
SCHLUSSBERICHT

(ENTSPRECHEND BEWIRTSCHAFTUNGSGRUNDSÄTZEN ANBEST-P MIT BNBEST-BMBF 98)

Förderkennzeichen: 50 EE 1020

KELPMAP

ENTWICKLUNG EINES ENMAP-VERFAHRENS ZUR BESTIMMUNG VON SUBLITORALEN MARINEN MAKROPHYTEN

Zuwendungsempfänger:	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Geographisches Institut Prof. Dr. Natascha Oppelt Ludewig-Meyn-Str 14 24098 Kiel
Projektleiter:	Prof. Dr. Natascha Oppelt
Projektbearbeiter:	Prof. Dr. Natascha Oppelt (CAU Kiel) Dipl. Geogr. Florian Uhl (AWI)
Kooperationspartner	Dr. Inka Bartsch (AWI) Dipl. Geogr. Tina Geisler (CAU Kiel) Dr. Thomas Heere (EoMAP) Dr. Franziska Nehring (FIELAX GmbH)
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2010 bis 31.06.2013

I. KURZE DARSTELLUNG ZU

1.1. AUFGABENSTELLUNG

Die Bereitstellung hyperspektraler Fernerkundungsdaten auf globaler Skala ist ein Schlüsselement bei der Entwicklung von spezialisierten Anwendungen zur Ableitung ökosystemrelevanter Parameter mittels optischer Systeme. Während spektral hochaufgelöste Daten bisher hauptsächlich flugzeuggebundenen Plattformen vorenthalten waren, wird deren Verfügbarkeit durch die deutsche Satellitenmission EnMAP signifikant erhöht. Mit dem Projekt „KelpMAP“ wurde das Ziel verfolgt, ein dokumentiertes, halbautomatisiertes Auswerteverfahren für die Klassifizierung und Quantifizierung von sublitoralen marinen Makrophyten aus EnMAP-ähnlichen Daten zu entwickeln. Zur Bereitstellung solcher Daten sollten hochaufgelöste AISA-Befliegungsdaten gewonnen und zu EnMAP-Daten simuliert werden. Der Untersuchungsraum für die Befliegungskampagnen ist die deutsche Hochseeinsel Helgoland mit ihren dichten Vorkommen von Brauntangen, welche auch als Kelp-Wälder bekannt sind. Die trüben Gewässer dieses Gebietes stellen eine besondere Herausforderung für die Detektion von Makroalgen dar, da sie die Eindringtiefe des Lichtes stark limitieren. Basierend auf dieser Ausgangssituation ergeben sich folgende Fragestellungen für das Projekt:

- 1) Wie können aus geometrisch hochaufgelösten hyperspektralen Befliegungsdaten EnMAP-ähnliche Daten simuliert werden?
- 2) Lässt sich die Ausdehnung der Unterwasserwälder vor Helgoland durch eine Klassifikation der Makroalgen durch EnMAP-ähnliche Daten quantifizieren?
 - a. Welchen limitierenden Einfluss haben trübe, küstennahe Gewässer auf die Detektion von marinen Makrophyten?
- 3) Können Informationen über die Tiefenverteilung auch in komplexen Gewässern aus EnMAP-Daten abgeleitet werden?
 - a. Bis zu welcher Tiefengrenze können Unterwasserwälder bei den gegebenen Trübungsverhältnissen noch vertrauenswürdig abgebildet werden?
- 4) Welche Auswirkung haben wechselnde Wasserstände auf die Klassifizierungsergebnisse?
- 5) Wie lassen sich Brauntange und deren Flächenanteil je Pixel bei einer geometrischen Auflösung von 30 m entmischen?

Die fünf Kernpunkte der Forschung wurden durch die Verwendung von zwei Programmen bearbeitet. Zum einen ermöglichte ein aus Laborergebnissen abgeleiteter Ansatz die Separation

unterschiedlicher Habitats von Makroalgen mittels eines hierarchischen Ansatzes und damit auch die Quantifizierung von Kelp (MakroMAP). Dieses Programm wird künftig für als Applikation für die EnMAP-Box verfügbar sein. Im Weiteren wurden durch das Programm WASI-2D (Geege, 2014), welches auf dem bio-optischen Modell von Albert und Mobley (2003) basiert, Analysen auf Subpixelebene durchgeführt. Dadurch konnten bathymetrischen Informationen abgeleitet und die Flächenanteile der Kelp-Wälder bestimmt werden.

1.2. VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Die Bedeutung der sublitoralen marinen Makrophytenwälder erfährt in den letzten Jahren auch in der Öffentlichkeit ein gesteigertes Interesse. Die Brauntange sind für die Ökosysteme in flachen Küstengewässern in ihrer Funktion als Habitat, Nahrungsquelle oder für den Schutz von jungen Fischen, Krabben oder anderen Lebewesen weltweit von zentraler Bedeutung (Levin, 1994; Worthington & Fairweather 1989; Schiel & Nelson, 1990). Aufgrund ihrer Schlüsselrolle für marine Ökosysteme stellen Makroalgen einen idealen Indikator für den Zustand und Veränderungen in marinen Habitats dar (Gao & McKinley 1994; Harley et al. 2006). Vor allem mit Hinblick auf den Klimawandel und damit einhergehende Änderungen der Lebensbedingungen rückt das Monitoring von Algenwäldern in den öffentlichen Fokus. Darüber hinaus spiegelt sich der direkte Einfluss aquatischer Vegetation auf die menschliche Gesellschaft in der kommerziellen, industriellen Nutzung von Makroalgen wieder. Als Beispiele sind hier die Verwendung von Alginaten in der Nahrungsmittelindustrie oder die agrarische Nutzung als Dünger zu benennen. Das industrielle Potential ist aktuell noch längst nicht ausgeschöpft. Während die Verwendung von Makroalgen als Biokraftstoff zurzeit auf industrieller Skala noch keine Bedeutung spielt, ist eine künftige Nutzung unter dem steigenden Druck abnehmender fossiler Brennstoffe durchaus denkbar (Burton et al. 2009).

Die Makroalgenvorkommen in der Gezeitenzone Helgolands werden seit 2002 regelmäßig durch das AWI, DLR und drittmittelfinanzierte Projekte mit ROSIS und AISA Eagle Befliegungen fernerkundlich erfasst. Im Jahr 1999 begannen Bodenarbeiten in der Gezeitenzone Helgolands, die zu einer guten Kenntnis der Lebensgemeinschaften und ihrer Ausbreitung geführt haben. Regelmäßige, quantitative Untersuchungen im Felswatt und im Sublitoral erfolgen seit 2003. Die Ergebnisse der bisherigen Arbeiten deuteten darauf hin, dass die klassischen biologischen Kartierverfahren nicht in der Lage sind, die z.T. erheblichen saisonalen Schwankungen des Bedeckungsgrades und der Ausbreitung der Lebensgemeinschaften großräumig synoptisch zu erfassen. Die detaillierten und kleinräumigen Bodenkartierarbeiten auf Helgoland ermöglichen

eine sehr genaue Evaluierung der Klassifikationsgüte der im Projekt zu entwickelnden Verfahren zur Detektion von Makroalgen im Sublitoral.

Um die Ausdehnung und den Zustand aquatischer Vegetation mittels Fernerkundung zu monitoren, werden heute vor allem flugzeuggetragene Sensoren verwendet. Diese Systeme bieten allerdings nicht die Möglichkeit für einen operationellen Betrieb, der ein weltweites Monitoring von marinen Makrophyten ermöglicht. Mit dem deutschen hyperspektral aufnehmenden Satelliten EnMAP werden erstmalig solche Daten zur Verfügung stehen.

1.3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Der erste Zeitraum des Projektes war durch die Durchführung der Datengewinnungskampagnen und die Prozessierung der erzielten Daten gekennzeichnet. Dabei galt es, die Qualität der einzelnen Teilschritte zu bewerten und, wie im Fall der Befliegungsdaten aus dem Jahr 2010, einige Prozessierungsschritte erneut durchzuführen. Daraus resultierten Verzögerungen im gesamten Projektablauf. Der grobe Ablauf des Projektes ist in Tabelle 1 dargestellt.

13.10.2009 – 14.10.2009	Teilnahme von Frau Oppelt am ersten EnMAP Workshop in Potsdam
07.2010 – 08.2010	Einarbeitung in die Grundlagen des Inhaltes des Antrages durch Herrn Uhl Planung und Durchführung der ersten Geländekampagne in Bremerhaven und auf Helgoland, Einarbeitung in die Messgeräte, den Sensor, die Kartierungsverfahren, die Gegebenheiten vor Ort und die Anforderungen an die Flugplanung
10.2010 – 12.2010	<p>Beginn der Projektfinanzierung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Radiometrische Vorprozessierung der Daten durch die Firma Fielax - Entstreifung der AISA Daten durch die Firma FIELAX - Einarbeitung in das Programm MIP - Aufenthalt von in München bei der Firma EOMAP - Atmosphärische Prozessierung der AISA Daten durch die Firma EOMAP und ständige Korrespondenz zwischen den Projektbetreuern (CAU, EOMAP, AWI) zu Qualitätssicherung - Auswertung der Geländemessungen der ersten Flugkampagne

19.09.2010 – 24.09.2010	- Teilnahme von Herrn Uhl an der EnMAP-Sommerschule in Trier
25.11.2010 – 26.11.2010	- Vorstellung der Inhalte des Projektes auf dem zweiten EnMAP Workshop in Potsdam
01.2011 – 04.2011	- Überprüfung der Eignung der CHRIS/Proba Daten zur Bearbeitung der Fragestellung
	- Spektralanalysen typischer Algenspektren und erste Analysen der Habitate
	- Erste Untersuchung der erreichten Genauigkeiten der Klassifikationen auf hochaufgelösten AISA Daten
26.4.2011 – 06.05.2011	- Teilnahme von Herrn Uhl an der zweiten EnMAP-Sommerschule und der IDL-Schulung in München
05.2011 – 06.2011	- Mosaikierung der AISA-Daten
	- Erste Simulation von EnMAP Daten aus den AISA Befliegungsdaten von 2010
	- Bewertung der ersten EnMAP Simulationen und Schlussfolgerung einer notwendigen Belichtungskorrektur der AISA Flugstreifen bevor die Mosaikierung und EnMAP-Simulation erfolgen kann
	- Vergleich der Klassifikationsverfahren Maximum Likelihood, SAM und Slope based k-means
	- Vorbereitung der zweiten Flugkampagne
	- Entwicklung eines Flugplanungstools zur verbesserten Datengewinnung in der zweiten Kampagne
23.05.2011	- Großer Workshop in Bremerhaven zur weiteren Planung der AISA Befliegung im Sommer 2011. Teilnehmer waren die Mitarbeiter der an dem Verbund teilnehmenden Projekte (AWI: I. Bartsch; CAU: T.Geisler, N. Oppelt, F. Uhl; Fielax: F. Nehring)
06.2011 - 07.2011	- Durchführung der zweiten Flugkampagne unter Beteiligung der AG Fernerkundung der CAU Kiel, des AWI und der Firma FIELAX
11.07.2011	- Befliegung von Gezeitenzone und Sublitoral im Testgebiet unter verschiedenen Konfigurationen
08.2011 – 12.2011	- Korrektur von variierenden Belichtungen in den AISA Flugstreifen von 2010

