KELPDETEKTION MIT OPTISCHEN SATELLITENDATEN – EINE ANWENDUNGSROUTINE UNTER VERWENDUNG DES TIEFBLAUEN KANALS DER PLATTFORM LANDSAT 8

M. König[1], Kiel, DE; F. Uhl[1], Kiel, DE; N. Oppelt[1], Kiel, DE
[1]Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Zusammenfassung

Marine Makrophyten sind wichtige Primärproduzenten in aquatischen Systemen und von hoher ökologischer sowie ökonomischer Bedeutung. Kelpwälder des Riesentangs (*Macrocystis pyrifera*) sind äußerst produktive und dynamische Ökosysteme, die schnell auf veränderte Umwelteinflüsse reagieren. Riesentang ist daher ein geeigneter Indikator um den ökologischen Zustand küstennaher Gewässer zu erfassen. In-situ Beobachtungen sind jedoch räumlich und zeitlich limitiert, da sie mit hohem zeitlichem, arbeitstechnischem und monetärem Aufwand verbunden sind. Im Gegensatz dazu bieten Fernerkundungsmethoden den Vorteil, dass sie über längere Zeiträume großräumige Beobachtungen in kurzen Zeitabständen ermöglichen. Sie sind deshalb eine Möglichkeit die hohe räumliche und zeitliche Dynamik sublitoraler Habitate abzubilden.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde untersucht, ob mit dem Operational Land Imager (OLI) auf der Plattform Landsat 8 Verbesserungen bei der Detektion von Kelpwäldern erzielt werden können. Zu diesem Zweck wurde eine Zeitreihe atmosphärisch korrigierter Landsat 8-Szenen (2013-2015) der Region Südkalifornien analysiert.

Satellitengestützte multispektrale Fernerkundungssensoren (z.B. Landsat 5 TM) wurden bereits erfolgreich im Rahmen mehrerer Studien zur Identifikation von Kelpwäldern verwendet. Im Vergleich zu seinen Vorgängern verfügt Landsat 8 mit dem Operational Land Imager (OLI) über einen multispektralen Sensor mit einer höheren radiometrischen Auflösung und zwei neuen Kanälen. Für die Beobachtung von Küstengewässern ist vor allem der tiefblaue Kanal (0.43 - 0.45 µm) von besonderem Interesse. Bisherige Analysen nutzten vor allem die charakteristische Reflexion des oberflächennahen Riesentangs im nahen Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums zur Identifikation. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Wasser dringt elektromagnetische Strahlung in diesem Wellenlängenbereich jedoch kaum in die Wassersäule ein. Daher wird submerser Riesentang bei der Verwendung dieses Spektralbereiches nicht in seiner vollständigen Ausdehnung detektiert. Die höhere Eindringtiefe der Strahlung im tiefblauen Kanal ermöglicht es, abhängig von der Trübung des Wassers, auch aus größerer Tiefe spektrale Informationen zu gewinnen.

Da Riesentang bis in eine Tiefe von ca. 30 m vorkommt, umfasste die Vorprozessierung der Landsat 8-Szenen die räumliche Reduzierung der Daten auf relevante Bildausschnitte anhand bathymetrischer Karten. Auf Basis von in-situ Kartierungen und Luftbildinterpretation (Google Earth) wurden bekannte Kelpwaldvorkommen auf ihr Reflexionsverhalten in verschiedenen Kanälen hin untersucht. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zeigte die visuelle Interpretation, dass der tiefblaue Kanal Tangvorkommen in größerer Tiefe erfassen kann. Unter Einbeziehung dieses Kanals wurde der Triangular Kelp Identification Index (TRIKII) entwickelt, welcher auch in größerer Wassertiefe die Detektion von Riesentang ermöglicht. Im Vergleich zu einer NDVI-Analyse wurde die Fläche der Kelpwälder deutlich realistischer erfasst.

1. EINLEITUNG

Riesentang (*Macrocystis pyrifera*, engl. giant kelp, im Folgenden Kelp) ist der größte Vertreter der Algen und bildet vor der Küste Südkaliforniens in Wassertiefen bis ca. 30 Meter so genannte Kelpwälder [1]. Kelpwälder sind außerordentlich produktive Ökosysteme. Sie sind nicht nur Nahrungsquelle sondern auch dreidimensionaler Lebensraum für viele Arten von Weichtieren, Fischen und Säugetieren [2] und außerdem von wirtschaftlicher Bedeutung für Fischerei, Tourismus sowie Kosmetik- und Nahrungsmittelindustrie [3]. Riesentang ist mit Wachstumsraten von bis zu 60 cm pro Tag und einer kurzen Lebensdauer äußerst dynamisch, weshalb er schnell auf veränderte Umwelteinflüsse reagiert [1]. Gleichzeitig sind Kelpwaldgesellschaften von einer Reihe von biotischen und abiotischen Umweltfaktoren wie der Verfügbarkeit von Nährstoffen und Licht, mechanischen Einflüssen von Wind und Wellen, Beweidung und Konkurrenzdruck [1] beeinflusst. Die Einflüsse menschlichen Handels wirken sich zum Teil negativ auf Kelpwälder aus [4] und mögliche Auswirkungen des Klimawandels sind noch weitgehend unerforscht [5]. Aufgrund ihrer ökologischen wie ökonomischen Relevanz und dem hohen Stellenwert als Indikator für potenzielle Umweltbelastungen, sind Überwachung, Schutz und Management von Kelpwäldern von hohem Interesse [6]. In-situ Kartierungen z.B. mit Hilfe von Tauchtransekten sind zeit-, arbeits- und kostenintensiv und bezüglich ihrer Durchführung stark von Schiffbarkeit und Zugänglichkeit des zu betrachtenden Gewässers beeinflusst, weshalb die zeitliche und räumliche Auflösung dieser Methoden sehr beschränkt ist [2]. Fernerkundungsmethoden wurden bereits in vergangenen Studien als geeignete Verfahren für die Detektion und Kartierung von Kelpwäldern identifiziert (u.a. [1], [2], [7], [8], [9], [10]) da sie eine vergleichsweise hohe zeitliche und räumliche Auflösung bieten.

