

Impressum:

Angewandte Fernerkundung mit der Google Earth Engine

Georg Stauch (Hrsg.)

Geographisches Institut der RWTH Aachen

Templergraben 55

52056 Aachen

Aachen, 2024

120 S.

Verfügbar über das institutionelle Repositorium der RWTH Aachen University:

DOI: [10.18154/RWTH-2024-03408](https://doi.org/10.18154/RWTH-2024-03408)



[CC BY 4.0 Deed | Attribution 4.0 International | Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Dieser Sammelband wird lizenziert unter der CC-BY Lizenz, ausgenommen hiervon sind Teile oder Werke, die ausdrücklich unter einer anderen Lizenz stehen.

Effekt von El-Niño-Events auf Sea Surface Temperature und Chlorophyll-Gehalt im California Current System

Erik Richter

Abstract

Das marine Ökosystem im *California Current System* (CCS) vor der Küste Kaliforniens und Baja Californias zeichnet sich durch hohe Upwelling-Intensität und Bioproduktivität aus. Durch Analyse von MODIS Terra Daten zu *Sea Surface Temperature* (SST) und Chlorophyll-*a*-Konzentration wurden im Rahmen dieser Arbeit die Beziehungen zwischen El-Niño-Events und diesen Parametern im CCS mithilfe der *Google Earth Engine* untersucht. Statistisch signifikante positive Korrelationen bestehen zwischen der SST dem Niño 3.4 Index, der als Maßzahl für das Auftreten von El-Niño-Events verwendet wird, wobei die Stärke des Zusammenhangs mit abnehmender geographischer Breite und Distanz zu Küste zunimmt. Die Chlorophyll-*a*-Konzentration zeigt vornehmlich negative Korrelationen mit El-Niño-Events, jedoch ohne ein klares räumliches Muster. Der Vergleich der Events 1997-98 und 2015-16 legt hinsichtlich der Reaktion des CCS große Ähnlichkeiten offen – darunter eine Abnahme eutropher Bereiche in Küstennähe. Zur weiteren Erforschung dieses Phänomens könnten neben den verwendeten Fernerkundungsdaten zusätzliche Datenquellen wie Upwelling-Indices hinzugezogen werden.

1. Einleitung

Das California Current System (CCS) ist ein marines Ökosystem entlang der Westküste Nordamerikas, das insbesondere durch das Phänomen des Coastal Upwellings und seine hohe Produktivität gekennzeichnet ist. Die Bildung des CCS ist eng mit einem ozeanischen Hochdruckgebiet über dem Nordost-Pazifik und dem Auftreten thermischer Tiefdruckgebiete über dem Nordamerikanischen Kontinent verbunden (García-Reyes et al. 2013: 5311). Die daraus resultierenden atmosphärischen Druckunterschiede erzeugen eine

küstenparallele Windströmung, die in Richtung des Äquators verläuft (Bakun et al. 2015: 86). Durch diese Windströmung und den angestoßenen Ekman-Transport wird das Oberflächenwasser vor der Westküste der USA sowie der mexikanischen Halbinsel Baja California vom Kontinent weggedrückt. Das entstehende Massendefizit in der obersten Gewässerschicht wird durch das Upwelling – also den Aufstieg kalten, nährstoffreichen Tiefenwassers – ausgeglichen (Huyer 1983: 260; Schwing et al. 1996: 3). Der Anstieg des Nährstoffangebots führt in der euphotischen Zone zur starken Vermehrung von

Phytoplankton und einer messbaren Erhöhung der Chlorophyll-*a*-Konzentration im Wasser (Hickey & Banas 2008: 93). Das Phytoplankton bildet die basale Trophiestufe eines äußerst produktiven Ökosystems und ist demnach für das Überleben größerer Lebewesen und die Fischerei in der Region von immenser Bedeutung.

Das Upwelling im CCS wird jedoch von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Übergeordnete Klimavariationen – wie das Auftreten von El-Niño-Events (Trenberth 1996) – können somit einen erheblichen Effekt auf den Aufstieg des Tiefenwassers und die Artenzusammensetzung ausüben. So konnte etwa infolge des El-Niño-Events 1997-98 eine erhebliche Abnahme der Chlorophyll-*a*-Konzentration beobachtet werden (Kahro & Mitchell 2000: 2938).

Diese Arbeit setzt an den Ergebnissen von Kahro & Mitchell (2000) an und versucht den Effekt von El-Niño-Events auf das CCS intensiver zu beleuchten. Um sich diesem umfassenden Thema nähern zu können, werden in dieser Arbeit drei untergeordnete Fragestellungen bearbeitet:

1. Besteht ein Zusammenhang zwischen *Sea Surface Temperature* (SST) und Chlorophyll-*a*-Konzentration im CCS und der Wassertemperatur im Bereich des tropischen Zentralpazifiks, der als Referenz für das Auftreten eines El-Niño-Events herangezogen wird?
2. Reagieren alle untersuchten Bereiche des CCS einheitlich auf übergeordnete Schwankungen?
3. Sind hinsichtlich der Reaktion des CCS auf El-Niño-Events im Beobachtungszeitraum Unterschiede zu den Ergebnissen von Kahro & Mitchell (2000) auszumachen?

Die Datengrundlage zur Bearbeitung der Forschungsfragen bilden Datensätze zur SST und Chlorophyll-*a*-Konzentration, welche den Zeitraum zwischen 2000 und 2022 abdecken und mithilfe der *Google Earth Engine* analysiert wurden.

2. Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet

Zur Abgrenzung des Untersuchungsgebiets wird die von Kahro & Mitchell (2000: 2937) angewandte Methodik aufgegriffen. Ausgehend von der Küstenlinie Kaliforniens und Baja Californias werden drei Zonierungsbänder angelegt, die den Bereich von 0-100 km (III), 100-300 km (II) und 300-1000 km (I) jenseits der Küste umfassen (Abbildung 1). Diese Zonierungsbänder werden zusätzlich in vier Zonen gleicher Fläche unterteilt, die die Küstenabschnitte von Nord- (A) und Süd-Kalifornien (B) sowie von Baja California (C) und Baja California Sur (D) repräsentieren.

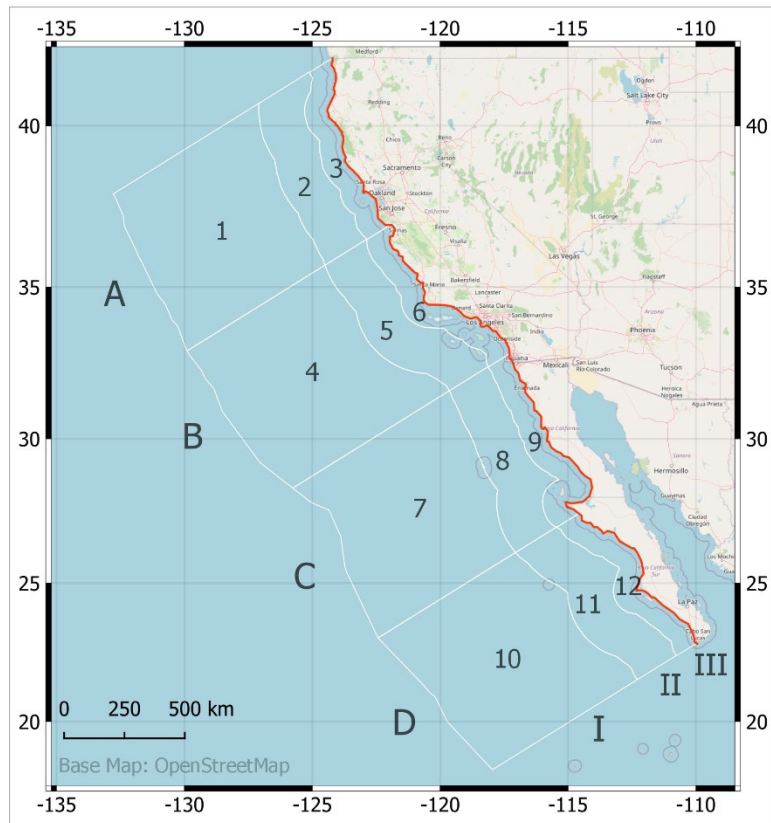


Abbildung 1: Das Untersuchungsgebiet im CCS, Kartengrundlage Open Street Map ([CC BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/)).