	<ul style="list-style-type: none"> - Radiometrische Vorprozessierung der AISA Daten von 2011 durch die Firma FIELAX - Entstreifung der AISA Daten durch die Firma FIELAX - Verarbeitung der Geländemessungen
01.2012 – 03.2012 08.02.2012 – 10.02.2012	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse der AISA Daten auf Ghost-Images durch FIELAX - Weiterentwicklung der Klassifikationsverfahren und Analyse deren Genauigkeiten - Teilnahme von Frau Oppelt und Herrn Uhl am dritten nationalen EnMAP-Workshop und Vorstellung von ersten Ergebnissen und bisherigen Herausforderungen in dem Projekt
04.2012 – 06.2012	<ul style="list-style-type: none"> - Beginn der Arbeit an der ersten Veröffentlichung - Erneute Mosaikierung der Flugdaten von 2010 - Erneute EnMAP-Simulation der Flugdaten von 2010 - Fertigstellung der Wassersäulenkorrektur über den Kerngebieten für die 2010er Daten - Entwicklung eines Tools zur Berechnung des Tidenhubs auf der EnMAP Rastergröße
07.2012 – 12.2012 24.12.2012 – 27.12.2012 26.12.2012	<ul style="list-style-type: none"> - Atmosphärenkorrektur der Daten von 2011 durch EoMAP - Erfolgreiche Klassifikationen im Eulitoral durch die entwickelten Ansätze - Erfolgreiche Anwendung einer Methode zum Daten-Leveling in Zusammenarbeit mit dem DLR und eine dadurch erzielte weitere Verbesserung der EnMAP-Mosaik - Teilnahme von Frau Oppelt und Herrn Uhl bei der SPIE Remote Sensing Konferenz in Edinburgh, Schottland, wo sie im Rahmen eines Vortrags erste Ergebnisse aus dem Projekt vorstellten - Vortrag von Herrn Uhl auf dem 9. Workshop zur Nutzung der Fernerkundung im Bereich der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)/Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) in Hamburg
01.2013 – 06.2013	<ul style="list-style-type: none"> - Übertragung der neuen Ansätze vom Eulitoral auf das Sublitoral - Fertigstellung der Arbeiten bezüglich

	<p>Meeresbodentopographie und Wasserstand</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fertigstellung der Arbeiten bezüglich der Wassersäulenkorrektur - Fertigstellung der Arbeiten zur spektralen Entmischung der EnMAP Pixel - Beginn der Arbeiten an der IDL Routine - Beginn der Arbeiten am Endbericht <p>Ende der Projektfinanzierung</p>
09.09.2013 – 13.09.2013	<ul style="list-style-type: none"> - Vorstellung von Indizes zur Detektion von Makroalgen durch Herrn Uhl auf dem ESA living planet Symposium in Edinburgh, Schottland im Rahmen einer Poster Präsentation
14.11.2013	<ul style="list-style-type: none"> - Vorstellung der Endergebnisse des Projektes durch Frau Oppelt und Herr Uhl am auf dem vierten nationalen EnMAP User Workshop in Bonn
28.03.2014	<ul style="list-style-type: none"> - Fertigstellung und Abgabe des Schlussberichts

TAB. 1: ÜBERSICHT ÜBER DEN PROJEKTABLAUF

1.4. WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE

Die marinen Unterwasserwälder, welche im Wesentlichen durch große Brauntange aufgebaut sind, bilden mit ihrem Artenreichtum, ihrer Funktion als Habitat, Schutzraum und Nahrungsquelle und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung einen Lebensraum, der aufgrund seiner zentralen ökologischen Bedeutung international in verschiedenen Monitoringprojekten berücksichtigt wird (z.B.: Orfanidis et al. 2003, Guinda et al. 2008). Auch aus klimatologischer Sicht sind marine Makrophytenwälder in den Küstenzonen in ihrer Funktion als biologische Kohlenstoffsenken – vor allem im Hinblick auf den Klimawandel - von Interesse. Szenarien zur Klimaerwärmung zeigen, dass es in den nächsten hundert Jahren im Nordatlantik zu deutlichen geographischen Verschiebungen der marinen sublitoralen Makrophytenbestände – und damit auch zu einer Veränderung der Lebensräume - kommen wird (Müller et al. 2009). Aus diesen Gründen kann eine quantitative Erfassung der Braunalgenbestände durch fernerkundliche Klassifikationen einen wichtigen Beitrag zur Bestimmung des Zustands und der Veränderung von Ökosystemen, sowie zur Berechnung von regionalen oder globalen Stoff-kreisläufen liefern. Erste Versuche, eine Abschätzung der enormen Biomasse von Brauntangwäldern mittels Fernerkundung vorzunehmen fanden vor der Südwestküste Afrikas und entlang der pazifischen Küste Nordamerikas statt (Stekoll et al. 2006, Anderson et al. 2007). Eine große

Herausforderung bei der Erfassung von Makroalgen durch fernerkundliche Techniken stellt der dämpfende Einfluss des Wasserkörpers dar, weshalb Makrophyten unterhalb der Wasseroberfläche schwerer zu erfassen sind. Im Untersuchungsgebiet Helgoland befinden sich die größten Bestandsdichten in bis zu 4 m unter mittlerem Springniedrigwasser (MSNW). Die mittlere jährliche Secchi-Tiefe im Untersuchungsgebiet Helgoland liegt bei 4 m (Wiltshire et al. 2008) und in 4 m Tiefe wurden noch 18% (450nm) bzw. 36% (550nm) der einfallenden Sonnenstrahlung gemessen (Lüning & Dring 1979). Unter diesen Voraussetzungen sollten die Makrophytenwälder auch trotz der schwierigen Lichtverhältnisse in den trüben Küstengewässern der mittleren Breiten hyperspektral erfassbar sein. Bisherige Untersuchungen in Gewässern einer geringen bis mittleren Trübung zeigten erfolgversprechende Aussichten für die Klassifikation dominanter Makrophytenarten mittels hyperspektraler Sensoren (Harvey et al. 2007, Peneva et al. 2008).

In sublitoralen Küstenzonen bietet sich die Fernerkundung bei der Beobachtung von Makrophyten, sowie bei der Ableitung von biophysikalischen und biochemischen Parametern besonders an, da in solchen Gebieten bodengestützte Messungen nur relativ ungenaue Angaben über die flächenhafte Verteilung der Bestände liefern (Vis et al. 2003). Für die Detektion von Makroalgen wurden bisher am häufigsten flugzeuggetragene multi- oder hyperspektrale, sowie Video-Sensoren mit einer häufig hohen räumlichen Auflösung eingesetzt (Zacharias et al. 1992, North et al. 1993, Valta-Hulkonnen et al. 2003, Sprengle et al. 2004, Volten et al. 2007). Vielversprechende Ergebnisse zeigten Studien, in denen aquatische Vegetation mittels hyperspektraler Sensoren untersucht wurde (Silva et al. 2008). Mit dieser Sensortechnologie und verbesserten Auswertetechniken können charakteristische Bestandsparameter wie z.B. Artenzusammensetzungen (Dekker et al. 2005; Pinnel et al. 2004), Biotopkartierungen in der Gezeitenzone (Thiemann & Bartsch 2005, Hennig et al. 2007), Bedeckungsgrad (Heege et al. 2003), Blattflächenindex (Dierssen and Zimmermann 2003), Biomasse (Vis et al. 2003), photosynthetisch aktive Strahlung (Peñuelas et al. 1993) und biochemische Parameter wie z.B. der Chlorophyllgehalt (Peñuelas et al. 1993) abgeleitet werden. Neben flugzeuggetragenen Systemen wurden auch satellitengestützte Multispektralsensoren für die Detektion von aquatischer Vegetation genutzt (z.B. Pal & Mohanty (2002); Dekker et al. (2005)). Aufgrund der geringen räumlichen und spektralen Auflösung der Sensoren erfolgte in den meisten Fällen aber keine Differenzierung einzelner Arten. Bisherige Studien zeigen also, dass die Fernerkundung für die Untersuchung mariner Makrophyten geeignet ist, wobei das SNR, die spektrale – und die räumliche Auflösung limitierende Parameter waren. Daraus ergeben sich erhöhte Anforderungen bezüglich einer akkuraten Prozessierung mit einer sehr sorgfältigen Atmosphären- bzw. Wassersäulenkorrektur, einer hohen spektralen Auflösung des Sensors für eine verbesserte Klassifikation aquatischer Vegetation und die Ableitung von biophysikalischen

und biochemischen Parametern und zuletzt einer guten räumlichen Auflösung, welche die stark strukturierten Habitate der Brauntange ausreichend abbilden kann. Mit EnMAP wird erstmals ein operationeller, hyperspektraler Sensor zur Verfügung stehen, der ein weltweites Monitoring von aquatischer Vegetation ermöglichen kann, wobei seine räumliche Auflösung wahrscheinlich der Parameter ist, der die Grenzen der Anwendungen im Bereich der Klassifikation aquatischer Vegetation vorgibt.