Bezüglich *Macrocystis pyrifera* wurde besonders der Einsatz des Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) als eine Möglichkeit zur Detektion von Kelpwäldern identifiziert. Riesentang bildet Schwimmkörper aus, die große Bereiche der Wasseroberfläche bedecken können und sich bezüglich ihrer Reflexion im nahen Infrarot (NIR) ähnlich wie photosynthetisch aktive terrestrische Vegetation verhalten. Hierzu bildet das umgebende Wasser einen deutlichen Kontrast, weshalb emerse Vorkommen von *Macrocystis pyrifera* mit Hilfe des NDVI gut detektierbar sind [2].
Aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Wasser wird einfallende elektromagnetische Strahlung im Bereich des NIR in den ersten Zentimetern der Wassersäule fast vollständig absorbiert [11]. Eine Detektion von submersen Kelpvorkommen ist deshalb mit Hilfe des NDVI praktisch nicht möglich.
Wind, Wellen und andere Ereignisse können dazu führen, dass oberflächennahen Pflanzenteile mechanisch abgetrennt werden, ohne dass die gesamte Pflanze abstirbt. Würde eine NDVI Analyse nach solch einem Ereignis durchgeführt werden, würde das Ergebnis falsche Rückschlüsse zulassen, da intakte submerse Kelpvorkommen nicht detektiert werden könnten.
Landsat 8 bietet mit dem Operational Land Imager (OLI) Sensor eine verbesserte radiometrische Auflösung gegenüber seinen Vorgängern sowie einen zusätzlichen Messkanal im tiefblauen Bereich des elektromagnetischen Spektrums (0,43 – 0,45 µm), der speziell für die Erkundung von Küstengewässern entwickelt worden ist [12], da elektromagnetische Strahlung in diesem Wellenlängenbereich besonders tief in die Wassersäule eindringen kann [11]. Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung eines Index, der den tiefblauen Kanal des OLI nutzt, um auch submerse Kelpbereiche mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden zu detektieren.

2. METHODIK

Der Einsatz von Fernerkundungsmethoden erfordert die Verifizierung der Messwerte mit Hilfe von am Boden gemessenen Referenzwerten (Ground Truth Daten), um die Interpretierbarkeit der Satellitendaten zu gewährleisten. Da in diesem Fall jedoch keine in-situ Messwerte vorhanden waren, wurden Bilddaten des Anbieters Google Earth herangezogen um submerse und oberflächennahe Kelpbereiche zu identifizieren, da deren hohe räumliche Auflösung unter bestimmten Umweltbedingungen die manuelle Identifikation von Kelpbereichen anhand von Farbe und Struktur ermöglicht. Zeitliche, radiometrische und spektrale Auflösung sowie räumliche Abdeckung der Daten lassen eine automatisierte Zeitreihenanalyse bisweilen jedoch nicht zu. Weiterhin wurde deshalb eine manuelle Zeitreihenanalyse der Google Earth Daten genutzt um Verbreitungsmuster und Areale zu identifizieren in denen das Vorhandensein von Kelp potenziell möglich ist. Bei diesem Vorgehen ist zu beachten, dass aufgrund der außerordentlichen Dynamik des Kelps die zeitliche Differenz zwischen Ground Truth Daten und Satellitendaten minimal sein sollte [13].
Als Untersuchungsgebiet A wurde ein Kelpwald vor der Küste von Isla Vista in Südkalifornien (USA) gewählt, da für dieses Gebiet eine besonders lange Zeitreihe von Google Earth Daten vorhanden ist, deren Untersuchung zu dem Ergebnis kam, dass der dort vorkommende Kelpwald eine inhärente räumliche Dynamik aufweist und gleichzeitig persistent ist. Bereits in anderen Studien

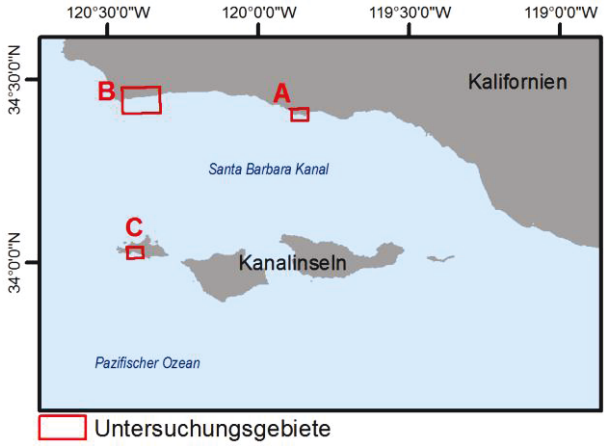

BILD 1. Geographische Position der Untersuchungsgebiete in Südkalifornien

wurde das betreffende Areal als Unter suchungsgebiet ausgewählt [2]. Es wurden deshalb Landsat 8 Szenen gewählt zu denen zeitnahe Google Earth Aufnahmen des Gebietes existieren. Drei Landsat 8 Szenen (14.12.2013, 24.06.2014, 02.01.2015) erfüllten dieses Kriterium und wurden deshalb für diese Studie genutzt. Die maximale Differenz zwischen Google Earth und Landsat 8 Daten beträgt vier Tage. Historische Wetterdaten ([14], [15]) wurden herangezogen um einen möglichen Einfluss destruktiver Umweltfaktoren im Zeitraum zwischen den Datenerhebungen auszuschließen. Die gesamte Kelpwaldfläche inklusive der submersen Bereiche wurde manuell digitalisiert und im Folgenden als Referenzfläche für einen Vergleich der Klassifikationsergebnisse von NDVI und TRIKII genutzt. Als Untersuchungsgebiet B wurden Kelpwälder östlich der Cojo Bay vor der Küste von Concepcion bestimmt, da dort ebenfalls mit Hilfe einer Zeitreihenuntersuchung von Landsat Szenen deren Persistenz festgestellt werden konnten. Der Kelpwald „Miracle Mile“ vor der Südküste der Kanalinsel San Miguel wurde als Untersuchungsgebiet C ausgewählt, da dieser in vergangenen Kartierungen (u.a. [16], [17], [18]) als dynamisch aber ebenfalls persistent identifiziert werden konnte. Für die Untersuchungsgebiet B und C waren keine Google Earth Daten verfügbar, die für eine Validierung hätten genutzt werden können.
Verschiedene Effekte beeinflussen elektromagnetische Strahlung während sie die Atmosphäre passiert und verändern die Menge der vom Sensor gemessenen Energie. Chavez Jr. [19] benennt Absorption, Reflexion und vor allem Streuung als dominante Faktoren innerhalb der Atmosphäre. Diese Effekte sind abhängig von der Wellenlänge der Strahlung und treten vor allem im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums auf [19]. Um eine präzise Interpretation der Satellitendaten zu ermöglichen, ist es deshalb notwendig den Einfluss der Atmosphäre auf die elektromagnetische Strahlung zu korrigieren.
Der United States Geological Service (USGS) [20] stellt bereits atmosphärisch korrigierte Landsatdaten (Einheit [%]) zur Verfügung, jedoch liefert diese Korrektur aktuell nur über terrestrischen Arealen gute Ergebnisse, da der Einfluss von Aerosolen in Küstenbereichen und über marinen Flächen bisweilen nicht berücksichtigt wurde [21]. Da die angewandte Atmosphärenkorrektur insgesamt jedoch als qualitativ hochwertig eingestuft wird, wurden