Auf diese Weise entsteht ein Raster aus 12 Flächen unterschiedlicher Größe. Diese werden von 1 bis 12 durchnummeriert und gemäß der Benennung von Kahru & Mitchell (2000) als Subareas bezeichnet. Die Einteilung des Untersuchungsgebiets in Subareas hat den Vorteil, dass sowohl die Distanz zur Küste als auch die geographische Breite bei den weiteren Arbeitsschritten berücksichtigt werden kann.

2.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage der Untersuchung dienen MODIS-Terra-Datensätze zur SST und Chlorophyll-*a*-Konzentration (JPL/OBPG/RSMAS 2020; NASA 2022), auf

die mithilfe der *Google Earth Engine* zugegriffen werden kann (Ocean Color SMI: Standard Mapped Image MODIS Terra Data). Die Daten stehen für den Zeitraum vom 24. Februar 2000 bis zum 28. Februar 2022 in einem zeitlichen Intervall von einem Tag zur Verfügung. Die räumliche Auflösung beträgt 4616 m.

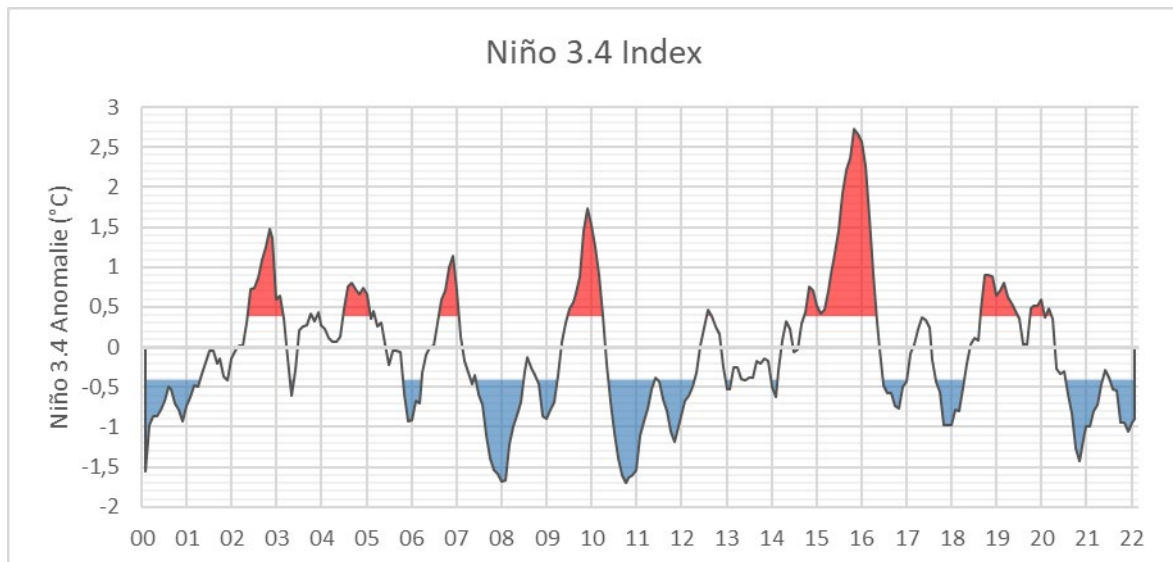


Abbildung 2: Niño 3.4 Anomalien zwischen Februar 2000 und Februar 2022 (NOAA 2023). Rote Flächen spiegeln El-Niño-, blaue Flächen La-Niña-Bedingungen wider. Als El-Niño- bzw. La-Niña-Events gelten alle Phasen, in denen der Index den Grenzwert von $\pm 0,4$ °C in mindestens fünf aufeinanderfolgenden Monaten überschreitet (eigene Darstellung).

Als Maßzahl für das Auftreten von El-Niño-Events wird in der Folge der Niño 3.4 Index verwendet. Dieser misst die Abweichung der SST im zentralen tropischen Pazifik zwischen den Koordinaten 5°N-5°S und 170°W-120°W vom langjährigen Durchschnitt dieser Region während der Referenzperiode 1981-2010 (Trenberth 1997: 2773; NOAA 2023). Um die hier verwendeten Monatswerte des Indexes zu berechnen, werden im ersten Schritt demnach die monatlichen Durchschnittswerte der SST im Niño 3.4 Beobachtungsgebiet ermittelt. Von diesen monatlichen Durchschnittswerten wird im zweiten Schritt das Mittel der Referenzperiode in eben diesem Beobachtungsgebiet abgezogen. Das Ergebnis wird auch als Niño 3.4 Anomalie bezeichnet. Ein positiver Indexwert deutet dabei auf wärmere Oberflächentemperaturen hin, was auf das Auftreten von El-Niño hinweist. Ein negativer Wert zeigt kühlere Oberflächentemperaturen an,

was typisch für La-Niña-Bedingungen ist. Als El-Niño- bzw. La-Niña-Event gilt per Definition jede Phase, deren Abweichung vom langjährigen Mittel den Grenzwert von $\pm 0,4$ °C in mindestens fünf aufeinanderfolgenden Monaten überschreitet (Trenberth 1997: 2773).

Der Niño 3.4 Index ermöglicht es, die Stärke und Richtung des El-Niño-Phänomens zu quantifizieren und wird auch bei Untersuchungen seiner Folgen im CCS verwendet (Jacox et al. 2016: 7072f). Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Indexwerte im Zeitraum, der durch die verwendeten MODIS-Datensätze abgedeckt wird und demnach für die folgenden Untersuchungen von Interesse ist. Demnach kam es zwischen Februar 2000 und Februar 2022 zu sechs El-Niño-Events. Die größte Niño 3.4 Anomalie von 2,72 °C trat dabei im November 2015 auf.

2.2 Datenauswertung

Der Zugriff auf die SST- und Chlorophyll-*a*-Daten erfolgte mithilfe der *Google Earth Engine* (Ocean Color SMI: Standard Mapped Image MODIS Terra Data). Im Rahmen der Datenverarbeitung wurden für jede der 12 Subareas monatliche Durchschnittswerte der SST und der Chlorophyll-*a*-Konzentration von Februar 2000 bis Februar 2022 erfasst. Auf dieser Basis wurden die langjährigen monatlichen Mittel der SST für jede Subarea im Beobachtungszeitraum ermittelt. Schließlich konnten die Abweichungen der monatlichen Durchschnittswerte vom jeweiligen langjährigen Mittelwert (in der Folge SST-Anomalie genannt) berechnet werden. Für Juli 2021 waren in der *Google Earth Engine* keine Daten erhältlich, sodass die hier verwendeten Daten in diesem Zeitraum eine Lücke aufweisen.

Zur Bearbeitung von Forschungsfrage 1 nach der direkten Kopplung zwischen der Upwelling-Aktivität im CCS und der Wassertemperatur im Bereich des tropischen Pazifiks (Niño 3.4 Beobachtungsgebiet) wurde eine einfache Korrelationsanalyse durchgeführt. Hierzu wurden die Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten nach Pearson zwischen der SST-Anomalie- bzw. Chlorophyll-*a*-Datenreihe und dem Niño 3.4 Index berechnet und auf statistische Signifikanz geprüft. Diese werden auch bei der Bearbeitung von Forschungsfrage 2 nach Unterschieden zwischen

den Subareas herangezogen. Für die Beantwortung von Forschungsfrage 3 wird ein genauerer Blick auf das El-Niño-Event 2015-16 geworfen, das neben jenem von 1997-98 (Kahru & Mitchell 2000) zu den stärksten El-Niño-Events der letzten Jahrzehnte zählt (Jacox et al. 2016: 7072ff).

3. Ergebnisse

Die folgende Präsentation der Ergebnisse orientiert sich an den erhobenen Daten und den zugehörigen Abbildungen. Die Aufteilung in Unterkapitel dient der Übersichtlichkeit und richtet sich nicht nach den in der Einleitung formulierten Forschungsfragen. Diese werden in Kapitel 4 und 5 aufgegriffen und detailliert diskutiert.