In der Literatur werden viele Ansätze zur Klassifikation submerser, aquatischer Vegetation beschrieben. Den ersten Schritt stellt dabei immer die Trennung der Reflexion der Vegetation von den Reflexionen des Wassers und der des Untergrunds dar. Dieser Prozessierschritt steht nicht im Fokus der Forschungsaufgaben dieses Projekts, weshalb eine Festlegung auf das Korrekturverfahren mit dem Prozessor MIP erfolgte (Heege et al. 2003). Die Detektion unterschiedlicher Makroalgen wird durch die Anwendung von unterschiedlichen Klassifikationsansätzen möglich: bei flugzeuggetragenen Systemen werden gute Ergebnisse bei der Anwendung von Minimal-Distance (Everitt et al. 1999), Maximum-Likelihood (Valta-Hulkonnen et al. 2003, Dekker et al. 2005), Neuralen Netzwerken (Durand et al. 2000), Decision-Tree Klassifikatoren (Harvey et al. 2007), überwachter Bayesian Klassifizierung oder Differentieller Histogramm Angleichung (Volent et al. 2007) mit Klassifikationsgenauigkeiten zwischen 70% und 96% erreicht. Zur generellen Verwendung von Klassifikatoren werden bei der Auswertung von Satellitendaten Ansätze zur spektralen Entmischung des Signals (Dekker et al. 2005) und/oder eine Verbesserung der räumlichen Auflösung durch Verschneiden mit räumlich hochaufgelösten Daten (Pal & Mohanty 2002) beschrieben. Die Klassifikation sublitoraler Makrophyten ist abhängig von der Wasserqualität, insbesondere von der Trübung. In klaren Gewässertypen werden gute bis sehr gute Ergebnisse bei der Klassifikation von sublitoralen Makroalgen beschrieben. Vor der Küste Spitzbergens im Kongsfjord konnte bei klaren Wasserbedingungen im Mai vor der Eisschmelze eine gute Unterscheidung von Brauntangbeständen und Bodensubstrat oberhalb der Secchi Tiefe von <19 m mit einem hyperspektralen Scanner erreicht werden (Volent et al. 2007). Harvey et al. (2007) erzielten an der Westküste Australiens vielversprechende Ergebnisse bei der Klassifikation von Seegräsern (*Posidonia* und *Amphibolis* Arten) und des Brauntanges *Ecklonia radiata* mit einer Klassifikationsgenauigkeit von 70%. Die Klassifikation von Rot- und Braunalgen (*Furcellaria luambricalis* und *Fucus vesiculosus*) in den trüben Gewässern vor Estland war mit multispektralen Sensoren (Landsat TM und IKONOS) bis zu einer Tiefe von 1.5 m möglich, tiefere Bestände konnten durch die hohe Wassertrübung spektral jedoch nicht mehr vom Tiefenwasser unterschieden werden (Kutser et al. 2006). Das erwartete höhere SNR des EnMAP sichtbaren Wellenlängenbereich sowie die höhere spektrale Auflösung lassen aber deutlich bessere Ergebnisse vermuten.

Eine erfolgreiche Klassifizierung sublitoraler Brauntangbestände erfordert die Untersuchung des Einflusses des Wasserstandes auf die Klassifizierung. Stekoll et al. (2006) untersuchten bisher als einzige diesen Aspekt an Brauntangbeständen vor der Westküste Amerikas und kamen zu der Schlussfolgerung, dass nutzbare und vertrauenswürdige Bestandsabschätzungen nur bei ähnlichen Gezeitenwasserständen möglich waren. Da bei Helgoland ein Unterschied von 2.50 m Wassersäule zwischen Hoch- und Niedrigwasser auftritt (Lüning 1985), wird ein wesentlicher Einfluss auf das Klassifizierungsergebnis erwartet.

In der den Projektarbeitern bekannten Literatur wird der Einfluss der variierenden Meeresbodentopographie oft nicht explizit behandelt, da entweder keine Wasserkörperkorrektur angewandt wird (z.B. Anderson et al. 2007, Volent et al. 2007), die Untersuchungen in Gebieten mit flacher Meeresbodentopographie durchgeführt werden (z.B. Durand et al. 2000, Pasqualini et al. 2005) oder geometrisch hochauflösende Sensoren verwendet werden (z.B. Valta-Hulkkonen et al. 2003). Ein beschriebener Ansatz ist die Einbeziehung von Metadaten, d.h. bathymetrischen Daten in Klassifikationsansätze (Ackleson & Klemas 1997, Armstrong 1993), wobei diese Untersuchungen bei möglichst gleichen Wasserständen durchgeführt worden sind. Einen weiteren Lösungsansatz bildet die Identifikation und Verwendung von tiefenunabhängigen Wellenlängenbereichen bzw. Kanälen (Armstrong 1993). Pasqualini et al. (1997) beschreiben die Mosaikierung von SPOT Pixeln in kleinere Kompartimente und die darauffolgende pixelweise Korrektur dieser Sub-Pixel mit unterschiedlichen Wassertiefen. Die Verwendung von optischen Modellen zur Berechnung von Streuungs- und Brechungsvorgängen innerhalb des Wasserkörpers beinhalten meist eine Korrektur der Wassersäule (z.B. Dierssen & Zimmermann 2003, Paringit et al. 2003). Auch das in dem vorliegenden Antrag verwendete MIP beinhaltet ein Korrekturverfahren des Einflusses des Wasserkörpers über dem Meeresboden bzw. der beobachteten Vegetationsschicht (Heege et al. 2003, Heege et al., 2004).

Das Ergebnis des MIP Korrekturverfahrens sind drei Endmember, d.h. drei Komponenten, aus welchen die Reflexion der Meeresbodenoberfläche (bei Durchdringung des Wasserkörpers) oder der Wasserinhaltsstoffe (bei Tiefenwasser) zusammengesetzt ist, z.B. Sand und zwei Vegetationsarten. Die pixelweise Korrektur des Einflusses des Wasserkörpers auf die spektrale Information der Meeresbodenoberfläche erfordert die Kenntnis der Wassertiefe, welche im Normalfall über bathymetrische Karten ermittelt wird (Heege et al. 2003). Für Helgoland liegen für Teilgebiete hochaufgelöste Echolotdaten vor aus denen die sublitorale Topographie generiert werden kann (C. Hass, unpubliziert). Da die Wassertiefe einen wichtigen Parameter für die Korrektur darstellt, muss der Einfluss von variierenden Wassertiefen innerhalb eines EnMAP Pixels untersucht und ggf. korrigiert werden.

Als Ergebnisse von Klassifikationen submerser Vegetation werden im Normalfall Spektren bzw. spektrale Anteile von Pflanzengattungen oder -arten gezeigt, welche auch am Boden charakteristische Verteilungsmuster zeigen (z.B. dominante vs. vergesellschaftete Arten). Diese Vegetationsgesellschaften sind typisch für bestimmte Standorte und/oder Standortbedingungen und bilden die Grundlage für das Vorhandensein von anderen Pflanzen und/oder Tieren, welche nicht direkt mit Fernerkundungsdaten erhoben werden können. Durch typische Vergesellschaftung bestimmter Organismen mit den fernerkundlich detektierbaren dominanten Gattungen und Arten kann eine Zuordnung zu Habitaten erfolgen (Peñuelas et al. 1993, Pasqualini et al. 2005). Diese Ansätze werden in der Literatur anhand von Beispielen an bestimmten Standorten beschrieben. Für eine weltweite Übersetzung muss aber ein standardisiertes Konzept erarbeitet werden, welches die Parameter für eine Zuordnung definiert und so im Laufe der Zeit weltweit für EnMAP eine Zuordnung zu Habitaten ermöglicht wird. Dieses standardisierte Konzept soll im Rahmen des Projektes erarbeitet werden.

1.5. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Die Befliegungen erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem Projekt Flexihyp. Die Kosten für die Geländekampagnen wurden weitestgehend durch Fördergelder aus dem Projekt Flexihyp gedeckt. Weitere Kosten für die Durchführung der Kampagne wurden über den Grundhaushalt des AWI gedeckt.

Die Zusammenarbeit mit dem Alfred-Wegener-Institut ermöglichte die Erfassung von Tauchdaten und weiteren umfangreichen Geländedaten.

In Zusammenarbeit mit der FIELAX Gesellschaft und dem Projekt Flexihyp wurden die während der zwei Feldkampagnen aufgenommenen AISA Eagle+ Daten radiometrisch kalibriert und entstreift. Weiterhin übernahm die Firma FIELAX auch die geometrische Korrektur der einzelnen Flugstreifen im Anschluss an die Atmosphärenkorrektur.

Der Kooperationspartner EoMAP GmbH und Co.KG unterstützte das Projekt bei der Einarbeitung in das Programm MIP um den Einfluss der Atmosphäre und der Wasseroberfläche, sowie auftretende bi-direktionale Effekte zu korrigieren.

Während des Projektes zeigte sich, dass die Mosaikierung der Flugdaten eine bedeutende Position in der Prozesskette der AISA-Eagle+ Daten einnimmt. Die Mosaikierung einzelner Flugstreifen zu einem Gesamtbild stellt in der Gewässerfernerkundung eine besondere Herausforderung dar. Bei der Bearbeitung dieses Teilschrittes erfolgte die Zusammenarbeit mit Dr. Derek Rogge vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt. Um den Anforderungen an unterschiedliche Beleuchtungscharakteristika gerecht zu werden, wurde ein neues

Datenangleichungsverfahren von Dr. Rogge angewendet um die Flugdaten aus dem Jahr 2010 für die Mosaikierung vorzubereiten.

Das GFZ-Potsdam unterstütze das Projekt in Person von Dr. Karl Segl bei der Simulation der EnMAP-Daten mit Hilfe des EnMAP-Simulators. Somit konnten aus den AISA Eagle+ Daten EnMAP-ähnliche Szenen erstellt werden.

Die Ableitung von sub-pixel Informationen aus den EnMAP-Szenen erfolgte über das Programm WASI-2D von Dr. Peter Gege vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt. In Zusammenarbeit und Rücksprache mit Dr. Gege konnten erfolgreich Informationen über die Tiefe, sowie die anteilige Zusammensetzung der Pixel mit unterschiedlichen Spezies von Makrophyten extrahiert werden.