die atmosphärisch korrigierten Landsat Szenen für die Korrektur der nicht atmosphärisch korrigierten Szenen herangezogen. Innerhalb jeder Szene wurden insgesamt zwölf Ziele ausgewählt anhand derer eine lineare Regression für jeden Kanal durchgeführt wurde. Die Gleichung der entsprechenden Geraden wurde anschließend auf die jeweiligen Kanäle der entsprechenden nicht korrigierten Szene angewendet. Anschließend wurden die spektralen Eigenschaften von mit Hilfe des NDVI identifizierten Kelpbereichen mit denen von offenem Wasser verglichen, dabei wurde der Fokus vor allem auf den Spektralbereich des tiefblauen Kanals und des VIS (sichtbares Licht) gerichtet. Die Analyse ergab, dass Kelp in den ersten drei Kanälen stets ähnlich hohe Reflexionswerte aufweist, während offenes Wasser durch verschieden hohe Reflexionswerte gekennzeichnet ist, deren Maximum meistens im blauen Kanal liegt.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Triangular Kelp Identification Index (TRIKII) zur Detektion von aufschwimmenden und submersen Kelpbereichen beruht deshalb auf dem Quadrat der Dreiecksfläche deren Eckpunkte von den Messwerten der ersten drei Kanäle des OLI Sensors in der euklidischen Ebene gebildet werden:

(1) $$TRIKII = ((|(0{,}48 - 0{,}44)(GR - DB) - (0{,}56 - 0{,}44)(BL - DB)|)/2)^2$$

Wobei GR für den jeweiligen Pixelwert des grünen Kanals, BL für den Pixelwert des blauen Kanals und DB für den Pixelwert des tiefblauen Kanals des OLI Sensors steht. Es wird angenommen, dass submerse wie aufschwimmende Kelpvorkommen dabei verhältnismäßig niedrigere Werte annehmen als offene Wasserbereiche.

Gewässerbereiche mit einer Tiefe von mehr als 30 Metern und terrestrische Bereiche wurden mit Hilfe bathymetrischer Daten [22] maskiert. In allen Szenen wurden außerdem vorkommende Wolken maskiert. Anschließend wurden NDVI und TRIKII auf die verbleibenden Pixel angewendet und die als Kelp detektierten Flächen miteinander sowie mit den in Google Earth identifizierten Arealen verglichen. Für die Klassifikation wurden für den NDVI (gesamter Wertebereich $-1 < 0 < 1$) Werte zwischen 0 und 1 und für den TRIKII (gesamter Wertebereich $0 < \infty$) Werte zwischen 0 und 2 als Kelp definiert. Die Qualität der Detektion wird mit Hilfe einer Auszählung der vom jeweiligen Index als Kelp klassifizierten Pixel innerhalb der Referenzpolygone im Untersuchungsgebiet A sowie einer optischen Beurteilung der Flächen in allen drei Untersuchungsgebieten (A, B, C) sowie in jeder Szene als Ganzes ermittelt.

3. ERGEBNISSE

TAB 1 zeigt deutlich, dass der TRIKII im Vergleich zum NDVI eine deutlich größere Fläche, sowohl innerhalb der Referenzpolygone als auch in jeder Landsat Szene als Ganzes als Kelp klassifiziert hat. Die visualisierten Ergebnisse sind BILD 2 bis BILD 4 zu entnehmen.

Angewendet auf die Landsat Szene vom 14.12.2013 führen die beiden Indizes zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Zwar ist die Anzahl der als Kelp klassifizierten Pixel innerhalb des Referenzpolygons beim TRIKII größer als beim NDVI, jedoch ist in BILD 2 deutlich zu erkennen, dass die Struktur des Kelpwaldes im Untersuchungsgebiet A nur angedeutet und keine Differenzierung zwischen Kelpflächen und angrenzenden Oberflächen möglich ist. Für das Untersuchungsgebiet B lässt sich ein ähnliches Ergebnis feststellen (BILD 3). Zwar identifizierten NDVI und TRIKII zum Teil dieselben Flächen als Kelp, jedoch lassen die Ergebnisse des NDVI eine klare Differenzierung von Kelpflächen zu, während die Ergebnisse des TRIKII die Struktur der Kelpwälder zwar andeuten, eine genauere Differenzierung jedoch nicht zulassen, da auch an dieser Stelle Pixel, die vermutlich andere Oberflächen repräsentieren, als Kelpflächen klassifiziert wurden. Dies gilt ebenfalls für das Untersuchungsgebiet C (BILD 4). Eine globale Betrachtung der Ergebnisse zeigt deutlich, dass vom TRIKII innerhalb der gesamten Szene ein Großteil der Meeresfläche als Kelp klassifiziert wird.

Die Anwendung der beiden Indizes auf die Landsat Szene vom 24.06.2014 führt zu anderen Ergebnissen. Auch in diesem Fall ist die Anzahl der vom TRIKII als Kelp klassifizierten Pixel innerhalb der Referenzpolygone größer als die des NDVI. Das visualisierte Ergebnis (BILD 2) zeigt, dass innerhalb des Referenzpolygons der TRIKII auch solche Areale als Kelp klassifiziert hat, die der NDVI nicht erkannt hat. Dabei beschreiben die als Kelp klassifizierten Pixel annähernd die Form des Polygons. Im Untersuchungsgebiet A wurden außerdem landwärts des Referenzpolygons große Flächen als Kelp klassifiziert. Einige wenige Pixel wurden außerdem in Bereichen seewärts des Referenzpolygons als Kelp klassifiziert. Es ist zweifelhaft, ob es sich bei diesen tatsächlich um Kelp handelt, jedoch ist die Anzahl dieser Pixel sehr gering im Vergleich zur Szene vom 14.12.2013. Für das Untersuchungsgebiet B ist das Ergebnis ähnlich (BILD 3). Die vom TRIKII als Kelp klassifizierte Fläche ist um ein vielfaches größer als die vom NDVI klassifizierte Fläche. Ein Vergleich der NDVI Ergebnisse der drei Szenen lässt den Schluss zu, dass in dieser Szene der TRIKII Kelpwälder in ihrer Gesamtheit d.h. auch submerse Kelpbereiche erfasst. In diesem Untersuchungsgebiet ist ebenfalls festzustellen, dass in direkter Küstennähe größere Flächen als Kelp klassifiziert wurden, die vom NDVI ebenfalls nicht als solche identifiziert wurden. Seewärts wurden auch in diesem Fall vom TRIKII Pixel vereinzelt als Kelp identifiziert.

