gebleichte Koralle	2324.0	232400.0
15	15	wolke	Meerwasser	720404.0	72040400.0
16	16	wolke	wolke	29667.0	2966700.0
17					
18		> LAND COVER CHANGE MATRIX [metre^2]			
19		2022			
20	2017	Koralle	gebleichte Koralle	Meerwasser	wolke
21	Koralle	132353100	2687500	8208800	20000
22	gebleichte Koralle	10121100	1709800	53100	232400
23	Meerwasser	225593700	41303000	11529599800	72040400
24	wolke	1189900	802800	27157900	2966700
25	Total	369257800	46503100	11565019600	75259500
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20	Total				
21	143269400				
22	12116400				
23	11868536900				
24	32117300				
25	12056040000				

Abbildung 20: Kartographische Darstellung der Change Detection für den Zeitraum von 2017 bis 2022

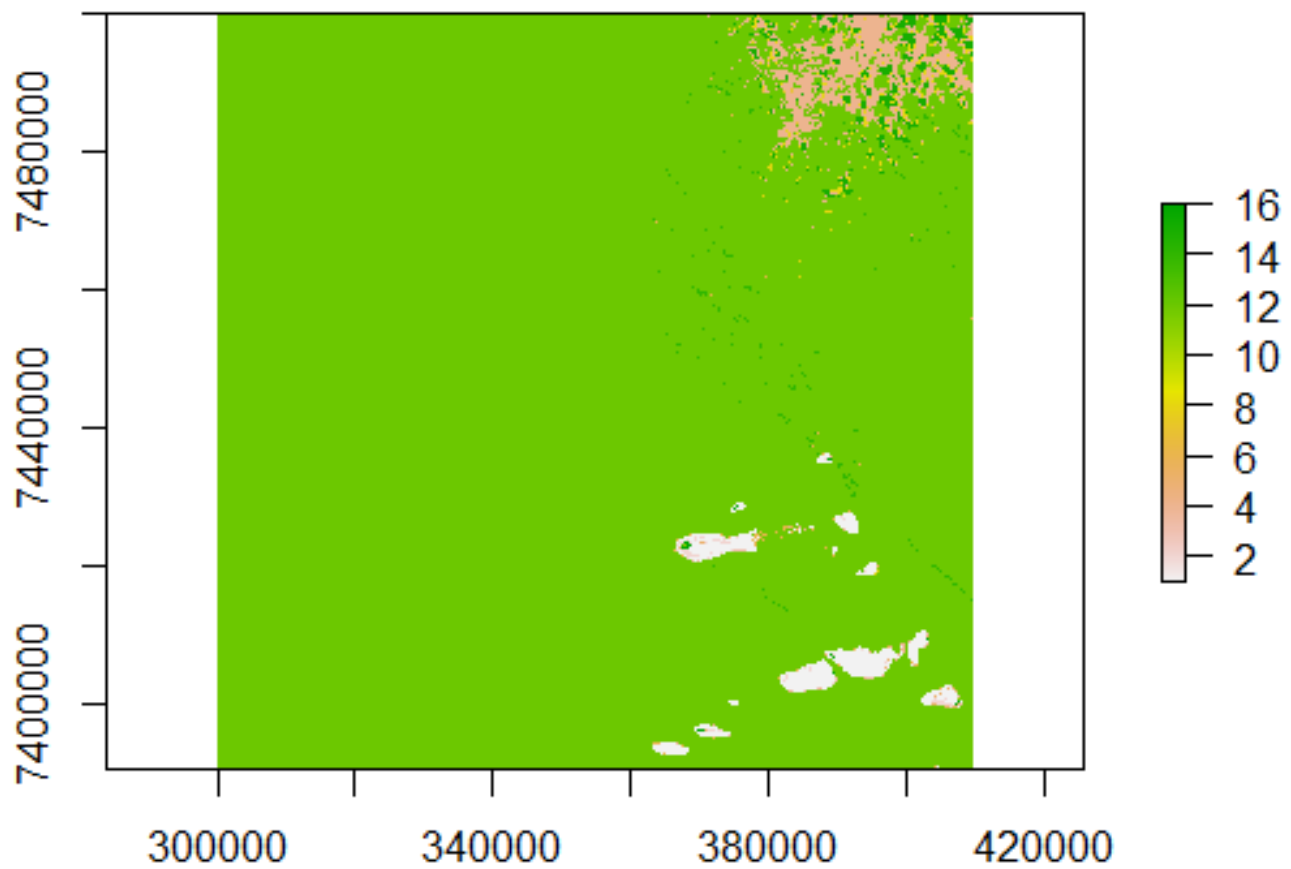
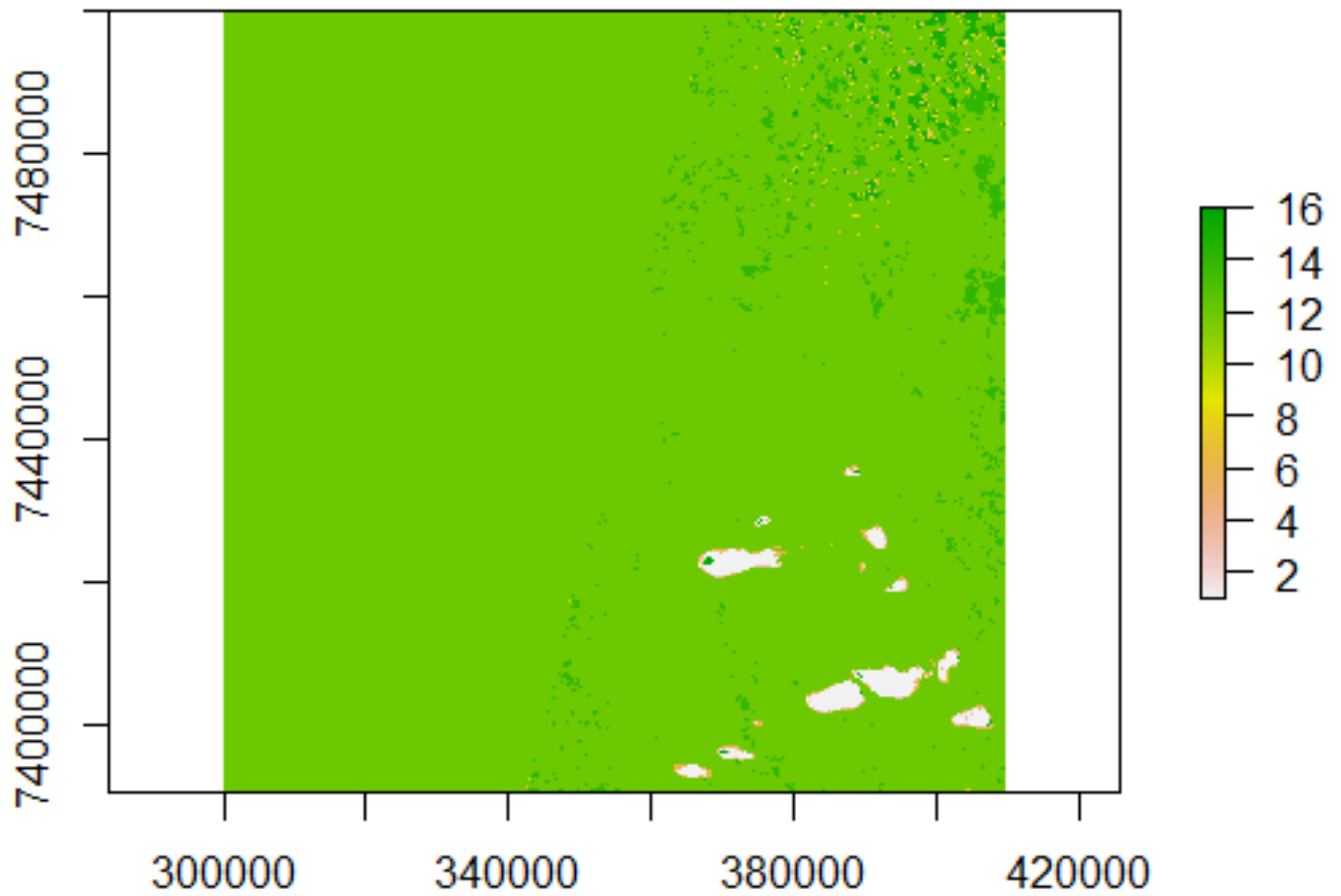