3.1 Langjährige SST-Monatsmittel

Abbildung 3 veranschaulicht die langjährigen Monatsmittel der SST im Zeitraum von Februar 2000 bis Februar 2022 jeder einzelnen Subarea. Die Minimal- und Maximalwerte treten in allen Subareas in derselben Jahreszeit auf. Die geringsten SST-Mittelwerte sind im Frühjahr (März, April) zu beobachten. Die Maxima hingegen fallen stets auf den September. Die niedrigsten Temperaturen treten in jeder der vier Zonen A-D in den Subareas an der Küste auf. Auch die höchsten Werte nehmen in Zonen A, B und C mit Annäherung zur Küste ab. Diese Abnahme verliert mit sinkender geographischer Breite allerdings an Intensität. In der südlichst gelegenen

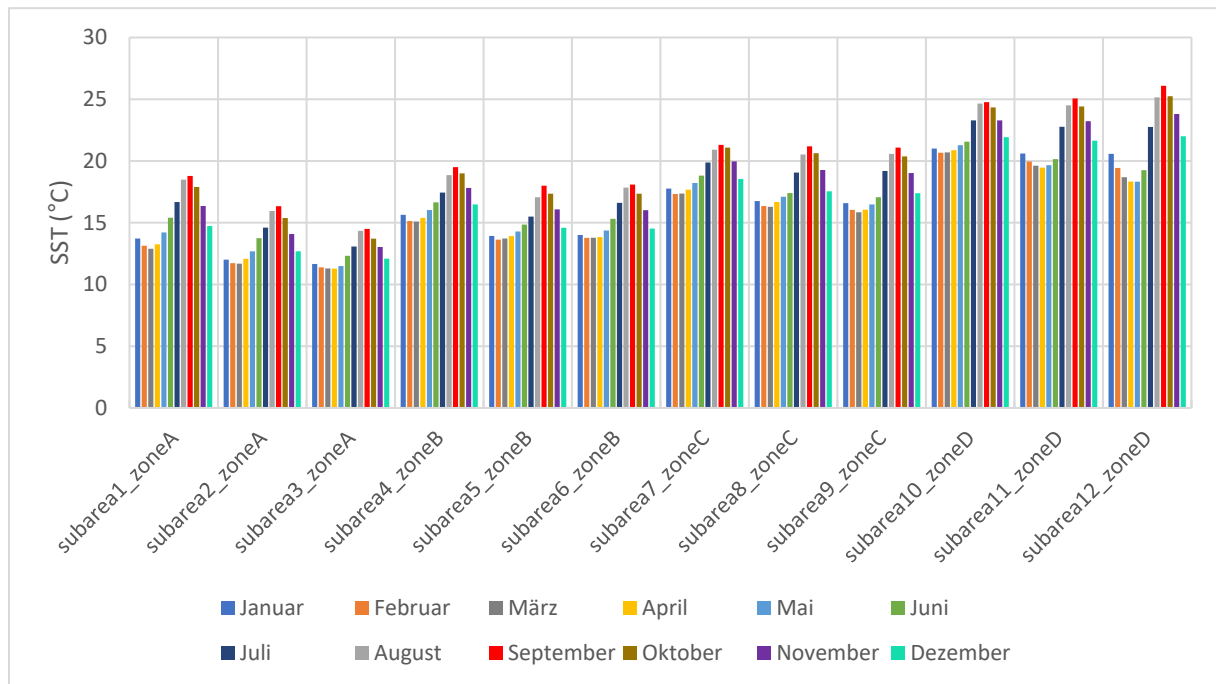


Abbildung 3: Langjährige SST-Monatsmittel der einzelnen Subareas im Zeitraum von Februar 2000 bis Februar 2022 (eigene Darstellung). Zur Lage der Zonen siehe Abbildung 1.

Zone D steigen die Maximalwerte mit schwindender Distanz zum Festland sogar an.

Die Verläufe der Kurven ähneln einander. Unterschiede ergeben sich jedoch mit Hinblick auf die Amplituden. Sowohl die niedrigsten (3,2 °C in Subarea 3) als auch die höchsten Schwankungen im Jahresverlauf (7,8 °C in Subarea 12) sind in Arealen in Küstennähe anzutreffen. Insgesamt lassen sich demnach drei Faktoren ausmachen, die Einfluss auf die SST der Subareas ausüben: die Entfernung zum Kontinent, die geographische Breite sowie die Jahreszeit, in der intensives Upwelling auftritt.

3.2 SST-Anomalien

Durch das Subtrahieren des entsprechenden Monatsmittels (Abbildung 3) von den monatlichen SST-Durchschnittswerten der jeweiligen Subarea wurden die SST-Anomalien berechnet. Diese sind in Abbildung 4 zusammengefasst. Zu sehen ist dabei die Entwicklung der SST-Anomalien in den 12 Subareas über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg.

Zunächst sollte darauf hingewiesen werden, dass die extremen Peaks im August 2000 vermutlich auf einen technischen Fehler undefinierbarer Art zurückzuführen sind. Zwar lässt sich für diese Hypothese kein Nachweis in der Literatur finden, doch weisen die SST-Durchschnittsdaten aus besagtem Monat unwahrscheinlich hohe Werte von bis zu 45 °C inmitten des Pazifiks auf. Lässt man die Werte von August 2000 demnach außer Acht,

treten die höchsten positiven Abweichungen in den Jahren 2014, 2015 und 2016 auf. In diesen Zeitraum fällt – wie bereits angemerkt – der höchste Peak des Niño 3.4 Indexes seit Beginn des Jahrtausends (Abbildung 2). Nach den Jahren 2014 und 2015 mit sehr hohen positiven SST-Anomalien sanken die Werte in allen Subareas im Juli 2016 erstmals wieder in den negativen Bereich. Der Niño 3.4 Index zeigt für diesen Zeitpunkt die Einstellung von La-Niña-Bedingungen an.

Eine längere Phase solch negativer Indexwerte zeigt Abbildung 2 zwischen den Frühjahren 2010 und 2012. Die Subareas weisen in diesem Zeitraum allesamt die höchsten negativen Abweichungen auf. Sowohl für die negativen Abweichungen als auch für die genannten positiven SST-Anomalien gilt dabei, dass die Ausschläge tendenziell nach Süden hin zunehmen. Die größten Abweichungen von den SST-Monatsmitteln sind während der beschriebenen El-Niño- und La-Niña-Events somit in Zone D vor der Küste von Baja California Sur auszumachen. In den Bereichen des CCS vor Kalifornien erreichen die Peaks ein geringeres Maß.

In kürzeren El-Niño- und La-Niña-Phasen sind die gleichsinnigen Ausschläge von Niño 3.4 Index und SST-Anomalien nicht zu verzeichnen. In Hinblick auf Zone D sind während des El-Niño-Events in der zweiten Jahreshälfte 2006 in den Subareas 11 und 12 po-

sitive Abweichungspeaks zu erkennen. Subarea 10 hingegen weist negative SST-Anomalien auf. Auch in den anderen Zonen sind für diesen Zeitraum keine Trends auszumachen. Es kommt sowohl zu positiven als auch zu kleineren negativen Abweichungen. Der genauere Blick auf das Jahr 2020 zeigt überdies, dass viele Subareas trotz La-Niña-Bedingungen in der zweiten Jahreshälfte positive SST-Anomalien aufweisen.