	Anzahl der als Kelp klassifizierten Pixel			
	NDVI		TRIKII	
Datum der Landsat Szene	Gesamte Szene	Referenzpolygon	Gesamte Szene	Referenzpolygon
14.12.2013	58273	1205	922677	1373
24.06.2014	16372	487	69413	1109
02.01.2015	29162	835	106201	955

TAB 1. Anzahl der von den Indizes als Kelp klassifizierten Pixel in den Referenzpolygonen und den Szenen als Ganzes

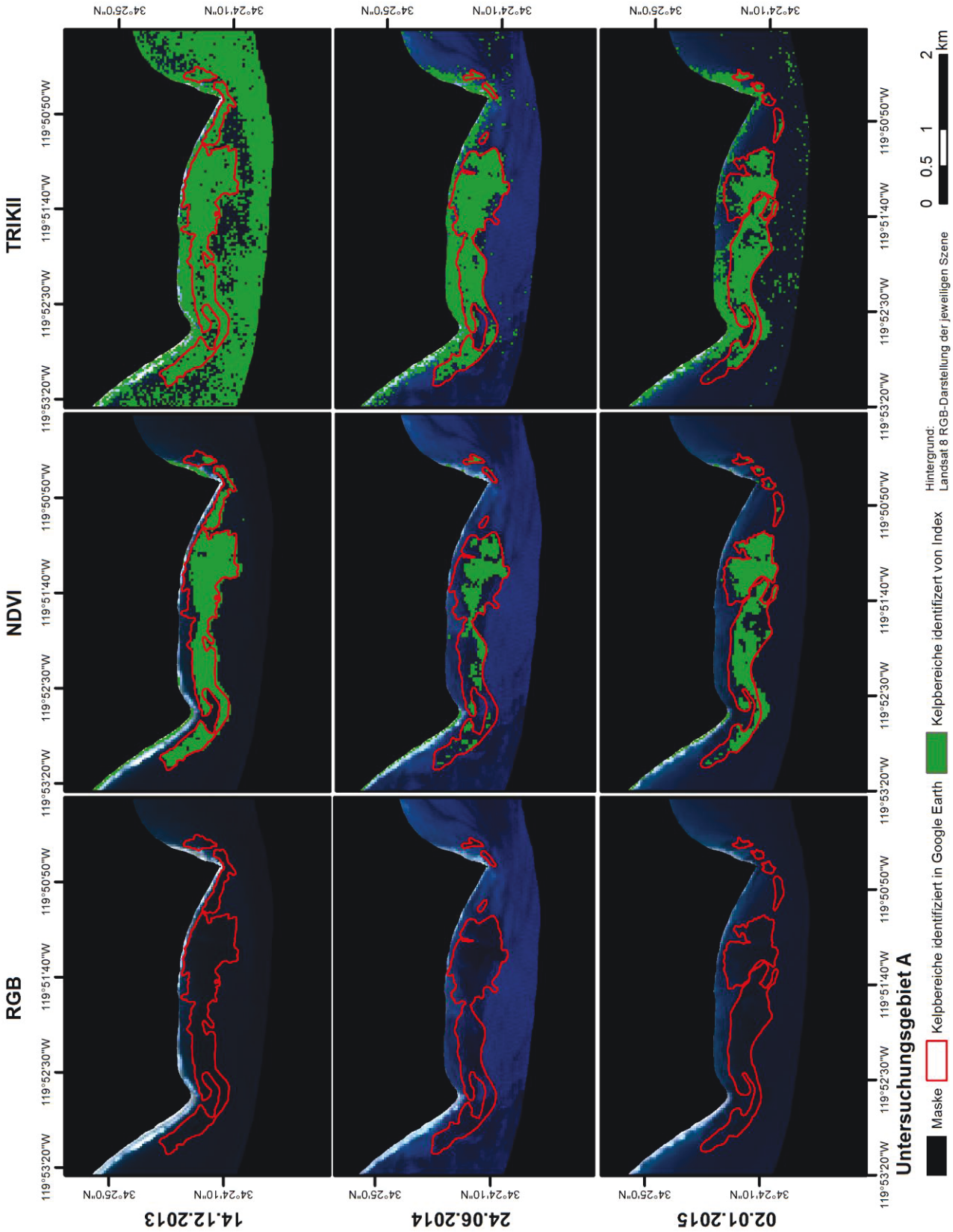

BILD 2. Vergleich von Referenzpolygonen mit NDVI und TRIKII Klassifikationen im Untersuchungsgebiet A.