Tabelle 6: Ergebnis der Change Detection für das Untersuchungsgebiet für den Zeitraum 2018 auf 2022

	CrossClassCode	2022	2018	PixelSum	Area..metre.2.
1	1	Koralle	Koralle	1151781.0	115178100.0
2	2	Koralle	gebleiche Koralle	9699.0	969900.0
3	4	Koralle	Meerwasser	88643.0	8864300.0
4	7	Koralle	Wolke	7485.0	748500.0
5	3	gebleiche Koralle	Koralle	54639.0	5463900.0
6	5	gebleiche Koralle	gebleiche Koralle	37653.0	3765300.0
7	8	gebleiche Koralle	Meerwasser	227351.0	22735100.0
8	11	gebleiche Koralle	Wolke	15852.0	1585200.0
9	6	Meerwasser	Koralle	253629.0	25362900.0
10	9	Meerwasser	gebleiche Koralle	7520.0	752000.0
11	12	Meerwasser	Meerwasser	115729396.0	11572939600.0
12	14	Meerwasser	Wolke	2083982.0	208398200.0
13	10	Wolke	Koralle	349.0	34900.0
14	13	Wolke	gebleiche Koralle	2154.0	215400.0
15	15	Wolke	Meerwasser	806457.0	80645700.0
16	16	Wolke	Wolke	83810.0	8381000.0
17					
18		> LAND COVER CHANGE MATRIX [metre^2]			
19		2022			
20	2018	Koralle	gebleiche Koralle	Meerwasser	Wolke
21	Koralle	115178100	5463900	25362900	34900
22	gebleiche Koralle	969900	3765300	752000	215400
23	Meerwasser	8864300	22735100	11572939600	80645700
24	Wolke	748500	1585200	208398200	8381000
25	Total	125760800	33549500	11807452700	89277000
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20	Total				
21	146039800				
22	5702600				
23	11685184700				
24	219112900				
25	12056040000				

Abbildung 21: Kartographische Darstellung der Change Detection für 2018 auf 2022



Da sich die Ergebnisse für die Change Detection so unterschiedlich zeigten, erscheint eine Korrelation der Bleiche mit speziellen Klima- und Umweltdaten in Form eines gemischten Modells, wobei vermutlich in erster Linie die Dauer von sommerlichen Hitzeperioden und der Salzgehalt im umgebenden Wasser in Frage kämen, noch ein wenig spekulativ. Nichtsdestotrotz deuten vor allem die Ergebnisse der Change Detection der beiden Zeitpunkte innerhalb des Jahres 2022, die bei allen drei Auflösungsstärken von der Tendenz her gleich sind, daraufhin, dass Korallenbleiche basierend auf Sentinel-2 Aufnahmen sich durchaus quantifizieren und lokal fixieren lässt, woraus sich bei der weiteren Zunahme an Daten in absehbarer Zeit eine Basis für die großflächige Vorhersage von Bleichen in Abhängigkeit ökologischer Parameter ergibt.

Schlussfolgerung und Diskussion

Sowohl die Vorhersage basierend auf erstellten Masken von Trainingsdaten und neuronalen Netzwerken in R als auch die SCP Change Detection in QGIS nach der Minimumdistanz ermöglichen es prinzipiell, Korallenbleiche in ihrer Lokalität und raumzeitlichen Ausdehnung vorherzusagen. Im Konkreten konnte gezeigt werden, dass sich die Bleiche im südlichen Great Barrier Reef in hohem Maße auf die ozean zugewandte Südostseite konzentriert und vor allem im Spätsommer und Herbst (d.h. in den Monaten April und Mai) auftritt. Hieraus lassen sich durchaus Konsequenzen für den Riffschutz und die ökologische Bewertung herausziehen. Allein die Tatsache, dass die Bleiche in der Gesamttendenz in den Jahren seit Beginn der Überfliegungen mit Sentinel-2 zugenommen hat, legt einen Zusammenhang mit dem Klimawandel zumindest in der untersuchten Region nahe.