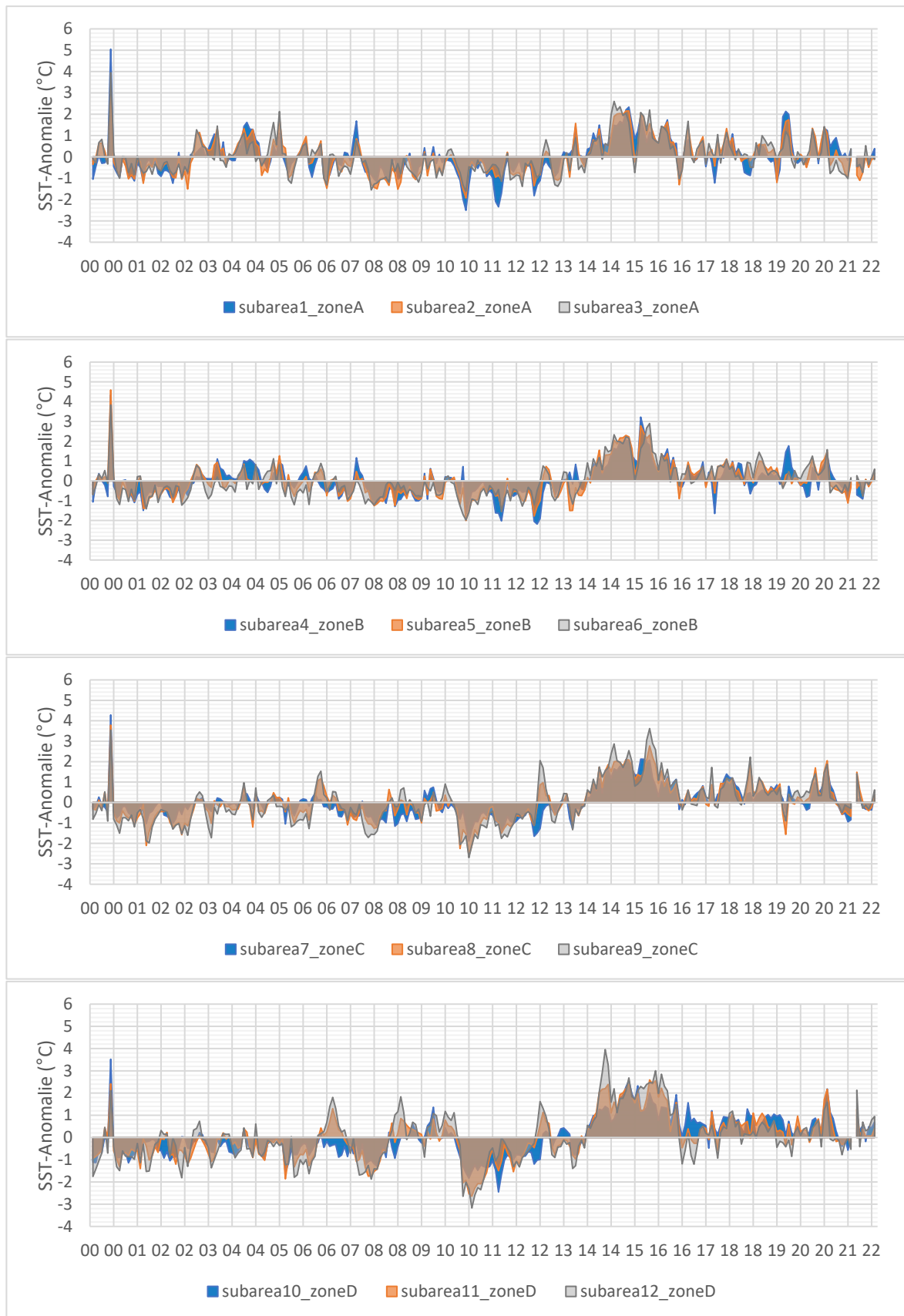


Abbildung 4: Die Diagramme zeigen die Abweichungen der monatlichen SST-Durchschnittswerte vom langjährigen Monatsmittel zwischen Februar 2000 und Februar 2022. Die Daten von Zone A bis D sind von oben nach unten wiedergegeben (eigene Darstellung).

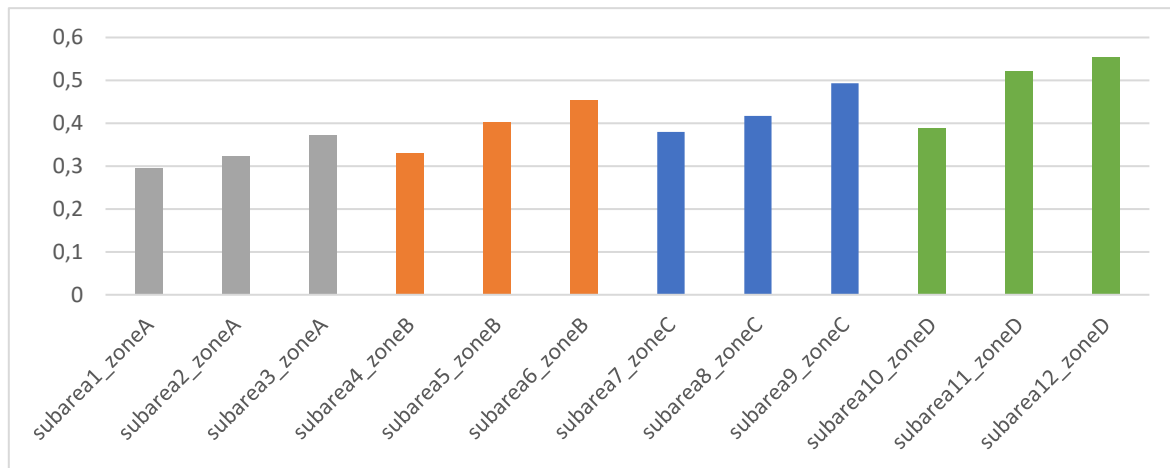


Abbildung 5: Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten nach Pearson zwischen dem Niño 3.4 Index und den SST-Anomalien der Subareas. Säulen der gleichen Farbe gehören jeweils zur gleichen Zone. Korrelationskoeffizienten, die durch die jeweils rechte Säule einer Farbe repräsentiert werden, gehören zu den Subareas in Küstennähe (eigene Darstellung).

Insgesamt ergibt sich somit folgendes Bild: Die längeren Phasen mit extremen Niño 3.4 Indexwerten (La Niña 2010-12 und El Niño 2014-16) sind auch durch hohe negative bzw. positive SST-Anomalien in allen Subareas charakterisiert. Außerhalb dieser Phasen verlaufen die Kurven von Index und SST-Anomalien hingegen so unterschiedlich, dass kein Zusammenhang zwischen den Parametern zu erkennen ist.

Um Aussagen über den tatsächlichen statistischen Zusammenhang zwischen dem Niño 3.4 Index und den SST-Anomalien treffen zu können, wurde daher eine einfache Korrelationsanalyse durchgeführt. Die Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten nach Pearson sind in Form eines Säulendiagramms in Abbildung 5 dargestellt. Die zwölf Koeffizienten sind bei einem Konfidenzintervall von 95% statistisch signifikant. Alle Werte liegen im positiven Spektrum. Der Niño 3.4 Index korreliert somit positiv mit den SST-Anomalien jeder Subarea. Hohe Abweichungen vom langjährigen

Mittel treten in der Niño 3.4 Region im zentralen Pazifik und im Untersuchungsgebiet also zeitgleich auf. Auffällig ist, dass die Werte innerhalb einer Zone mit abnehmender Distanz zum Kontinent ansteigen. Demnach können in jeder Zone die Schwankungen der SST-Anomalien am besten in den Subareas an der Küste durch den Niño 3.4 Index erklärt werden. Beim Vergleich der einzelnen Zonen fällt zudem der Anstieg der Korrelationskoeffizienten in Richtung Süden ins Auge. So liegt der maximale Wert in Zone A bei 0,373 (Subarea 3) und wächst bis Zone D auf 0,554 (Subarea 12) an.

Die Korrelation zwischen dem Niño 3.4 Index und den SST-Anomalien der Subareas ist also in den Bereichen vor Baja California höher als in den Gebieten weiter nördlich. Innerhalb jeder Zone fallen die höchsten Korrelationskoeffizienten auf die Subareas in Küstennähe. Insgesamt sind die Korrelationen vor der Halbinsel Baja California wesentlich höher als vor dem US-Bundesstaat Kalifornien.

3.3 *Chlorophyll-a-Konzentration*

Abbildung 6 veranschaulicht die Entwicklung der Chlorophyll-*a*-Konzentration im Oberflächenwasser über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg. Wie ersichtlich wird, treten die höchsten Konzentrationen und größten jährlichen Schwankungen in jeder Zone in den Subareas in Küstennähe auf. Betrachtet man daher die grauen Kurven, lässt sich zunächst folgende Gemeinsamkeit ausmachen: Die maximalen Chlorophyll-*a*-Konzentrationen sind im Jahresverlauf stets zwischen April und Juni zu beobachten. Zu dieser Zeit sind die upwelling-begünstigenden Winde am stärksten (Huyer 1983: 278). Während in den Gewässern vor Kalifornien häufig ein zweiter, kleinerer Peak im Spätsommer/Frühherbst auftritt, nimmt die Chlorophyll-*a*-Konzentration vor Baja California nach dem Maximum im Frühling wieder stark ab. Bezüglich des Wertespektrums lässt sich festhalten, dass sowohl Minimal- als auch Maximalwerte Richtung Süden hin abnehmen. Im hier untersuchten Bereich des CCS sind die größten Phytoplanktonblüten somit vor der Küste Nord-Kaliforniens vorzufinden. Subarea 12 vor Baja California Sur weist unter den Gebieten in Küstennähe im Mittel die geringsten Konzentrationswerte auf. Überdurchschnittlich hohe Peaks treten hier jedoch im Juni der Jahre 2011 bis 2013 auf. Wie bereits erwähnt zeigt der Niño 3.4 Index für diesen Zeitraum eine länger andauernde La-