II. DETAILLIERTE DARSTELLUNG

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1. ERGEBNISSE DER FELDKAMPAGNEN UND RÜCKSCHLÜSSE AUS DER PROZESSIERUNG

Im Verlaufe des Projektes konnten erfolgreich zwei Datengewinnungskampagnen im Jahr 2010 und 2011 durchgeführt werden. Insgesamt wurden vier spektral hochaufgelöste AISA Eagle+ Szenen aufgenommen. Diese Szenen wurden nachfolgend daraufhin analysiert, ob sie für eine EnMAP-Simulation geeignet sind. Die zweite Szene aus dem Jahr 2010 konnte aufgrund einer zu großen Wolkenbedeckung nicht genutzt werden, ebenso die erste Szene aus dem Jahr 2011, welche einen zu kleinen Teil des Untersuchungsgebietes abdeckte. Folglich wurden also zwei Szenen, jeweils eine aus dem Jahr 2010 und eine aus dem Jahr 2011, verwendet um aus ihnen EnMAP-ähnliche Daten zu simulieren. Die Simulation der Szenen wurde mit dem EnMAP end-to-end Simulation Tool (EeteS) durch das GFZ Potsdam durchgeführt (Segl et al. 2012, Segl et al. 2010, Guanter et al. 2009). Die beiden Szenen unterscheiden sich voneinander durch einen unterschiedlichen Wasserstand während der Datenaufnahme. Die Daten von 2010 wurden bei Tideniedrigwasser aufgenommen und die Daten von 2011 bei Tidehochwasser. Als weiterer Unterschied ist ein neues Konzept für die Lageplanung der Flugstreifen zu benennen, welches bei der Kampagne 2011 erstmals umgesetzt wurde (siehe 2.1.3).

Die Bearbeitungsschritte, die während der Datenprozessierung durchgeführt wurden, um EnMAP-ähnliche Daten aus den AISA Eagle+ Daten zu simulieren zu können, sind in Abbildung 1 dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der Prozessierung ist in Uhl et al. (2013) beschrieben. Entgegen den Zeitplanungen im Projektantrag waren einige Arbeitsschritte bei der Datenprozessierung zeitaufwändiger, als dies ursprünglich veranschlagt gewesen ist. Hierbei sind vor allem die stark variierenden Beleuchtungen in den Flugstreifen im Jahr 2010 zu benennen. Bei diesen konnte eine starke Zunahme der gemessenen Reflektanzen hin zu den Rändern der Flugstreifen festgestellt werden. Die für eine Simulation von EnMAP-Daten notwendige Mosaikierung konnte mit den Daten jedoch nicht durchgeführt werden, ohne diese Beleuchtungsunterschiede vorher zu korrigieren. Aus diesem Grund haben wir ein Verfahren entwickelt, welches die Beleuchtungsunterschiede durch die Analyse der einzelnen Flugstreifen korrigieren kann. Dazu wird in jedem Flugstreifen über homogenen Wasserflächen ein Korrektur-Gainwert-file berechnet, anhand dessen die Flugstreifen gainkorrigiert werden

können. Eine Offset-Korrektur musste nicht durchgeführt werden, da ein Offset als Ursache ausgeschlossen wurde. Das Programm für die Verrechnungen (GainCorr) wurde in IDL programmiert. Durch dieses Programm konnten wir schlussendlich die Belichtungszunahme zu den Flugstreifenrändern hin korrigieren und aufzeigen, dass dieses Artefakt spalten- und wellenlängenabhängig ist (Abbildung 2).

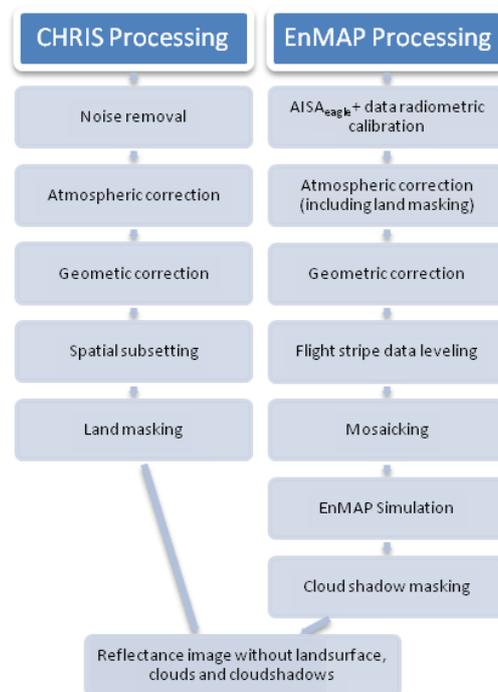


ABB. 1: ÜBERSICHT ÜBER DIE DURCHFÜHRTEN ARBEITSSCHRITTE BEI DER PROZESSIERUNG DER DATEN (UHL ET AL. 2013)

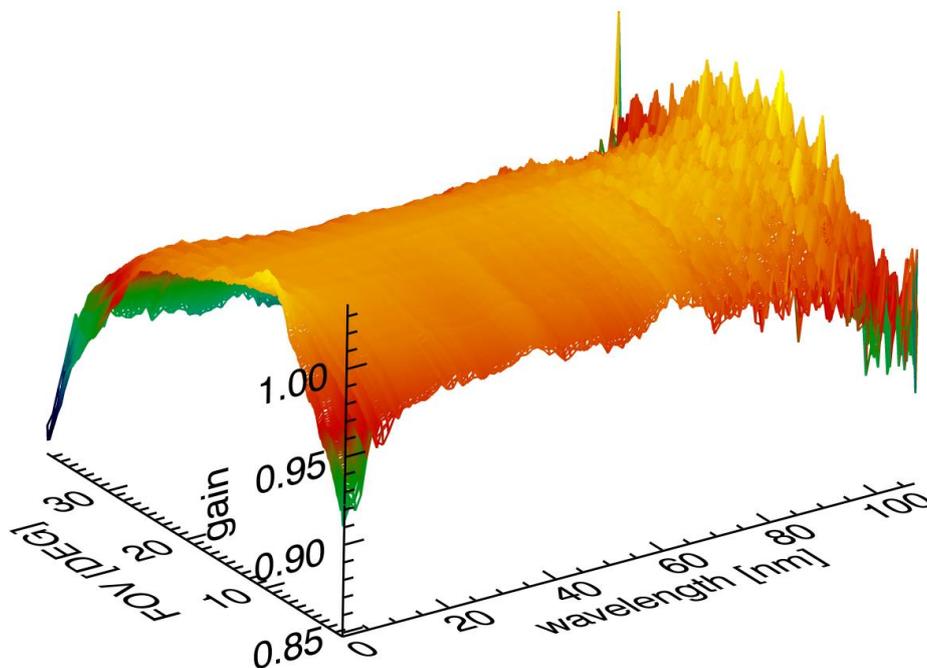


ABB. 2: KORREKTUR-GAINWERT-FILE DES FLUGSTREIFENS 1540 AUS DER KAMPAGNE 2010

Die Detektion der Küstenlinie und die daran anschließende Ausmaskierung der Landflächen war Teil der Atmosphärenkorrektur im Programm MIP (Heege et al. 2004). Da im Programm MIP die Landfläche eher überschätzt wurde und MIP im späteren Verlauf des Projekts nicht für die Arbeiten mit den EnMAP-simulierten Daten genutzt wurde, haben wir die Küstenlinie zusätzlich über spektrale Rückweisungswerte in EnMAP Band 53 (712 nm) bestimmt. Dieses Vorgehen ist sehr einfach durchzuführen, bedarf aber Ortskenntnis und die Genauigkeit beim Setzen des Rückweisungswertes ist stark vom Anwender abhängig. Für künftige EnMAP-Daten ist zu erwarten, dass Informationen aus Bändern größerer Wellenlänge besser für die Land-Wasser-Trennung geeignet sind. Leider konnten wir entsprechende Analysen nicht im Rahmen dieses Projektes durchführen, da die Bänder über 712 nm aufgrund starken Rauschens während der Prozessierung entfernt werden mussten.

Während der Kampagnen wurden umfangreiche Bodendaten im Untersuchungsgebiet erhoben, welche im Labor ausgewertet und in ein Geoinformationssystem übertragen wurden. Im Eulitoral wurden die vorkommenden Habitate kleinräumig biologisch kartiert und per GPS eingemessen. Die Habitatkarten und weitergehende Informationen zu den erfassten Habitaten sind in Oppelt et al. (2012) veröffentlicht. Von einem Forschungsschiff aus wurden begleitend zur Überfliegung Wasserproben entnommen, welche später im Labor auf den Chlorophyllgehalt, Schwebstoffe (SPM), gelöste organische Stoffe (CDOM), organischen Kohlenstoff (CORG) und den Gelbstoffgehalt analysiert wurden. Ebenfalls vom Schiff aus wurde die Sichttiefe mit einer Seccischeibe gemessen und wurden Irradiance Messungen mit einem Ramses von Trios durchgeführt. Taucher des AWI haben entlang mehrerer georeferenzierter Transekte, welche die wichtigsten Vegetationsvorkommen erfassten, in einem Abstand von 6 Metern Kartierungen durchgeführt. Durch die Verwendung einer semi-quantitative Methode mit sechs Bedeckungsklassen sammelten sie Informationen über das Vorkommen/die Abwesenheit von Brauntangen und Rotalgen und das Substrat. Mittels eines Tiefenmessers (Seemann Sub) erfassten sie zusätzlich die Tiefe an den einzelnen Messpunkten. Auszüge aus den Messungen der Kampagne 2010 sind beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt. Weitergehende Informationen zu den Bodendaten finden sich in Geisler et al. (2012) und Uhl et al. (2013).