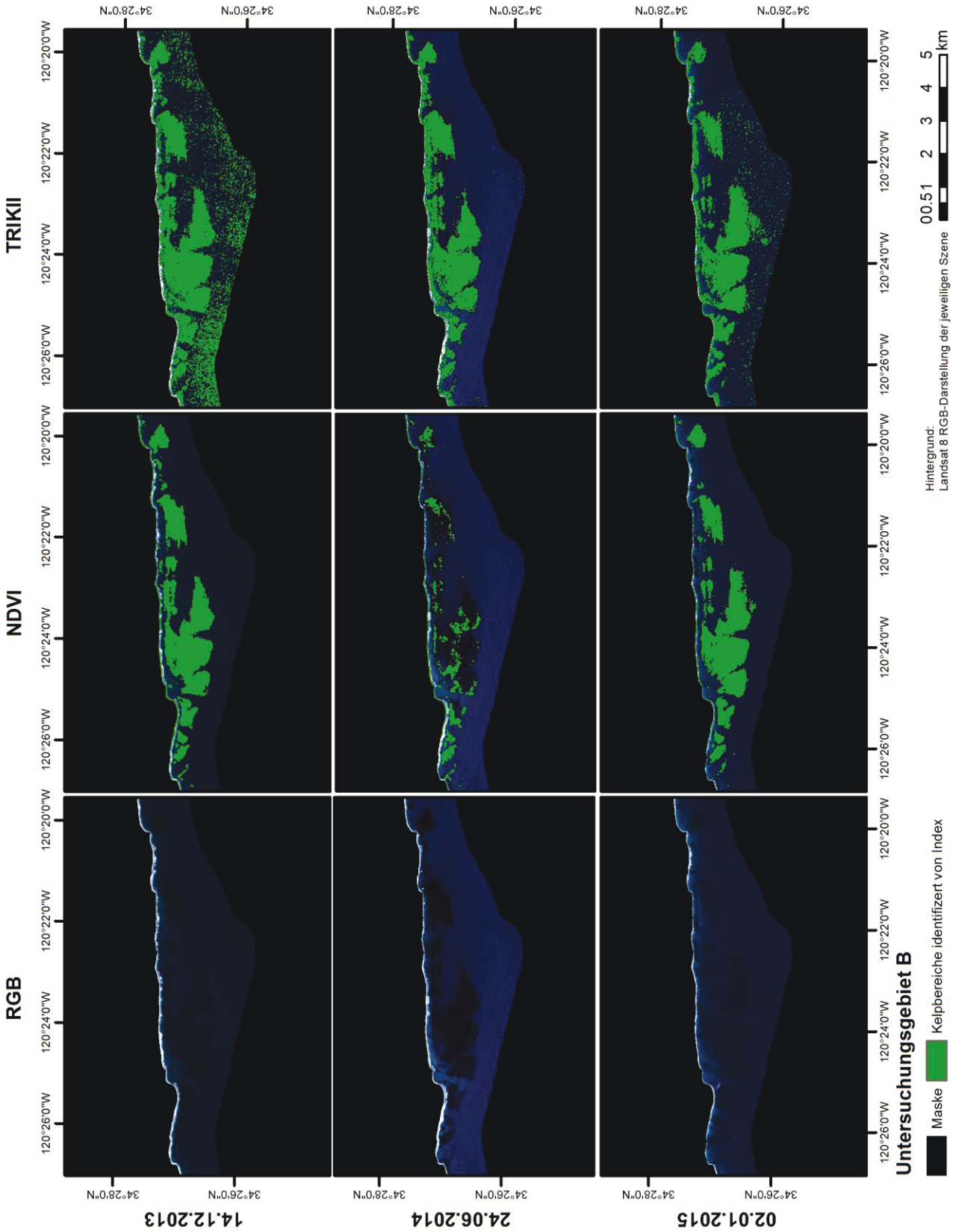

BILD 3. Vergleich von NDVI und TRIKII Klassifikationen im Untersuchungsgebiet B.

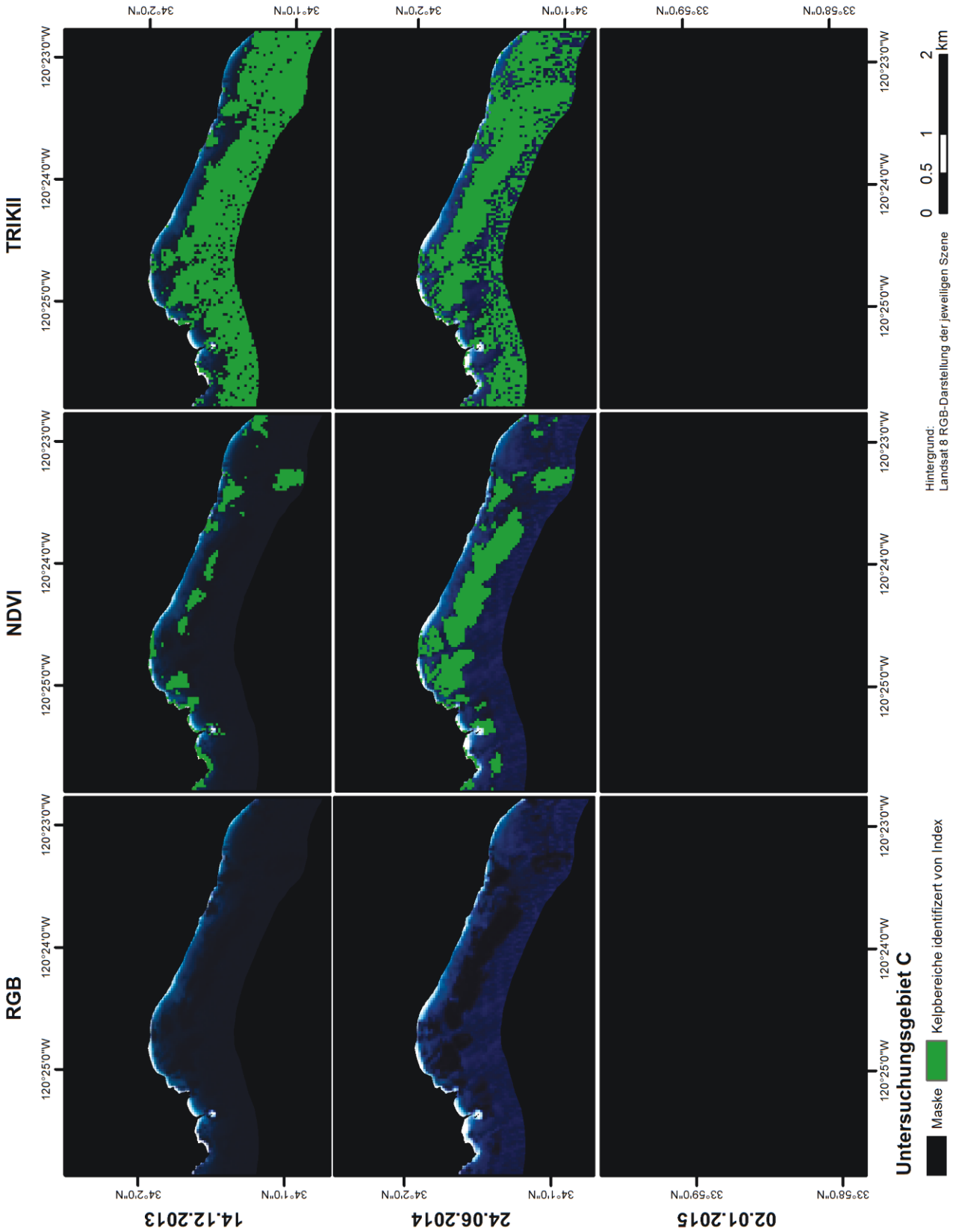

BILD 4. Vergleich von NDVI und TRIKII Klassifikationen im Untersuchungsgebiet C.