Niña-Phase an. Während des El-Niño-Events 2015-16 hingegen treten extrem niedrige Juni-Peaks auf. Der Wert von Juni 2015 ist der Einzige in der gesamten Datenreihe, der deutlich unter 1 mg/m³ liegt.. Andere außergewöhnlich hohe (niedrige) Juni-Peaks hingegen treten nicht zur gleichen Zeit auf wie überdurchschnittlich niedrige (hohe) Indexwerte, folgen jedoch auf ein kurz zuvor stattgefundenes La-Niña- bzw. El-Niño-Event. Das außergewöhnlich niedrige Maximum der Chlorophyll-*a*-Konzentration im Juni 2005 fällt zusammen mit leicht negativen Indexwerten und erfolgt unmittelbar nach dem El-Niño-Event von 2004-05. Auch der Juni-Peak 2008 tritt nicht zur gleichen Zeit wie der Höhepunkt des La-Niña-Events 2007-08 auf, doch folgt unmittelbar auf dieses. Diese Stellen lassen

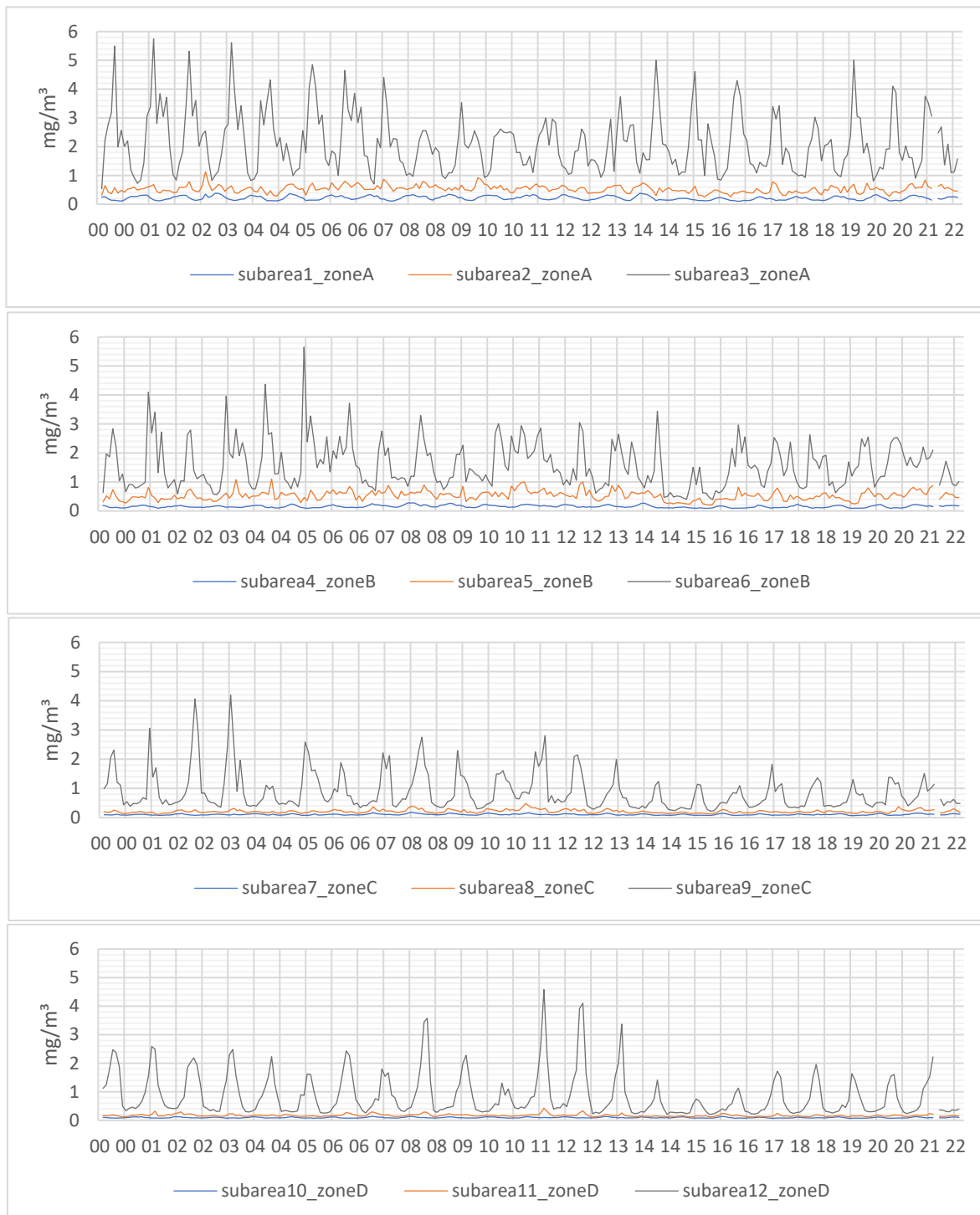


Abbildung 6: Monatliche Durchschnittswerte der Chlorophyll-a-Konzentration im Oberflächenwasser in mg/m³ zwischen Februar 2000 und Februar 2022. Die Daten von Zone A bis D sind von oben nach unten wiedergegeben (eigene Darstellung).

also keine direkte Korrelation zwischen den Parametern erkennen, deuten jedoch möglicherweise auf einen kausalen Zusammenhang hin. Die graphische Analyse der weiter nörd-

lich gelegenen Subareas in Küstennähe ist wegen der komplexeren Muster der Maximalwerte schwierig. Auffällig sind jedoch die Unterschiede zwischen den küstennahen Subareas hinsichtlich La-Niña 2010-12 und El-Niño 2015-16.

Der für Zone D vermeintlich zutreffende negative Zusammenhang zwischen dem Niño 3.4 Index und den Peaks der Chlorophyll-*a*-Konzentration ist in Zone C und B weit weniger klar zu erkennen. In Zone A scheint ein umgekehrter Zusammenhang vorzuliegen. Vor der Küste Nord-Kaliforniens sind die Peaks zur Zeit des erwähnten El-Niño-Events höher als während der vorangegangenen La-Niña-Phase.

Um zu überprüfen, ob die möglichen Zusammenhänge tatsächlich eine statistische Signifikanz aufweisen, wurde analog zur Vorgehensweise aus Kapitel 3.2 eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Abbildung 7 zeigt im oberen Bereich die Korrelationskoeffizienten zwischen dem Niño 3.4 Index und den monatlichen Durchschnittswerten der Chlorophyll-*a*-Konzentration. Diese fallen zu einem großen Teil sehr gering aus und sind zum Teil nicht statistisch signifikant. Um die saisonalen Schwankungen aus der Beobachtung ausschließen zu können, wurde für jede Datenreihe der Chlorophyll-*a*-Konzentration zusätzlich der gleitende Durchschnitt mit einer Fensterbreite von 12 berechnet. Die Korrelationskoeffizienten zwischen Niño 3.4 Index und diesen gleitenden Durchschnitten sind im unteren Teil von Abbildung 7 zu sehen. Ohne die Berücksichtigungen der saisonalen Variabilität sind alle 12 Koeffizienten bei einem Konfidenzintervall von 95% statistisch signi-

fikant. Trotz der insgesamt stärkeren Korrelation der gleitenden Durchschnitte zeigen beide Diagramme sehr ähnliche Trends. Offensichtlich korrelieren hohe positive Werte des Niño 3.4 Indexes in der überwiegenden Mehrzahl der Subareas mit niedrigen Chlorophyll-*a*-Konzentrationen. Umgekehrt formuliert kommt es im Großteil des Untersuchungsgebiets zu gesteigertem Aufkommen von Phytoplankton, wenn das Oberflächenwasser des tropischen Zentralpazifiks überdurchschnittlich kühl ist. Die Stärke des Zusammenhangs ist dabei allerdings großen Variationen unterworfen. Die stärksten Korrelationen sind nicht in den festlandnahen Subareas, sondern den weit vor der süd-kalifornischen Küste (Subareas 4 und 5) zu finden. Ein ähnliches Korrelationsmuster wie zwischen den SST-Anomalien (Abbildung 5) und Niño 3.4 Index ist nur in Zone D zu erkennen. Hier steigt der Zusammenhang zwischen Temperaturanomalie im Niño 3.4 Gebiet und Chlorophyll-*a*-Konzentration mit schwindendem Abstand zur Küste an.

Eine Ausnahme bildet Subarea 3 vor der Küste Nord-Kaliforniens. Die Korrelationskoeffizienten in Abbildung 7 zeigen hier einen positiven Zusammenhang auf.