Zugleich zeigen die Ergebnisse, dass in beiden Methoden Fehlinterpretationen nicht ausgeschlossen werden dürfen. Insbesondere sollte die Interpretation von SCP Change Detection, aufbauend auf Supervized Classification bezüglich Korallenbleiche nicht leichtfertig getroffen werden. Eine mögliche Fehlerquelle könnte sich daraus ergeben haben, dass sich an den Rändern von prinzipiell gesunden Korallen Sandablagerungen befinden, die jene Stellen irrtümlicherweise als Bleichungen anzeigen und daher die räumliche Dimension der Bleiche weit überschätzen. Außerdem erscheinen Teile aus dem Inneren der Koralle oft ähnlich hell wie die gebleichten Ränder und werden ebenfalls fälschlicherweise als Bleichungen interpretiert. Es ist zudem nicht auszuschließen, dass Bleichen an einigen Stellen bereits bei Erstellen der Trainingsdaten in ihrer Ausdehnung überschätzt wurden und somit auch anschließend bei der Vorhersage die gebleichte Fläche zu hoch eingeschätzt wird.

Carter et al. (2020) weisen schließlich darauf hin, dass auf Satellitenbildern die Bleicheergebnisse allgemein oft überschätzt würden. Eine solche Überschätzung ist auch bei Sentinel-2 Aufnahmen nicht auszuschließen. Angesichts dieser zum Teil überraschenden Ergebnisse müssen auf kurze Sicht Zweifel angebracht werden, dass die Markierung von wenigen Bleichabschnitten tatsächlich das Gesamtausmaß eines Bleichereignisses und darüber hinaus das

Regenerationspotential für ein so großes Gebiet wie das gesamte Great Barrier Reef erfasst. Wenngleich die Bleichabschnitte auf den vorhergesagten Mosaikbildern relativ vollständig zum Vorschein gelangten, zeigten die quantifizierten Ergebnisse der Change Detection Resultate, die auf den ersten Blick relativ unwahrscheinlich erscheinen. Es bedarf daher weiterer Untersuchungen an voneinander entfernter liegenden Riffabschnitten, um einschätzen zu können, wie plausibel diese Vorhersagen im überregionalen Maßstab tatsächlich sind. Solange die Vorhersageergebnisse selbst noch zweifelhaft erscheinen, ist auch eine Korrelation mit Umwelt- und Klimawerten im Hinblick auf regionale Zukunftsvorhersagen mit großen Unsicherheitsfaktoren versehen. Bei einer höheren Sicherheit in den Prognosen kann dies für eine begrenzte Lokalität in der Größe des hier untersuchten Gebiets dennoch ansatzweise gelingen.

Die weitgehend korrekte Vorhersage des Bleichausmaßes in dem Aufnahmegebiet bei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen Bildern können als hoffnungsvoller Indikator gewertet werden, auf Basis von Sentinel-2 Aufnahmen auf mittlere Sicht ein Riffmonitoring durchführen zu können, das den Rückgriff auf andere, aufwendigere und teurere Aufnahmemethoden vielerorts unnötig werden lässt. Letztlich bedarf es noch weiterer Change Detections in einem weitgehend bekannten abgegrenzten Gebiet, um zu derart sicheren Vorhersagen der Bleiche zu gelangen, dass für große Riffgebiete in Abhängigkeit von Umwelt- und Klimabedingungen sichere Prognosen getroffen werden können.

Literatur

Anthony, Kenneth R.N. (2016): Coral Reefs under Climate Change and Ocean Acidification: Challenges and Opportunities for Management and Policy, in: *Resour* 41, 59.81.