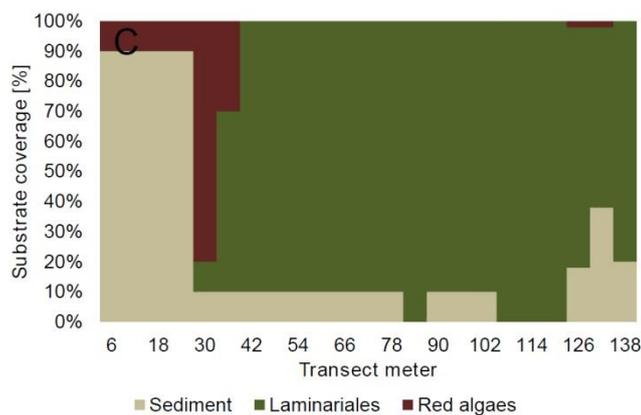
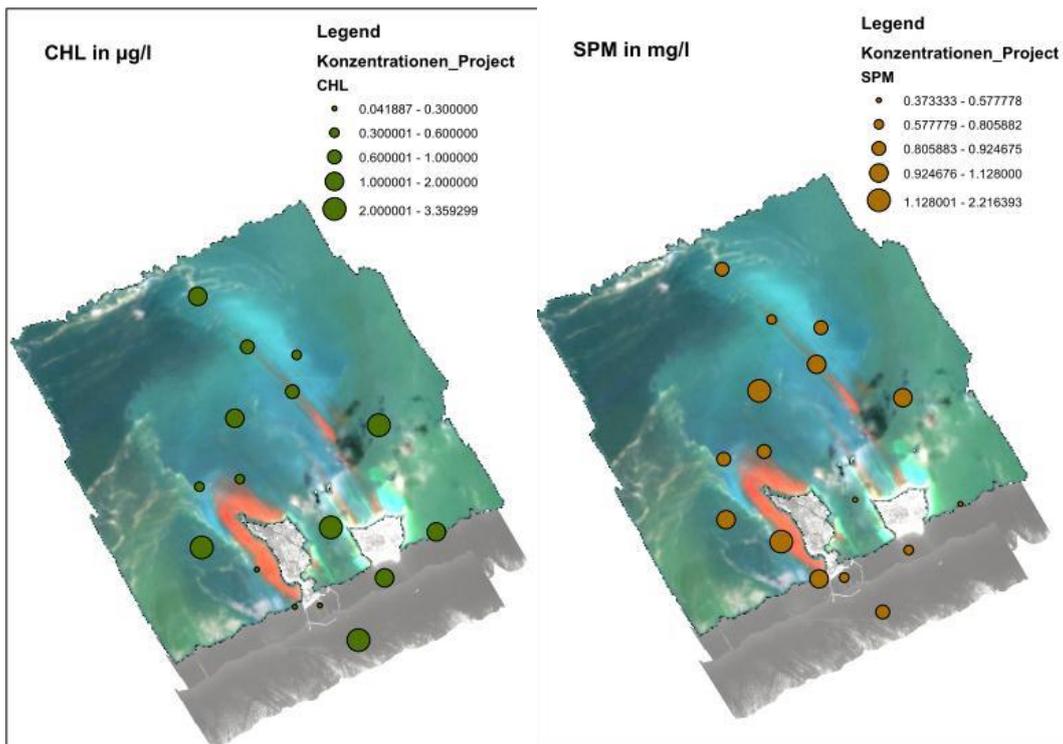


ABB. 3: ERGEBNISSE DER SPM-UND CHL-MESSUNGEN UND BEISPIEL DER MESSERGEBNISSE EINES TAUCHTRANSEKTES DER KAMPAGNE 2010 (DÖRNHÖFER 2013)

Neben den hochaufgelösten AISA Eagle+ Daten standen der Forschungsgruppe zusätzlich zwei Szenen des satellitengestützten Sensors CHRIS/Proba im mode2 vom 4 September 2010 und vom 7 April 2013 zur Verfügung. Die Szene aus dem Jahr 2013 konnte aufgrund einer zu starken vertikalen Streifung nicht ausreichend genug korrigiert werden, damit sie für die Analyse von Küstenzonen geeignet ist. Auch der Datensatz von 2010 war durch starke Verstreifung und hohes Rauschen gekennzeichnet, jedoch nicht so stark wie bei den Daten von 2013. Dadurch war es möglich, anhand dieser Szene Indizes zur Detektion von Makroalgen zu testen (Siehe 2.1.2.). Für die Ableitung der Bathymetrie, die Ableitung von Parametern der Wassersäule und die Einbindung in ein Bio-optisches Modell waren diese Daten jedoch nicht geeignet. Weitere Details zur Prozessierung von CHRIS/Proba sind in Uhl et al. (2013) beschrieben.

2.1.2. AUFBAU EINES HABITATKLASSENKONZEPTES UND ENTWICKLUNG EINES STANDARDISIERTEN AUSWERTEVERFAHRENS ZUR IDENTIFIKATION VON SUBLITORALEN MARINEN MAKROPHYTEN

Das nachfolgend dargestellte Habitatklassenkonzept und der steigungsbasierte Klassifikationsansatz sind Teil der sich in Vorbereitung befindenden Dissertation von Herrn Uhl und werden in einer sich in Arbeit befindenden Veröffentlichung zeitnah dem Fachpublikum zur Verfügung gestellt.

HABITATKLASSENKONZEPT

Einen Forschungsschwerpunkt im Projekt bildete die Entwicklung eines Ansatzes für die Klassifikation sublitoraler, mariner Makrophyten. Die Datenbasis, anhand derer die Grundlage des Verfahrens entwickelt wurde, sind 40000 Algenspektren, welche im Jahr 2010 mit einem ASD Laborspektrometer (350–2500 nm; Analytical Spectral Devices, 2008) auf Helgoland aufgenommen wurden. Dabei wurden die wichtigsten bestandsbildenden Arten gesammelt, im Labor in Mischung gebracht und über einen Zeitraum von 4 Stunden spektral aufgezeichnet (Tabelle 2). Diese Spezies gehörten zu den Algengruppen der Braunalgen, der Rotalgen und der Grünalgen. Es wurden sowohl Mischungen von Spezies der gleichen Gruppe, als auch unterschiedlicher Gruppen untersucht.

Alge 1	Alge 2
Fucus serratus (Braunalge)	Fucus vesiculosus (Braunalge)
Fucus serratus (Braunalge)	Ascophyllum nodosum (Braunalge)
Fucus serratus (Braunalge)	Laminaria digitata (Braunalge)
Fucus serratus (Braunalge)	Sargassum muticum (Braunalge)
Sargassum muticum (Braunalge)	Laminaria digitata (Braunalge)
Fucus serratus (Braunalge)	Mastocarpus stellatus (Rotalge)
Fucus serratus (Braunalge)	Ulva lactuca (Grünalge)
Mastocarpus stellatus (Rotalge)	Ulva lactuca (Grünalge)
Mastocarpus stellatus (Rotalge)	Chondrus crispus (Grünalge)
Ulva lactuca (Grünalge)	Ulva [Enteromorpha] sp. (Grünalge)

TAB. 2: UNTERSUCHTE ALGENKOMBINATIONEN UND DEREN ZUGEHÖRIGE GRUPPEN (UHL ET AL. 2013)

Die Analysen der Labordaten zeigten, dass die Entmischung von Spezies derselben Algengruppe nur bedingt möglich ist, da sich die spektralen Charakteristika aufgrund gleicher akzessorischer Pigmente zu ähnlich sind. Sehr gute Ergebnisse wurden allerdings bei der Unterscheidung von Spezies unterschiedlicher Gruppen erreicht. Diese konnten erfolgreich in Mischungsverhältnisschritten von 25% unterschieden werden. Über das BS-plot Verfahren konnten die Wellenlängenpaare ermittelt werden, deren kombinierte Informationen (in Form von Steigungen) eine besonders hohe Eignung für die Entmischung der untersuchten Algengruppen haben (Tabelle 3; Uhl et al. 2013). Die Analyse ergab weiterhin, dass die Labordaten durch ein

auf Steigungen basierendes lineares Entmischungsverfahren besser in ihre Bestandteile zerlegt werden können, als dies durch herkömmliche Verfahren möglich ist. Weitere Informationen zu Laboraufbau, Auswertungsmethodik und deren Ergebnissen sind in Uhl et al. (2013) veröffentlicht.

Zu unterscheidende Gruppen	Steigungen
Braun- und Grünalgen	519 nm–550 nm; 569 nm–601 nm
Grün- und Rotalgen	520 nm–667 nm; 537 nm–600 nm
Rot- und Braunalgen	563 nm–600 nm; 547 nm–647 nm

TAB. 3: BESONDERS GEEIGNETE WELLENLÄNGENPAARE FÜR DIE SPEKTRALE ENTMISCHUNG VON ALGENGRUPPEN (UHL ET AL. 2013)

Basierend auf den Ergebnissen aus den Laboranalysen wurde im nächsten Schritt geprüft, ob sich die drei Algengruppen über die Verwendung von Steigungen auch in den eulitoralischen Bereichen differenzieren lassen. Die Analysen erfolgten zuerst auf den räumlich hochaufgelösten AISA eagle+ Daten. Das Ergebnis der Analysen zeigte, dass sich nicht nur rot- grün- und braunalgendominierte Habitate unterscheiden lassen, sondern auch ein Transithabitat und zwei von unterschiedlichen Braunalgen dominierte Habitate (Abbildung 4; Oppelt et al. 2012).

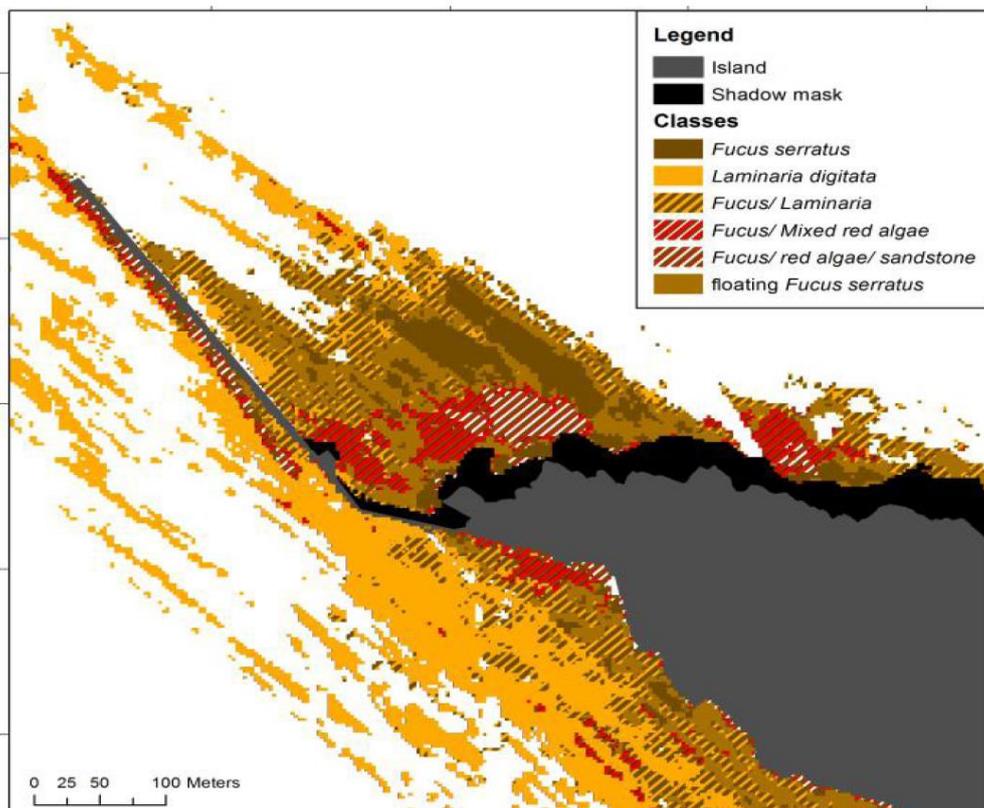


ABB. 4: ERGEBNIS EINER K-MEANS KLASSIFIKATION BASIEREND AUF SPEKTRALEN STEIGUNGSBÄNDERN (OPPELT ET AL. 2012)