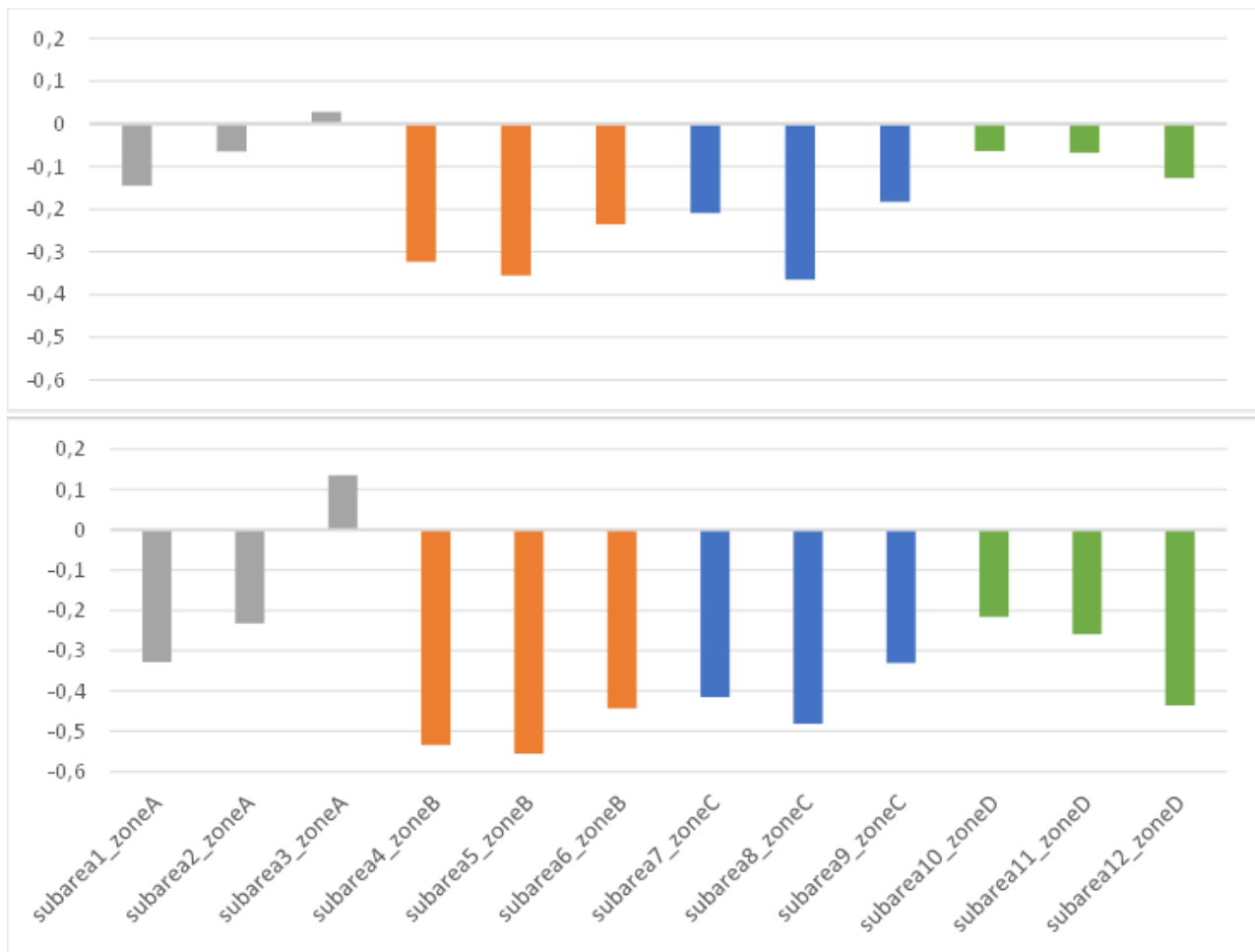


Abbildung 1: Korrelationskoeffizienten zwischen Niño 3.4 Index und Chlorophyll-*a*-Konzentration (oben) bzw. dem gleitenden Durchschnitt der Konzentration mit einer Fensterbreite von 12 (eigene Darstellung).

Demzufolge steigt das Auftreten von Phytoplankton bei überdurchschnittlich hohen Temperaturen im Zentralpazifik. Ob die Korrelationskoeffizienten in diesem Fall verlässliche Aussagen zulassen, ist jedoch fraglich. Der Wert im oberen Diagramm liegt bei 0,028 und ist statistisch nicht signifikant. Der Korrelationskoeffizient zwischen dem gleitenden Durchschnitt und dem Index hingegen liegt bei 0,135 und ist bei einem Konfidenzintervall von 95% signifikant. Bei einem p-Wert von

0,034 würde der Koeffizient einem Signifikanztest mit geringerer Irrtumswahrscheinlichkeit jedoch nicht standhalten.

Die Stärke des Zusammenhangs zwischen Chlorophyll-*a*-Konzentration und Niño 3.4 Index ist also im Untersuchungsgebiet sehr heterogen verteilt. Während insbesondere für die küstenentfernten Subareas in Zone B und C von einer negativen Korrelation auszugehen ist, sind die Analyseergebnisse anderer Bereiche kritisch zu bewerten.

4. Diskussion

Die in der Einleitung aufgeworfene Forschungsfrage 1 untersucht die mögliche direkte Verbindung zwischen dem Niño 3.4 Gebiet und dem CCS. Welchen Einfluss haben die Temperaturanomalien im tropischen Zentralpazifik – durch die sich El-Niño- und La-Niña-Events ausdrücken – auf SST und Chlorophyll-*a*-Konzentration im Untersuchungsgebiet?

Es lassen sich statistisch signifikante Korrelationen zwischen Niño 3.4 Index und beiden Parametern nachweisen. Diese sind über das Untersuchungsgebiet allerdings nicht gleichmäßig verteilt. Zudem unterscheiden sich die Muster hoher und niedriger Korrelationskoeffizienten im Fall von SST und Chlorophyll-*a*-Konzentration erheblich voneinander.

Faktoren, die die SST im Untersuchungsgebiet beeinflussen, sind sowohl das Upwelling – gesteuert durch küstenparallele Winde (Huyer 1983:259f) – als auch der Anstieg der solaren Einstrahlung mit Abnahme der geographischen Breite (Huyer 1983: 267). Die Auswirkungen dieser Prozesse sind bereits anhand der langjährigen SST-Monatsmittel auszumachen (Abbildung 3). Küstennahe Subareas, in denen das durch seewärtigen Ekman-Transport verursachte Massendefizit durch Auftrieb kühlen Tiefenwassers ausgeglichen wird, weisen die geringste SST-Werte auf. Der temperaturreduzierende Effekt des Upwellings wird dadurch ersichtlich, dass die

geringsten SST-Mittelwerte in den küstennahen Subareas stets in den Monaten der stärksten Auftriebsaktivität (März und April) auftreten (Huyer 1983: 260). Auch die strahlungsbedingte Erhöhung der SST Richtung Süden ist in Abbildung 3 zu erkennen. So scheint die hohe Sonneneinstrahlung den temperaturreduzierenden Effekt des Upwellings in den wendekreisnahen Bereichen vor Baja California Sur zunichtezumachen.

Bezüglich des Effekts von El-Niño-Ereignissen auf die SST im Untersuchungsgebiet legt die Korrelationsanalyse (Abbildung 5) nahe, dass der Zusammenhang zwischen dem Auftreten dieses Phänomens und der Temperatur des Oberflächenwassers mit Abnahme von geographischer Breite und Distanz zur Küste an Stärke zunimmt. Bezieht man nun die eben genannten Faktoren mit in die Bewertung der Ergebnisse ein, liegt die Vermutung nahe, dass El-Niño-Events die Intensität des Upwellings in den Küstenbereichen abschwächen und somit zu einer Erhöhung der SST beitragen. Ein weiterer Ansatz, um Verbindung zwischen El-Niño-Events und SST im CCS zu untersuchen, wäre die Einbeziehung von Coastal Upwelling Indices, wie dem Bakun-Index (Bakun 1973) oder dem moderneren Coastal Upwelling Transport Index (CUTI) (Jacox et al. 2018). Diese geben direkte Auskunft über die Menge von aufgetriebenen Tiefenwassers, sind jedoch mit der hier gewählten Einteilung in Subareas nicht kompatibel. Ein anderer Arbeitsan-

satz könnte unter Nutzung der Indices weitere Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen El-Niño-Events und Upwelling offenlegen.