Bajjouk, Touria; Mouquet, Pascal; Ropert, Michel; Quod, Jean-Pascal; Hoarau, Ludovic; Bigot, Lionel (2019): Detection of changes in shallow coral reefs status: towards a special approach using hyperspectral and multispectral data, in: *Ecological Indicators* 96, 174-191.

Bertels, L.; Vanderstraete, T.; van Coillie, S.; Knaeps, E.; Sterckx, S.; Goossens, R.; Deronde, B. (2008): Mapping of coral reefs using hyperspectral CASI data; a case study: Fordata, Tanimba, Indonesia, in: *International Journal of Remote Sensing* 29, 2359-2391.

Carter, Amber L.; Wilson, A. Meriwehter W.; Bello, Maximiliano; Hoyos-Padilla, E. Mairicio; Inall, Mark E.; Ketchum, James T.; Schurer, Andrew; Tudhope, Alexander W. (2020): Assessing opportunities to support coral reef climate change refugia in MPAs: A case study at the Revillagigedo Archipelago, in: *Marine Policy* 112.

Congedo, Luca (2021): Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>

Dubinsky, Z. V.Y.; Stambler, Noga (1996): Marine pollution and coral reefs, in: *Global Change Biol* 2, 511-526.

Eddy, Tyler D.; Lam, Vicky W.Y.; Reygondeau, Gabriel; Cisneros-Montemayor, Andrés M.; Greer, Krista; Palomares, Maria Lourdes D. (2021): Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services, in: *One Earth* 4, 1278-1285. ESA (2017): Sentinel-2 captures of coral bleaching of Great Barrier Reef, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Sentinel-2_captures_coral_bleaching_of_Great_Barrier_Reef , letzter Aufruf 20.08.2023, 15:58 Uhr

Fong, Peggy; Paul, Valerie J. (2011): Coral Reef Algae, in: Dubinsky, Zwy and Stambler, Noga: *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 241-272.

Hedley, John D.; Roelsema, Chris; Brando, Vittorio; Giardino, Claudia; Kutser, Tiit; Phinn, Stuart; Mumby, Peter J.; Barrilero, Omar; Laporte, Jean; Koetz, Benjamin (2018): Coral reef applications of Sentinel-2: Coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping with comparison to Landsat 8, *Remote Sensing of Environment* 216, 598-614.

Hoegh-Guldberg, O.; Mumby, P.J.; Hooten, A.J.; Steneck, R.S.; Greenfield, P.; Gomez, E. (2007): Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification, in: *Science* 318, 1737-1742.

Hopley, David; Smithers, Scott G.; Parnell, Kevin E. (2007): *The Geomorphology of the Great Barrier Reef - Development, Diversity and Change*, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo.

Lesser, Micheal P. (2011): Coral Bleaching: Causes and Mechanisms, in: Dubinsky, Zwy and Stambler, Noga: *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 405-419.

Liu, Gang und Strong, Alan E. (2003): Remote Sensing of Sea Surface Temperatures during 2002 Barrier Reef Coral Bleaching, *EOS*, Volume 84, Number 15. Valueva, M.V.; Nagornov, N.N.; Lyakhov, P.A.; Valuev, G.V.; Charvyakov, N.I. (2020): Application of the residue number system to reduce hardware costs of the convolutional neural network implementation, in: *Mathematics and Computers in Simulation* 177, 232-243.

Weeks, Scarle J.; Berkelmans, Ray; Heron, Scott F. (2013): Thermal Applications, in: Goodman, James A.; Purkis, Samuel J.; Phinn, Stuart R.: *Coral Reef Remote Sensing - A Guide for Mapping, Monitoring and Management*, Dordrecht, Heidelberg, New York, London.

Xu, Jingping; Zhao, Jianhua; Wang, Fei; Chen, Yanlong und Lee, Zhongping (2021): Detection of Coral Reef Bleaching Based on Sentinel-2 Multi-Temporal Imagery: Simulation and Case Study, *Frontiers in Marine Science* March 2021, Volume 8.