Nachfolgend konnte dieser Ansatz auch erfolgreich auf die eulitoralischen Regionen in den EnMAP-Daten übertragen werden, die Ergebnisse unterschieden sich jedoch von den hochaufgelösten

AISA-Daten. So konnten rotalgenbeeinflusste Habitate nicht mehr unterschieden werden und auch das Transithabitat war nicht mehr unterscheidbar. Folglich konnten anhand der EnMAP-Daten im Eulitoral drei Habitate unterschieden werden:

1. Von Grünalgen dominierte Habitate
2. Von den Braunalgen der Fucales dominierte Habitate
3. Von den Braunalgen der Laminariales dominierte Habitate

Entsprechend dem Antrag war der nächste Schritt eine Übertragung des Verfahrens auf die sublitoralen Bereiche des Untersuchungsgebietes. Mehrere Gründe führten dazu, dass der entwickelte Ansatz im Sublitoral keine zufriedenstellenden Erfolge erbrachte. Zum Einen tritt im Untersuchungsgebiet die Klasse der Grünalgen im Sublitoral kaum auf. Zum anderen sind die Rotalgen häufig ein Unterwuchs der Brauntange und wachsen, wenn sie alleinstehend auftreten, hauptsächlich unterhalb der Sichttiefe. Da die Brauntange, welche die Kelpwälder bilden, untereinander spektral nicht unterscheidbar waren, erfolgt im Sublitoral also die Einteilung in Kelp- und nicht Kelp.

KLASSIFIKATION VON SUBLITORALEN MARINEN MAKROPHYTEN

Das im vorhergehenden Unterkapitel beschriebene Habitatklassenmodell stellt die Grundlage für das nachfolgende Klassifikationsverfahren dar. Neben einem atmosphärisch korrigierten Datensatz muss zusätzlich eine äußerst genaue Maske des Untersuchungsgebietes erstellt werden. Da das vorgestellte Verfahren ohne präzise Masken nicht funktioniert, wird nachfolgend zuerst die Maskierung noch einmal näher erläutert um anschließend das Klassifikationsverfahren zu spezifizieren.

Die angewendete Maske muss Wolken, Wolkenschatten, optisch tiefes Wasser, Landflächen und anthropogene Objekte (z.B. Schiffe) ausmaskieren. Im Projekt konnten die Bereiche mit optisch tiefem Wasser erfolgreich durch Tiefenkarten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ausmaskiert werden. Wir entschieden uns dabei für die 5 m Tiefenlinie, da diese den 6 m Sichttiefe am nächsten lag. Die Landmaske wurde entsprechend dem in Kapitel 2.1.1. erklärten Grenzwertverfahren ausmaskiert. Dabei war ein zusätzlicher Gewinn, dass mit diesem Verfahren zeitgleich auch Schiffe erfolgreich ausmaskiert werden konnten. Während die Detektion und Ausmaskierung von Wolken Teil der Atmosphärenkorrektur von MIP war, mussten Wolkenschatten durch die Anwendung eines weiteren Verfahrens detektiert und ausmaskiert werden. Dazu konnte der Cloud Shadow Detection Index (CSDI, Amin et al. 2013), welcher nicht für heterogene Küstengewässer, sondern für open ocean Anwendungen konzipiert ist, abgewandelt und erfolgreich eingesetzt werden. Dazu war es lediglich notwendig, die Größe des Kernels für EnMAP auf 67x67 Pixel anzupassen.

Entsprechend dem Habitatklassenkonzept ist der erste Schritt der Klassifikation die Unterteilung der Flächen in „algenbewachsene Flächen in Eulitoral und flachem Sublitoral“ (0m bis ~ 2m) und das tiefe Sublitoral (~2m bis 5m). Für die Trennung ist ein eigens entwickelter Index, das Algae Chlorophyll Absorption Integral (ACAI, Uhl et al. 2013), zuständig. Dieser Index berechnet im Wellenlängenbereich von 645 – 712 nm das Flächenintegral zwischen dem Spektrum und einer Hüllkurve (Abb. 5). Positive Werte weisen dabei auf das Vorkommen von Makroalgen hin. Für die Trennung von Algen in flachen Küstenbereichen und den tiefen sublitoralen Flächen, muss der Grenzwert an die jeweilige Szene angepasst werden. Bei unseren Datensätzen lag der Wert zwischen 1500 und 3000.

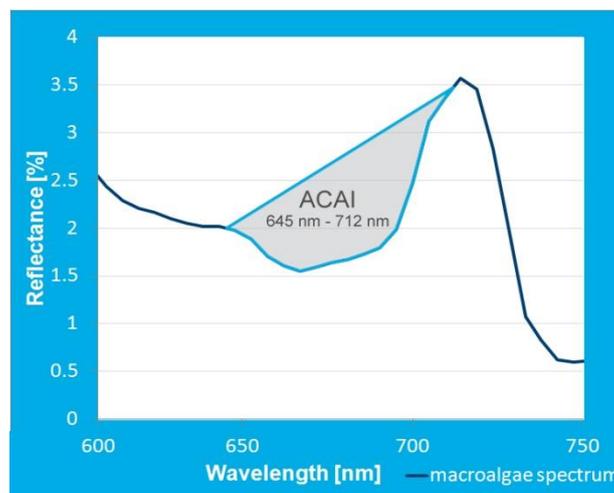


ABB. 5: ALGAE CHLOROPHYLL ABSORPTIONS INTEGRAL (ACAI).

Unter der Voraussetzung, dass der ACAI-Grenzwert bis an sein äußerstes Limit für die Detektion von Makroalgen ausgereizt wird, lassen sich auch Algen in tiefer liegenden Bereichen erfassen. Die Justierung des Grenzwertes bedarf in diesem Fall allerdings sehr guter Gebietskenntnis, weshalb dieses Vorgehen für das Gesamtklassifikationsverfahren nicht gewählt wurde. Es soll trotzdem darauf hingewiesen werden, dass der ACAI auch als eigenständiges Verfahren zur Erfassung von Kelp-Vorkommen genutzt werden kann (Abbildung 6). Die Algendetektion mittels Indizes ist das einzige Verfahren, welches auch auf CHRIS-Daten zufriedenstellende Ergebnisse lieferte (Uhl et al. 2013).

Nachdem die Bereiche des Eulitorals und des flachen Sublitorals durch den ACAI vom tiefen Sublitoral getrennt wurden, werden diese anschließend unabhängig voneinander durch abweichende Verfahren klassifiziert. Für das Eulitoral und flache Sublitoral werden zuerst fünf Steigungsbänder aus den EnMAP-Reflexionen berechnet, welche die spektralen Charakteristika der Makroalgen erfassen (Tabelle 4). Diese ausgewählten Steigungsbänder sind das Ergebnis der Laborstudien (Uhl et al. 2013) und deren Übertragung und Anpassung auf die EnMAP-Daten.

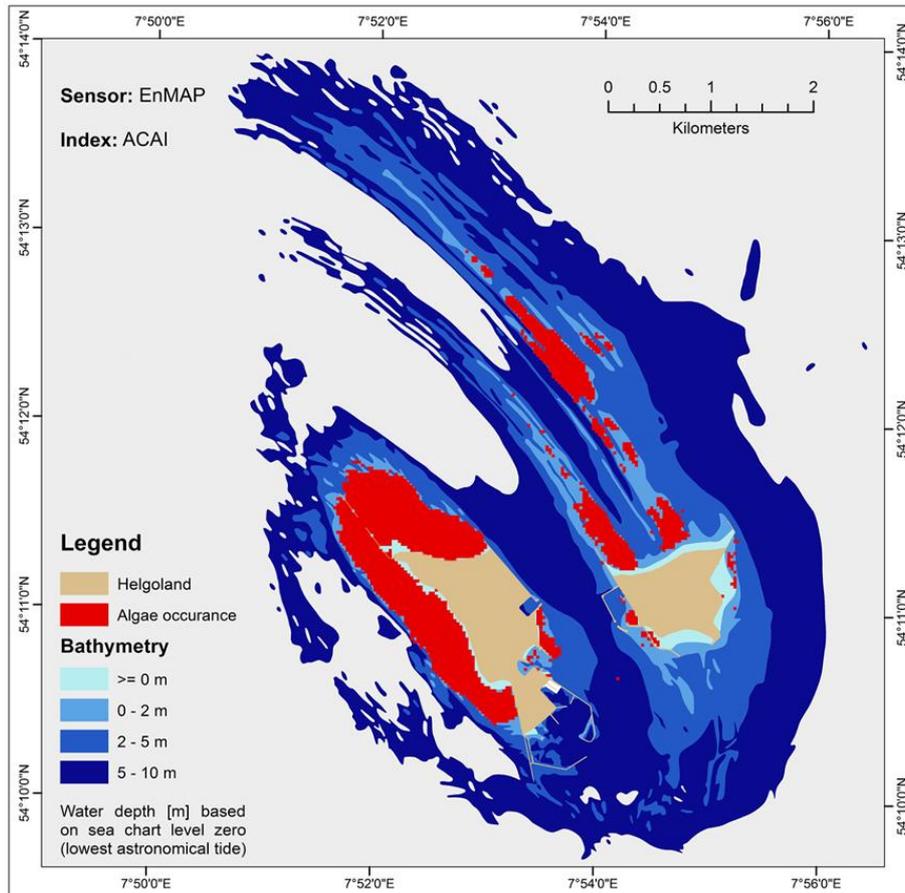


ABB. 6: KLASSIFIKATION VON KELP MITTELS DES ACAI (UHL ET AL. 2013)

Wellenlängenbereich	Algenfamilie
573 – 587 nm	Braunalgen
573 – 587 nm	Grünalgen
564 – 602 nm	Braunalgen
518 - 550 nm	Braunalgen
453 - 490 nm	Grünalgen

TAB. 4: WELLENLÄNGENBEREICHE DER STEIGUNGSBÄNDER UND DIE ALGENFAMILIE, DIE IN DIESEM BEREICH ABGETRENNT WERDEN KANN.