Hinsichtlich der Chlorophyll-*a*-Konzentration sind die Ergebnisse weniger eindeutig zu interpretieren. Die hohen Konzentrationswerte in den Küstenbereichen Nord-Kaliforniens weisen auf intensives Upwelling in dieser Region hin. Dies könnte durch die große Nähe zwischen ozeanischem Hoch- und kontinentalem Tiefdruckgebiet im Sommer und die daraus resultierenden starken Winde entlang des Küstenabschnitts dieser Region erklärt werden (Huyer 1983: 260). Die Abnahme der Chlorophyll-*a*-Konzentration Richtung Süden lässt demzufolge auf Windverhältnisse schließen, die Coastal Upwelling weniger stark begünstigen. Da die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den Chlorophyll-*a*-Konzentrationen und dem Niño 3.4 Index keine eindeutigen Aussagen über den Einfluss von El-Niño-Events auf die Aktivität von Phytoplankton im Untersuchungsgebiet zulassen, soll an dieser Stelle noch ein Vergleich zu den Befunden von Kahru & Mitchell (2000) gezogen werden. In ihrer Arbeit veröffentlichten sie Daten zur Chlorophyll-*a*-Konzentration von März 1997, 1998 und 1999. Dabei wurde das Konzentrationsspektrum in die Klassen oligotroph ($< 0,2 \text{ mg/m}^3$), mesotroph ($0,2 \text{ bis } 1 \text{ mg/m}^3$) und eutroph ($> 1 \text{ mg/m}^3$) unterteilt (Kahru & Mitchell 2000: 2937). Im Rahmen der Studie konnte festgestellt werden, dass die

Ausbreitung eutrophen Wassers während des El-Niño-Events in allen Subareas abnahm. Vor Baja California hingegen kam es zu einer intensiven Ausdehnung von Flächen mesotrophen Charakters.

Abbildung 8 zeigt die durchschnittlichen Chlorophyll-*a*-Konzentrationen während der Peak-Saison im Frühling (März bis Juni) in den Jahren 2014 bis 2017, also vor, während und nach dem El-Niño-Event 2015-16. Der von Kahru & Mitchell (2000: 2938) beobachtete Rückgang eutropher Gewässer kann auch im Zuge des El-Niño-Events für das Jahr 2015 festgestellt werden. Die vor allem in relativer Küstennähe vorkommenden gelben und roten Flächen sind in diesem Jahr – insbesondere im Vergleich zum Jahr 2017 mit neutralem Niño 3.4 Index – in wesentlich geringerem Maß vertreten. Ausgenommen hiervon ist Subarea 3 vor der Küste Nord-Kaliforniens. Hier scheint die Ausdehnung stark eutropher Gewässer während des El-Niño-Events vergrößert zu sein. Der in Frage gestellte positive Zusammenhang zwischen Niño 3.4 Index und Chlorophyll-*a*-Konzentration in Subarea 3 wird also zumindest in den hier präsentierten Daten bestätigt.

Die von Kahru & Mitchell (2000) für März 1998 beschriebene Ausdehnung mesotropher Bereiche vor Baja California Sur kann auch für das Jahr 2016 beobachtet werden. Wie Abbildung 8 zeigt, ist für die Subareas 10 und 11 ein erhöhtes Vorkommen mesotropher Gewässer festzustellen, auch wenn dieses nicht die Intensität von 1998

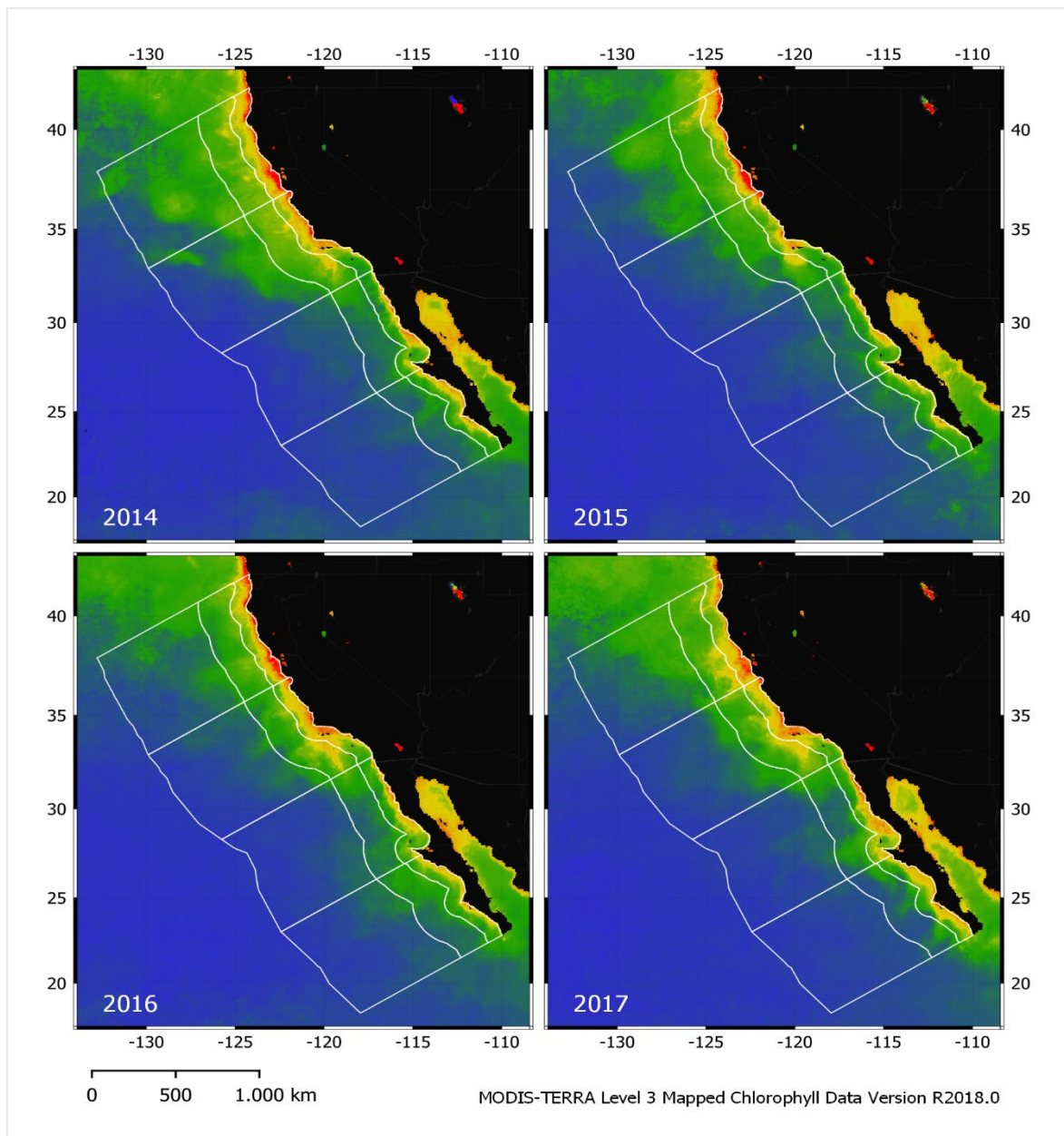


Abbildung 8: Durchschnittliche Chlorophyll-*a*-Konzentrationen der Monate März bis Juni. Die Farbgebung orientiert sich an der Trophie des Wassers: blau = oligotroph ($< 0,2 \text{ mg/m}^3$), grün = mesotroph ($0,2 \text{ bis } 1 \text{ mg/m}^3$), gelb = eutroph ($1 \text{ bis } 10 \text{ mg/m}^3$), rot = stark eutroph ($> 10 \text{ mg/m}^3$) (eigene Darstellung).

erreicht (Kahru & Mitchell 2000: 2937). Als Grund für den Anstieg der Chlorophyll-*a*-Konzentration in diesem Bereich wurde mit Hinblick auf das El-Niño-Event 1997-98 der erhöhte Nährstoffeintrag durch Advektion von Norden infolge einer Umlenkung des California Currents diskutiert, welcher im küstenfernen Bereich vor Baja California Sur zu erhöhter Produktion von Phytoplankton führte

(Espinosa-Carreón et al. 2004: 18). Ob diese Erklärung auch auf El-Niño 2015-16 zutrifft, kann an dieser Stelle nicht abschließend festgestellt werden, unter anderem weil das Event aufgrund des Zusammenfallens mit einer mehrjährigen marinen Hitzewelle im gesamten Nordost-Pazifik (Di Lorenzo & Mantua 2016: 1042) unter anderen Ausgangsbedingungen stattfand als 1997-98 (McClatchie 2016: 8).