Die Ergebnisse im Untersuchungsgebiet C unterscheiden sich von denen in den anderen Untersuchungsgebieten (BILD 4). Zwar identifiziert der TRIKII größtenteils dieselben Bereiche, die auch vom NDVI als Kelp identifiziert wurden, jedoch wurden vor allem seewärts viele Bereiche vom TRIKII als Kelp klassifiziert, in denen das Vorkommen von Kelp fragwürdig ist. Eine globale Betrachtung der TRIKII Ergebnisse zeigt, dass vor allem Wellen fälschlicherweise als Kelp klassifiziert werden.
Aufgrund von Bewölkung können in der Landsatszene vom 02.01.2015 nur das Untersuchungsgebiet A sowie das Untersuchungsgebiet B genutzt werden. Auch in diesem Fall ist die innerhalb des Referenzpolygons als Kelp klassifiziert Fläche beim TRIKII größer als beim NDVI, dabei bestätigt ein optischer Vergleich, dass einige Bereiche besser durch den TRIKII erfasst werden können (BILD 2). Auch in dieser Szene ist festzustellen, dass der TRIKII seewärts vereinzelte Bereiche als Kelp identifiziert, bei denen es unwahrscheinlich erscheint, dass es sich tatsächlich um solchen handelt. Die Klassifizierungen im Untersuchungsgebiet B kommen zu einem ähnlichen Ergebnis (BILD 3). Der TRIKII hat in diesem Fall land- wie seewärts Areale als Kelp klassifiziert, die der NDVI zwar nicht erkannt hat, deren Existenz jedoch potenziell möglich ist. Betrachtet man die gesamte Szene so fällt auf, dass vor allem in östlichen Bereichen große Flächen offenen Wassers vermutlich fälschlicherweise vom TRIKII als Kelp klassifiziert wurden. Aus den vorhandenen Daten kann jedoch nicht abgeleitet werden, was die Klassifikation in diesen Bereichen beeinflusst hat.
Insgesamt lässt sich feststellen, dass in der Szene vom 14.12.2013 der NDVI vermutlich die valideren Ergebnisse liefert. Für die Szene vom 24.06.2014 ergibt sich ein kontrräres Bild. In diesem Fall scheint der TRIKII bessere Ergebnisse zu liefern als der NDVI. Vor allem im Untersuchungsgebiet A und im Untersuchungsgebiet B lässt ein Vergleich der drei Szenen den Schluss zu, dass der NDVI submerse Kelpbereiche in diesem Fall nicht detektiert hat, wohingegen der TRIKII diese Bereiche korrekt als Kelp klassifiziert hat.
In der Szene vom 02.01.2015 liefern beide Indizes valide, wenn auch teilweise unterschiedliche Ergebnisse. Vor allem in Randbereichen von Kelpwäldern unterscheiden sich die Ergebnisse der Indizes. In diesem Fall scheint der TRIKII jedoch ebenfalls die besseren Ergebnisse zu erzielen.

4. DISKUSSION

Der TRIKII liefert unter bestimmten Bedingungen bessere Ergebnisse als der NDVI (Szenen vom 24.06.2014 und 02.01.2015) und ist in der Lage auch submerse Kelpbereiche zu identifizieren, in der Szene vom 14.12.2013 sind die Ergebnisse jedoch nicht besonders aussagekräftig.
Zwar sind die Ergebnisse der Kelpklassifikation mit Hilfe des TRIKII zum Teil vielversprechend, jedoch variiert die Qualität der Klassifikation zwischen den verschiedenen Szenen zum Teil erheblich. Wie in vergangenen Studien (z.B. [13]) festgestellt wurde, ist insbesondere bei der Detektion von Kelpwäldern mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden, eine zeitnahe Aufnahme von Ground Truth Daten von äußerster Relevanz. Da keine in-situ Daten vorlagen, wurde auf räumlich hoch aufgelöste Fernerkundungsdaten des Anbieters Google Earth zurückgegriffen, um Flächen, die als Referenz für die Klassifikation genutzt werden können zu identifizieren. Dabei wurde darauf geachtet, dass der zeitliche Abstand zwischen Landsat und Google Earth Daten minimal ist. Eine zeitliche Differenz von maximal vier Tagen konnte so erzielt werden. Dies schränkte die Auswahl der Landsat Szenen drastisch ein, da die zeitliche Auflösung der Google Earth Daten wesentlich geringer und die räumliche Abdeckung deutlich unregelmäßiger ist, als die der Landsat Daten. Es konnten deshalb keine Referenzpolygone für die Untersuchungsgebiete B und C angelegt werden. Eine Einschätzung der Ergebnisse der TRIKII Klassfikation kann deshalb nur im Vergleich mit Ergebnissen anderer NDVI Klassfikationen bzw. einer Interpretation von RGB-Darstellungen erfolgen.
Um sicherzustellen, dass in der Zeit zwischen den Datenerhebungen der verschiedenen Sensoren keine mechanische Zerstörung des Kelps erfolgte, wurden historische Wetterdaten naher Wetterstationen und Messbojen herangezogen und bezüglich Windstärke [14] und Wellenhöhe [15] hin untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass zwischen den Google Earth und den Landsat Aufnahmen aus dem Jahr 2013 nur geringe Windgeschwindigkeiten sowie niedrige Wellenhöhen verzeichnet wurden. Es gilt daher als annähernd sicher, dass eine mechanische Reduzierung der Kelpfläche nicht stattgefunden hat. In der Zeit zwischen den Datenerhebungen aus dem Jahr 2014 wurden maximale Windgeschwindigkeiten von 14 Knoten sowie maximale Wellenhöhen von 1,92 m verzeichnet. Da die Landsat Daten vor den Google Earth Daten aufgenommen wurden, wäre jedoch allenfalls eine Verkleinerung der Kelpfläche zu erwarten. Der Vergleich der Referenzpolygone mit den Ergebnissen der Indizes kommt zu dem Ergebnis, dass die Kelpflächen zum Zeitpunkt der Aufnahme der Landsat Daten geringer war als zum Zeitpunkt der Google Earth Aufnahmen. Potenzielle destruktive Auswirkungen auf das Untersuchungsgebiet A können für diesen Zeitraum deshalb ausgeschlossen werden. In der Zeit zwischen den Datenerhebungen im Jahr 2015 kann ein negativer Einfluss auf Kelpbereiche ebenfalls ausgeschlossen werden. Da die Exposition der Untersuchungsgebiete je nach Windrichtung und Seegang variiert, lassen die begrenzt verfügbaren Daten keine konkreten Rückschlüsse für die Untersuchungsgebiete B und C zu. Da die oberflächliche Ausdehnung von Kelp u.a. mit dem Wasserstand zusammenhängt wäre eine Analyse der historischen Tidenstände zum Zeitpunkt der jeweiligen Datenerhebung sinnvoll. Allerdings ist die genaue Uhrzeit der Erhebung der Google Earth Daten nicht bekannt, weshalb ein Vergleich nicht möglich ist. Potenzielle Auswirkungen auf die Ergebnisse der Klassifikation können deshalb nicht ausgeschlossen werden. Zwar wird angenommen, dass der Einfluss der Tide die großräumigen Unterschiede in der Szene vom 24.06.2014 nicht erklären kann, jedoch ist eine exakte Einschätzung der Ergebnisse ebenfalls nicht möglich. Insgesamt wird die angewendete Methode zwar als verbesserungswürdig angesehen, jedoch konnte durch eine Analyse von Wetterdaten die Qualität der Studie verbessert werden.
Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Identifikation von (submersen) Kelpbereichen mit Hilfe von Google Earth Daten. Unter bestimmten Umweltbedingungen ist die Identifikation von aufschwimmendem Kelp aufgrund der hohen räumlichen Auflösung möglich, jedoch beeinflussen der Zustand der Wassersäule, der Wasseroberfläche und der Atmosphäre, wie gut diese zu erkennen sind. Submerse Kelpbereiche wurden identifiziert, indem einerseits nach vereinzelten oberflächennahen Kelpstrukturen ge-