Mittels der fünf Steigungsbänder kann nachfolgend durch eine k-Means-Klassifikation (Klasseneinteilung durch Hauptkomponentenanalyse und unbegrenzte Iterationen) eine Unterteilung in drei Klassen vorgenommen werden:

- Grünalgendominierte Habitate
- Von Braunalgen der Gattung Fucales dominierte Habitate
- Von Braunalgen der Gattung Laminariales dominierte Habitate in flachen Regionen (Kelp)

Im tiefen Sublitoral können entsprechend des Habitatklassenkonzeptes nur Kelp- und nicht-Kelp unterschieden werden. Diese zwei Klassen Problematik wurde im Rahmen des Projektes bisher durch zwei unterschiedliche Vorgehensweisen gelöst. Zum einen war es möglich, erneut den

ACAI anzuwenden und durch eine Absenkung des Grenzwertes auch tiefer liegende Algen zu erfassen. Ein Grenzwert von Null lieferte bei diesem Vorgehen gute Ergebnisse. Zum anderen wurde ein Steigungsbasierter Index (SBI) verwendet. Dieser Index nutzt zwei Steigungsbänder (bei 564 – 602 nm und 518 - 550 nm). Durch das Setzen von Grenzwerten können die Kelpvorkommen von den Bereichen ohne Brauntange getrennt werden. Weitere Details zu den im Verlauf des Projektes entwickelten und getesteten Indizes können Uhl et al. 2013 entnommen werden.

Im tiefen Sublitoral wird durch die Klassifikation folglich zwischen zwei Klassen unterschieden:

- Laminarien (Kelp)
- Kein Kelp

Das vorgestellte Klassifikationsverfahren ermöglicht nicht nur die Detektion von Kelpvorkommen in trüben Küstengewässern (case II), sondern ermöglicht auch die Unterscheidung zwischen Grünalgenhabitaten und zwei Habitaten, die von unterschiedlichen Spezies der Braunalgen dominiert werden. Die Vorkommen im Untersuchungsgebiet wurden dabei sehr gut erfasst (siehe Abbildung 7). Das Ziel des Projektes war die Detektion von Kelp im Sublitoral. Die Validierung der Flächen erfolgte anhand von Tauchkartierungen, aus denen sich für insgesamt 45 Pixel der EnMAP-Auflösung Validierungsdaten ableiten ließen. Die Benutzergenauigkeit für die Klasse Laminarien (Kelp) beträgt 97,7%. Die abgeleitete Kelp-Bedeckung umfasst 248,31 ha. Der wichtigste Vorteil des vorgestellten Verfahrens der Klassifikation über Steigungen ist, dass diese schwankenden Wasserständen gegenüber relativ stabil sind.

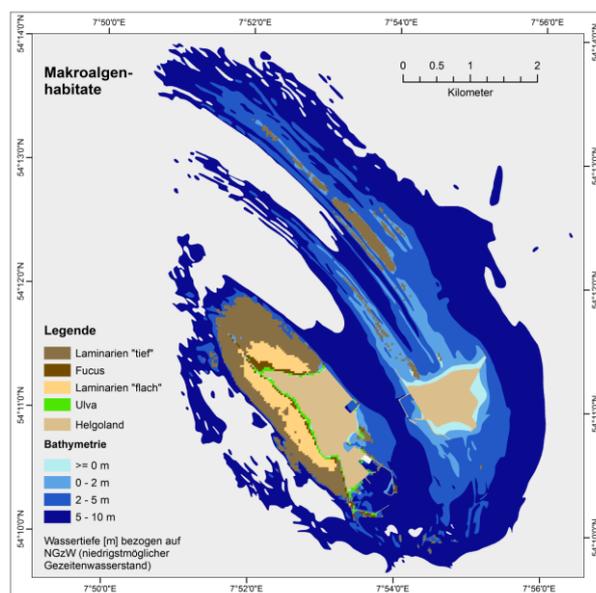


ABB. 7: KLASSIFIKATIONSERGEBNIS MIT MAKROMAP ANHAND DER ENMAP-DATEN FÜR DAS JAHR 2011

2.1.3. ENTWICKLUNG EINES FLUGPLANUNGSTOOLS

Bei der Prozessierung der Daten aus der Flugkampagne von 2010 zeigten sich zwei Eigenschaften in den Daten, die sich als erschwerend für die Prozessierung herausstellten. Zum einen handelte es sich um eine Beleuchtungszunahme zu den Rändern der Flugstreifen hin. Diese Beleuchtungszunahme war nicht bei jedem Flugstreifen gleich, sondern veränderte sich mit dem Stand der Sonne zur Flugbahn. Auch innerhalb eines Flugstreifens war die Beleuchtungszunahme zu den Flugstreifenrändern hin wellenlängenabhängig (siehe 2.1.1.). Die zweite Besonderheit stellte die Intensität des Sunglints dar, welcher vor allem bei den südlichsten Flugstreifen der 2010er Kampagne sehr stark war. Bei der ersten Kampagne wurden alle dreizehn Flugstreifen parallel zueinander geflogen (Abbildung 8). Die Ausrichtung der Flugstreifen war dabei so gewählt, dass sich die Sonne während der Aufnahme des zentralen Flugstreifens exakt hinter dem Sensor befand. Folglich war der zentrale Flugstreifen nur sehr gering von Sunglint betroffen, während hingegen die Flugstreifen zu den Rändern hin aufgrund der Veränderung des Sonnenstandes in Ausrichtung zum Sensor hin verstärkt von Sunglint betroffen waren. Dieser Fakt bewirkte, dass die Beleuchtung der Flugstreifen unterschiedlich war und umfangreiche Korrekturen vor der Mosaikierung notwendig wurden.

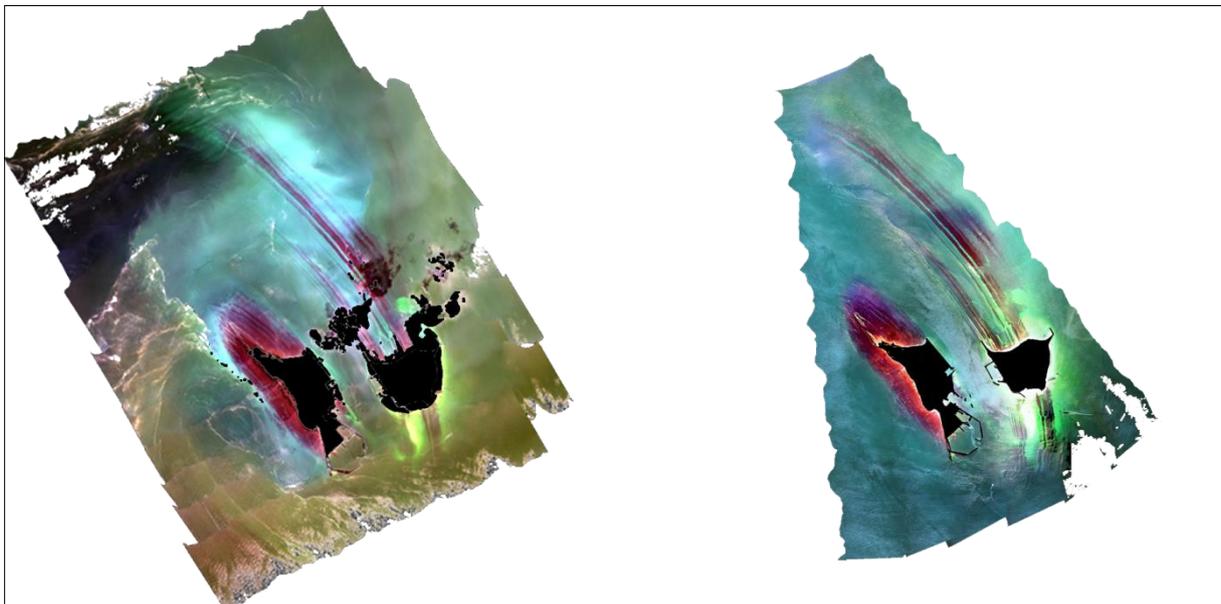


ABB. 8: MOSAIKIERTE FLUGSTREIFEN AUS DEN JAHREN 2010 (LINKS) UND 2011 (RECHTS)
(GESTRECKTE UND NACHBEARBEITETE ECHTFARBEN RGBS)

Als Konsequenz aus den Erfahrungen der ersten Flugkampagne entschlossen wir uns, für die Kampagne im Jahr 2011 ein Programm zu entwickeln, welches die Lage der Flugstreifen abhängig vom Sonnenstand berechnet. Durch dieses Programm ist es ermöglicht, jeden Flugstreifen mit derselben Ausrichtung des Sensors zur Sonne hin aufzunehmen. In der Folge werden die Flugstreifen dann nicht mehr parallel nebeneinander geflogen, sondern die Datenaufnahme erfolgt in einer Art Fächerform (siehe Abbildung 8). Für die Bedienung des

Programms werden lediglich die zentralen Koordinaten des Untersuchungsgebietes, einige Spezifikationen zu Sensor und Plattform, sowie der Zeitpunkt der Datenaufnahme nötig. Das Programm wurde in IDL umgesetzt und wird im Anschluss an eine erfolgreiche Veröffentlichung (für die EnMAP-Box) verfügbar sein. Das Flugplanungsprogramm ist Teil der sich in Vorbereitung befindenden Dissertation von Herrn Uhl.

Die erfolgreiche Anwendung des Programms spiegelt sich in verringerten beleuchtungsbezogenen Effekten und einer Verringerung des Sunlints in den Daten aus der Flugkampagne von 2011 wieder. Für die Mosaikierung war es zwar weiterhin notwendig, die Beleuchtungszunahme zu den Rändern der Flugstreifen hin zu korrigieren, aber es mussten weniger überstrahlte Pixel ausmaskiert werden.

2.1.4. EXTRAKTION VON INFORMATIONEN ZUR TIEFENVERTEILUNG

Für die Ableitung von Tiefeninformationen aus den Fernerkundungsdaten wurden im Verlaufe des Projektes zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Die Bathymetrie, welche durch die Verfahren berechnet wird, versteht sich nicht als eine Darstellung der Meeresbodentopographie, sondern spiegelt die Tiefe des Hauptreflektors im Wasserkörper wieder. Im Falle der von uns untersuchten Kelp-Vorkommen, entspricht dies z.B. der Höhe des Kelpwaldes.