Noch einmal Bezug nehmend auf die Korrelationsanalyse zwischen Niño 3.4 Index und Chlorophyll-*a*-Konzentration lässt sich festhalten, dass der Index keine verlässlichen Aussagen zur Phytoplanktonaktivität im Untersuchungsgebiet zulässt. Dieser scheint also keinen akkuraten Proxy darzustellen. Vielmehr ist die Höhe der Chlorophyll-*a*-Konzentration abhängig von der Nährstoffmenge, die im Oberflächenwasser verfügbar ist (McClatchie 2016: 13). Im CCS ist diese stark an die Intensität des Upwellings gebunden. Daher ist auch bei Untersuchungen zur Chlorophyll-*a*-Konzentration die Nutzung von Upwelling Indices sinnvoll. Zusätzlich zum Bakun-Index (Bakun 1973) und dem CUTI könnte hier auch der Biologically Effective Upwelling Transport Index (BEUTI) (Jacox et al. 2018) von besonderem Interesse sein. Der Einsatz der Indices könnte auch eine detaillierte Erfassung regionaler Besonderheiten, wie die geringen Konzentrationswerte in der Southern California Bight nahe der Grenze zu Mexiko, ermöglichen. Das lokale Minimum kommt an dieser Stelle dadurch zustande, dass die äquatorwärtigen Winde nicht dem Verlauf der Küste folgen und das Upwelling vor Ort demnach reduziert ist (McClatchie 2016: 16). Auch mit der Einteilung des Untersuchungsgebiets in 12 Subareas konnte ein regionales Phänomen wie dieses nicht abgebildet werden, sodass eine zusätzliche Einbeziehung der Upwelling Indices bei weiteren Untersuchungen sinnvoll erscheint.

5. Schlussfolgerungen

Auf Basis der MODIS Terra Daten zu SST und Chlorophyll-*a*-Konzentration sowie den mithilfe der *Google Earth Engine* gewonnenen monatlichen Durchschnittswerten konnten die Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von El-Niño-Events und den zwei untersuchten Parametern näher beleuchtet werden. Um zuletzt noch einmal die eingangs formulierten Forschungsfragen aufzugreifen, lassen sich folgende Punkte festhalten:

- Es bestehen im Untersuchungsgebiet statistisch signifikante positive Korrelationen zwischen der SST und dem Niño 3.4 Index, der hier als Maßzahl für das Auftreten von El-Niño-Events herangezogen wird. Die Stärke des Zusammenhangs ist jedoch nicht gleichmäßig verteilt. Vielmehr ist ein Anstieg der Korrelation in Richtung Küste und Süden zu verzeichnen. Auf Basis dieser Ergebnisse ist davon auszugehen, dass El-Niño-Events, die durch stärkeres Upwelling geprägten küstennahen Gewässer stärker beeinflussen als Bereiche des CCS, die weiter vom Kontinent entfernt liegen. Die höchste Korrelation ist demnach für den Bereich vor der Küste von Baja California Sur zu verzeichnen. Die zum Teil geringe Höhe der Korrelationskoeffizienten legt jedoch nahe, dass neben der Temperaturanomalie des Zentralpazifiks auch andere Faktoren Einfluss auf die SST des CCS nehmen.
- Auch hinsichtlich der Chlorophyll-*a*-Konzentration lassen sich Zusammenhänge mit

dem Auftreten von El-Niño-Events ausmachen. Die ermittelten Korrelationen weisen jedoch kein räumliches Muster auf und sind zum Teil von sehr geringer Stärke. Größere Werte liegen hier nur für Bereiche vor, die nicht unmittelbar an die Küste angrenzen und somit nicht als Gebiete der stärksten Upwelling-Intensität bekannt sind. Für genauere Untersuchungen des Effekts von El-Niño-Events auf die Chlorophyll-*a*-Konzentration in den Upwelling gebieten sollte die Datenbasis daher beispielsweise durch einen geeigneten Upwelling-Index ergänzt werden.

- Bezüglich des Vergleichs der El-Niño-Events 1997-98 und 2015-16 lassen sich große Überschneidungen finden. Insbesondere eine starke Abnahme eutropher Bereiche in Küstennähe ist für beide Fälle

festzustellen. Eine Ausnahme bildet der Küstenabschnitt von Nord-Kalifornien, für den der zuvor ermittelte leicht positive Zusammenhang zwischen Niño 3.4 Index und Chlorophyll-*a*-Konzentration zumindest für das beobachtete Event bestätigt werden kann. Auch die Ausdehnung mesotropher Gewässer vor Baja California kann – wenn auch in unterschiedlichem Maße – an beiden Events nachgewiesen werden. Nicht ersichtlich wird im hier durchgeführten Vergleich der Einfluss der marinen Hitzewelle.

Insgesamt stellt die *Google Earth Engine* für die Untersuchung des CCS ein sehr nützliches Tool dar. Um verlässlichere Ergebnisse zu erzielen, sollten allerdings zusätzliche Datenquellen wie die Upwelling-Indices hinzugezogen werden.

Literaturverzeichnis

- Bakun, A. (1973): Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-71.
- Bakun, A., Black, B. A., Bograd, S. J., García-Reyes, M., Miller, A. J., Rykaczewski, R. R., & Sydeman, W. J. (2015): Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. *Current Climate Change Reports*, 1, 85-93.
- Di Lorenzo, E., & Mantua, N. (2016): Multi-year persistence of the 2014/15 North Pacific marine heatwave. *Nature Climate Change*, 6(11), 1042-1047.
- Espinosa-Carreón, T. L., Strub, P. T., Beier, E., Ocampo-Torres, F., & Gaxiola-Castro, G. (2004): Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C3).
- García-Reyes, M., Sydeman, W. J., Black, B. A., Rykaczewski, R. R., Schoeman, D. S., Thompson, S. A., & Bograd, S. J. (2013): Relative influence of oceanic and terrestrial pressure systems in driving upwelling-favorable winds. *Geophysical Research Letters*, 40(19), 5311-5315.
- Hickey, B. M., & Banas, N. S. (2008): Why is the northern end of the California Current System so productive? *Oceanography*, 21(4), 90-107.
- Huyer, A. (1983): Coastal upwelling in the California Current system. *Progress in oceanography*, 12(3), 259-284.
- Jacox, M. G., Hazen, E. L., Zaba, K. D., Rudnick, D. L., Edwards, C. A., Moore, A. M., & Bograd, S. J. (2016): Impacts of the 2015–2016 El Niño on the California Current System: Early assessment and comparison to past events. *Geophysical Research Letters*, 43(13), 7072-7080.
- Jacox, M. G., Edwards, C. A., Hazen, E. L., & Bograd, S. J. (2018): Coastal upwelling revisited: Ekman, Bakun, and improved upwelling indices for the US West Coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(10), 7332-7350.
- JPL/OBPG/RSMAS (2020): MODIS Terra L2P swath SST data set. Ver. 2019.0. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2023-06-26] at <https://doi.org/10.5067/GHMDT-2PJ19>
- Kahru, M., & Mitchell, B. G. (2000): Influence of the 1997–98 El Niño on the surface chlorophyll in the California Current. *Geophysical research letters*, 27(18), 2937-2940.

McClatchie, S. (2016): State of the California Current 2015–16: comparisons with the 1997–98 El Niño. California cooperative oceanic fisheries investigations. Data report, 57.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Chlorophyll Data; 2022 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: 10.5067/TERRA/MODIS/L3M/CHL/2022.

Accessed on 06/26/2023

NOAA Physical Sciences Laboratory (2023): Niño 3.4 Anomaly Data. <https://psl.noaa.gov/data/correlation/Niña34.anom.data>, 2023-06-26.

Schwing, F. B., O'Farrell, M., Steger, J., Baltz, K. (1996): Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-1995. Trenberth, K. E. (1997). The definition of el Niño. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(12), 2771-2778.

Trenberth, K. E. (1996): El Niño southern oscillation (ENSO). Sea.

Trenberth, K. E. (1997): The definition of el Niño. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(12), 2771-2778.

Richter, E. (2024): Effekt von El-Niño-Events auf Sea Surface Temperature und Chlorophyll-Gehalt im California Current System. In Stauch, G. (Hrsg.): Angewandte Fernerkundung mit der Google Earth Engine. S. 99 – 119. DOI: 10.18154/RWTH-2024-03417