sucht wurde, um potenzielle Besiedlungsbereiche zu identifizieren und andererseits eine Zeitreihenanalyse der Google Earth Daten durchgeführt wurde, um herauszufinden ob die identifizierten Gebiete vor oder nach der jeweiligen Datenerhebung jemals von Kelp besiedelt waren. Diese rein optische Identifikation von Referenzflächen ist potenziell anfällig für Fehleinschätzungen, da vor allem submerse Kelpbereiche, eventuell nicht korrekt identifiziert werden konnten. Eine Einschätzung der Klassifikationsergebnisse des TRIKII gestaltet sich deshalb außerhalb der Referenzpolygone als schwierig und kann nur durch optische Überprüfung mit Hilfe von Google Earth Daten und Zeitreihenanalysen validiert oder falsifiziert werden. Präzisere in-situ Messungen sind deshalb für eine konkretere Bewertung der Klassifikation notwendig.

Auffällig ist, dass der TRIKII im Vergleich zum NDVI vor allem in Flachwasserbereich nahe der Uferzone häufig Flächen als Kelp identifiziert hat, die vom NDVI nicht als solcher klassifiziert wurden. Einerseits ist zu vermuten, dass Kelp gerade in Flachwasserbereichen bis an die Wasseroberfläche heranwächst, andererseits ist Kelp gerade in diesen Bereichen der mechanischen Wellenenergie besonders ausgesetzt. Es kann jedoch mit Hilfe der Google Earth Daten nicht eindeutig festgestellt werden, um was für Oberflächen es sich in diesen Bereichen tatsächlich handelt. Ein Farbvergleich innerhalb der Google Earth Daten lässt jedoch vermuten, dass es sich um eine andere Art von aquatischer Flora handelt. Diese Unsicherheiten können jedoch ebenfalls nur mit Hilfe detaillierter in-situ Daten ausgeräumt werden.

Zwar werden vom USGS atmosphärisch korrigierte Landsat Szenen angeboten, jedoch wird darauf hingewiesen, dass diese Korrektur nur über terrestrischen Oberflächen und abseits von Küstengebieten optimale Ergebnisse liefert, da aktuell in Küstenbereichen der Einfluss von Aerosolen auf die passierende elektromagnetische Strahlung nicht korrigiert werden kann [21]. Die angewandte Annäherung mit Hilfe einer linearen Regression konnte zwar vergleichbare Spektren erzeugen, die die charakteristischen Signaturen der jeweiligen Oberflächen aufweisen, jedoch ist die Qualität der Atmosphärenkorrektur insgesamt als verbesserungswürdig zu betrachten und die durchgeführte Analyse deshalb zu einem gewissen Grad fehlerhaft. Zwei der drei Szenen enthalten Bereiche, die von Wolken bedeckt sind. Diese wurde zwar großflächig ausmaskiert um mögliche Beeinträchtigungen aus der Analyse auszuschließen, jedoch besteht die Möglichkeit, dass kaum sichtbare Schleierwolken die Ergebnisse beeinflusst haben. Ein weiterer Faktor, der die Klassifikation beeinflusst hat ist Lichtreflexion an der Wasseroberfläche (Sunglint) die auf eine Kombination von Sonnenstand und Zustand der Wasseroberfläche zurückzuführen ist und in Reflexionswerten der ersten drei Kanäle resultiert, deren Verhältnis zueinander die dieselben relativen Charakteristika wie die von Kelpbereichen aufweist. Eine auf Küstengewässer spezialisierte Atmosphärenkorrektur (vgl. [23]) könnte die Ergebnisse der Klassifikation weiter differenzieren und verbessern. Der Einsatz von Fernerkundungsmethoden in Gewässern stellt weiterhin eine besondere Herausforderung dar, da die elektromagnetische Strahlung an der Wasseroberfläche sowie innerhalb der Wassersäule gestreut, gebrochen und absorbiert wird. Verschiedene gelöste und suspendierte Wasserinhaltsstoffe haben dabei unterschiedliche Auswirkungen auf unterschiedliche Bereiche des elektromagnetischen Spektrums [24]. Äquivalent zur Atmosphäre kann für Gewässer eine Wassersäulenkorrektur durchgeführt werden, wenn die Wasserinhaltsstoffe bekannt sind. Da es sich hierbei jedoch um ein inhaltlich und zeitlich sehr aufwändiges Verfahren handelt, wurde mit Hinblick auf die einfache Anwendbarkeit auf eine Wassersäulenkorrektur verzichtet. Da Gewässerzustände jedoch äußerst dynamisch sind, sind die Einflüsse der Wasserinhaltsstoffe für jede Szene unterschiedlich. Die Auswirkungen verschiedener Konzentrationen von Wasserinhaltsstoffen auf das Reflexionsspektrum von submersen Kelpbereichen wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Dies könnte eine Erklärung für das Versagen des TRIKII sowie die vereinzelt als Kelp identifizierten Pixel seewärts der Kelpwälder sein.

5. FAZIT

Der TRIKII konnte im Vergleich zum NDVI eine Vergrößerung der Kelpfläche detektieren. Dabei wurden einige Validierungsflächen bestätigt und die als Kelp identifizierte Fläche vergrößerte sich innerhalb der Referenzpolygone in allen drei Szenen. Eine optische Einschätzung der Klassifikationen kam zu dem Ergebnis, dass der TRIKII in zwei Szenen valide Ergebnisse liefert und in der Lage ist, auch submerse Kelpbereich zu klassifizieren, die vom NDVI nicht erfasst werden.

Die Analyse im Untersuchungsgebiet B liefert ein ähnliches Ergebnis, während die die Ergebnisse im Untersuchungsgebiet C qualitativ nicht gut genug waren, um eine räumliche Interpretation zuzulassen.

Verschiedene Umweltfaktoren scheinen den TRIKII zu beeinflussen, dabei konnten Wellen und Sunglint als beeinflussende Faktoren identifiziert werden. Andere Faktoren wie z.B. Wasserinhaltsstoffe stehen im Verdacht sich ebenfalls auf das Ergebnis der Klassifikation auszuwirken, jedoch konnte eine Bestätigung dieser Vermutung aufgrund fehlender in-situ Daten bisweilen nicht erfolgen. Insgesamt sind detailliertere, zeitlich abgestimmte in-situ Daten notwendig, um die Qualität der TRIKII Klassifikation abschließend beurteilen zu können. Eine verbesserte Atmosphärenkorrektur und eine Korrektur der Wasserinhaltsstoffe sollten ebenfalls in weiterführenden Studien erfolgen. Nichtsdestotrotz konnte der TRIKII im direkten Vergleich mit dem NDVI zumindest unter bestimmten Umweltbedingungen auch submerse Kelpbereiche identifizieren.

Der TRIKII ist eine simple Methode zur Detektion von submersen Kelpbereichen, die von Endnutzern einfach angewendet werden kann. In seiner aktuellen Form ist der TRIKII vor allem als Ergänzung zu klassischen NDVI-Analysen von Interesse und bedeutet bereits einen Mehrwert an Informationen, der für das Monitoring von Kelpwäldern genutzt werden kann. Allerdings sind die Ergebnisse bisweilen mit Vorsicht zu interpretieren und erfordern eine gewisse Kenntnis des Untersuchungsgebietes. In weiterführenden Untersuchungen müssen die in dieser Arbeit aufgeworfenen Fragen mit Hilfe von weiteren Datenanalysen und in-situ Messungen beantwortet werden, verbesserte Atmosphärenkorrekturen werden zukünftig zu valideren Ergebnissen führen.

6. SCHRIFTTUM

[1] Cavanaugh, K. C.; Siegel, D. A.; Reed, D. C. & Dennison, P. E. (2011): Environmental controls of giant-kelp biomass in the Santa Barbara Channel, California. In: Marine Ecology Progress Series 429: 1-17

[2] Cavanaugh, K. C.; Siegel, D. A.; Kinlan, B. P. & Reed, D. C. (2010): Scaling giant kelp field measurements to regional scales using satellite observations. In: Marine Ecology Progress Series 403: 13-27

[3] Channel Islands National Park (o. Jahr): Kelp Forests, Ecology and Importance. URL: http://www.nps.gov/chis/naturescience/kelp-forest.htm (Zugriff: 16.08.2015)

[4] Kushner, D. J.; Rassweiler, A.; McLaughlin, J. P. & Lafferty, K. D. (2013): A multi-decadal time series of kelp forest community structure at the California Channel Islands. In: Ecology 94: 2655

[5] Graham, M. H.; Vásquez, J. A. & Buschmann, A. H. (2007): Global ecology of the giant kelp Macrocystis: From ecotypes to ecosystems. In: Oceanography and Marine Biology: An Annual Review 45: 39-88

[6] Graham, M.; Halpern, B. & Carr, M. (2008): Diversity and Dynamics of California Subtidal Kelp Forests. In: McClanahan, T. & Branch, G. M. (Eds.): Food Webs and the Dynamics of Marine Reefs. Oxford, England: Oxford University Press.

[7] Tucker, C. J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. In: Remote Sensing of Environment 8 (2): 127-150

[8] Jensen, J. R.; Estes, J. E. & Tinney, L. (1980): Remote sensing techniques for kelp surveys. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 46: 743-755

[9] Deysher, L. E. (1993): Evaluation of remote sensing techniques for monitoring giant kelp populations. In: Hydrobiologia 260-261: 307-312

[10] Stekoll, M. S.; Deysher, L. E. & Hess, M. (2006): A remote sensing approach to estimating harvestable kelp biomass. In: Journal of Applied Phycology 18: 323-334

[11] Kirk, J.T.O. (2011): Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Third Edition. Cambridge University Press. New York.

[12] United States Geological Service (2013): Frequently Asked Questians about the Landsat Missions. URL: http://landsat.usgs.gov/ldcm_vs_previous.php (Zugriff: 16.08.2015)

[13] König, M. (2014): Kelp mapping at Channel Islands National Park using remote sensing methods. Bachelorarbeit. Kiel.

[14] National Oceanic and Atmospheric Administration – National Centers For Environmental Information (o. Jahr): Quality Controlled Local Climatological Data (QCLCD). Historische stündliche Messwerte der Windgeschwindigkeit in Santa Barbara. URL: https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/land-based-station-data/land-based-datasets/quality-controlled-local-climatological-data-qclcd

[15] National Oceanic And Atmospheric Administration – National Data Buoy Center – Center of Excellence in Marine Technology (2015): Historical wave data. Station 46216 – Goleta Point, CA (107). URL: http://www.ndbc.noaa.gov/station_history.php?station=46216

[16] Kushner, D. J.; Moore, K. J.; Mooney, E. A.; Ibarra, S.; Grunden, J. R. & Metzger, J. R. (2013b): Channel Islands National Park Kelp Forest Monitoring Program: Annual report 2009. In: Natural Resource Data Series NPS/CHIS/NRDS-2013/581. Fort Collins, Colorado: National Park Service.

[17] Sprague, J. L.; Moore, K. J.; Grunden, J. R.; Ibarra, S. N.; Mooney, E. A.; Scheer, G.& Kushner, D. J. (2012): Channel Islands National Park Kelp Forest Monitoring Program: Annual report 2010. In: Natural Resource Data Series NPS/CHIS/NRDS-2012/334. Fort Collins, Colorado: National Park Service.

[18] Sprague, J. L.; Traiger, S. B.; Grunden, J. R.; Ibarra, S. N.; Mooney, E. A.; Moore, K. J. & Kushner, D. J. (2013): Channel Islands National Park kelp forest monitoring program: Annual report 2011. In: Natural Resource Data Series NPS/MEDN/NRDS-2013/480. Fort Collins, Colorado: National Park Service.

[19] Chavez Jr., P. S. (1988): An improved dark-object substraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. In: Remote Sensing of Environment 24: 459-479

[20] United States Geological Service (o. Jahr): Earthexplorer. URL: http://earthexplorer.usgs.gov/

[21] United States Geological Service (2015): Product Guide. Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Product. Version 1.5. URL: http://landsat.usgs.gov/documents/provisional_l8sr_product_guide.pdf (Zugriff: 16.08.2015)

[22] California Department of Fish and Wildlife (o. Jahr): Marine Region GIS Unit: Downloads. Bathymetry. 10m Bathymetry to 600m. URL: http://www.dfg.ca.gov/marine/gis/downloads.asp

[23] Vanhellemont, Q. & Ruddick, K. (2015): Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8. In: Remote Sensing of Environment 161: 89-106

[24] Martin, S. (2014): An Introduction to Ocean Remote Sensing. Second Edition. Cambridge University Press. New York.