Die aus den Fernerkundungsdaten abgeleitete Bathymetrie ist räumlich deutlich höher aufgelöst, als die Tiefeninformationen in amtlichen Seekarten. Dennoch sind die optischen Systeme nicht in der Lage, Tiefeninformationen aus optisch tiefen Gewässern abzuleiten. Für alle nachfolgenden Analysen wurde das Untersuchungsgebiet daher über Tiefengrenzen aus Seekarten des BSH eingegrenzt.

BATHYMETRIEABLEITUNG AUS ECHOLOTMESSUNGEN

Bei dem ersten untersuchten Ansatz wurden Tiefenmessungen mit dem Echolot Signalverarbeitungssystem RoxAnn (Mielck et al. 2013), mit den hyperspektralen EnMAP-Daten kombiniert. Dazu wurde ein Programm in IDL geschrieben, welches mittels linearer Regression die EnMAP-Szene bandweise mit den Tiefenmessungen kombiniert. Als Ergebnis wird unter Berücksichtigung der Regressionsparameter für jedes Band die Bathymetrie abgeleitet und ein Datensatz ausgegeben, welcher die gleiche Anzahl an Bathymetriebildern enthält, wie das Eingabebild Bänder hat. Zur Überprüfung der Genauigkeit wird zusätzlich die Regressionsstatistik ausgegeben, welche Informationen zu den verwendeten Tiefendaten, den in die Regression eingeflossenen Spektren, sowie den Korrelationskoeffizienten, die Steigung und das Offset für jedes Band, enthält. Die gewählte Herangehensweise sollte es ermöglichen, Bänder innerhalb der EnMAP-Daten zu bestimmen, die für die Ableitung von

Tiefeninformationen besonders geeignet sind. Der größte Teil der verfügbaren RoxAnn-Daten befindet sich allerdings in einer Tiefe unterhalb von 6 m, was mehr als der Sichttiefe zum Zeitpunkt der Datengewinnung entspricht. Diese Daten konnten nicht für das gewählte Verfahren verwendet werden. Unter Einbeziehung der Tideninformationen während der Datenaufnahme wurden die Messungen auf Tiefen bis 6 m reduziert. Ein Resampling der Daten auf die 30 x 30 m räumliche Auflösung von EnMAP ergab insgesamt eine Anzahl von 270 Messpunkten (2010) und 513 Messpunkten (2011), die in die Regressionsmodelle einbezogen werden konnten. Da der Untergrund im Untersuchungsgebiet kleinräumig stark variiert, wurden jeweils sehr unterschiedliche Messwerte innerhalb eines Pixels zu einem Einzelwert gemittelt. Um die Auswirkung der Mittelung und damit auch den Einfluss der geringeren räumlichen Auflösung von EnMAP zu bewerten, wurde die gleiche Methode auch auf die AISA-Daten angewendet. Die wichtigsten Ergebnisse sind nachfolgend aufgelistet:

- Die Wellenlängenbereiche, welche in den einzelnen Mosaiken die besten Ergebnisse für die linearen Tiefenmodelle lieferten sind in Tabelle 5 zusammen mit dem höchsten R-Wert angegeben.

Daten 2010		Daten 2011	
AISA (N = 2209)	EnMAP (N = 270)	AISA (N = 10240)	EnMAP (N = 513)
526 - 539 nm (R = -0.65)	503 - 538 nm (R = -0.46)	532 - 545 (R = -0.16)	528 - 548 nm (R = -0.15)
700 - 709 nm (R = 0.58)	705 - 712 nm (R = 0.53)	698 - 703 (R = 0.17)	770 - 816 nm (R = 0.38)

TAB. 5: WELLENLÄNGENBEREICHE MIT BESONDERER EIGNUNG ZUR ABLEITUNG VON TIEFENINFORMATIONEN UND DEREN GENAUIGKEIT (R) FÜR LINEARE MODELLE

- Aufgrund der starken Heterogenität der Untergründe im Untersuchungsgebiet und des sehr strukturierten Untergrundes können mittels des linearen Ansatzes nur grobe Informationen über die Tiefenverteilung aus den Fernerkundungsdaten abgeleitet werden. Während die absoluten Werte der Tiefe nur als relative Orientierung gewertet werden dürfen, wird die Struktur im Raum sehr gut erfasst. Außerdem ähneln sich in allen Szenen die Wellenlängenbereiche sehr stark, welche die höchsten R-Werte bei den linearen Modellen erreichen (siehe Tabelle 5).
- Auffallend sind die Übereinstimmungen der Bänder mit der höchsten Güte mit den Wellenlängen, in denen sich auch Makroalgen sehr gut detektieren lassen. Das Projektteam erklärt diesen Zusammenhang über die Verteilungscharakteristika der Brauntange. Diese wachsen bevorzugt auf den flachen Gesteinsrippen, weshalb davon ausgegangen werden muss, dass die Bathymetriemodelle sehr stark durch das Vorkommen von Makroalgen in den flachen Bereichen und deren Lichtabsorption beeinflusst sind. Diese These wird dadurch gestützt, dass im Wellenlängenbereich von 530 nm die Tiefe sehr gut bestimmt werden kann, wobei jedoch flache Bereiche in dieser Wellenlänge eine geringere Reflexion aufweisen, als die tiefen Regionen (Siehe Abbildung 9).

- Die Regressionsmodelle mit den Echolotdaten haben zwar keine direkte Ableitung der Tiefe ermöglicht, sie offenbaren aber die Wellenlängenbereiche, bei denen die EnMAP-Daten für die Ableitung der Bathymetrie besonders geeignet erscheinen.
- Die Analyse zeigte auch, dass die geringere räumliche Auflösung der EnMAP-Daten nur einen geringen Verlust der Genauigkeit gegenüber den hoch aufgelösten AISA-Daten mit sich bringt (Tabelle 4, Abbildung 9).

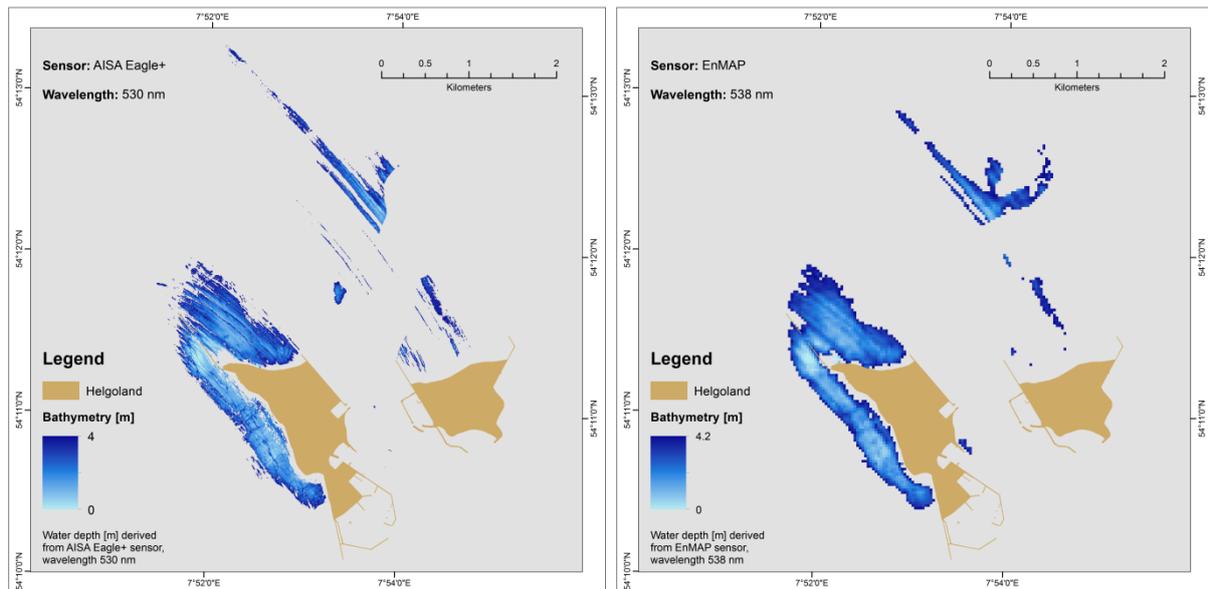


ABB. 9: DURCH EIN LINEARES MODELL ABGELEITETE BATHYMETRIE AUS AISA EAGLE+ UND ENMAP-DATEN AUS DEM JAHR 2010

BATHYMETRIE MIT BIO-OPTISCHEN MODELLEN

Die ersten Ableitungen der Bathymetrie im Verlaufe des Projektes erfolgten durch die Anwendung des Programmes MIP (i.e. WATCOR; Heege (2004)) auf den hochaufgelösten Flugstreifen von AISA eagle+. Für die analysierten Flugstreifen konnte dadurch die Bathymetrie abgeleitet werden. Dieser Ansatz konnte jedoch nicht auf die EnMAP-Szenen übertragen werden, da die Datenaufbereitung zu zeit- und kostenaufwändig gewesen wäre um sie im Rahmen dieses Projektes durchzuführen.

Die spektrale Entmischung mit bio-optischen Modellen in der Software WASI-2D enthält als einen wichtigen Modellparameter ebenfalls die Bathymetrie. Der Meeresboden um Helgoland ist stark strukturiert. Die variierenden Tiefen des Helgoländer Sublitorals resultieren aus der Rippelstruktur des felsigen Untergrundes. Die typische Struktur ist durch eine Abwechslung von schmalen Streifen geringer und großer Tiefe auch in den EnMAP deutlich zu erkennen (Abbildung 10). Die berechneten Wassertiefen weisen ein räumlich plausibles Muster auf. Die absoluten Werte am Rand des Prozessierausschnittes sind mit max. 3 m deutlich zu niedrig. Der Vergleich mit punktuell gemessenen Wassertiefen verstärkt eine Unterschätzung der Wassertiefe (RMSE: 2.5 m). Einen Erklärungsansatz liefern auch hier die Bereiche mit hoher

Algenbedeckung. Laminariales wachsen vom Boden aus bis zu 5 m in die Wassersäule herauf und bilden ein dichtes Blätterwerk (Steneck et al. 2002). Dieses wiederum kann die Eindringtiefe des Lichtes verringern und Unterschätzungen der Wassertiefe erklären.

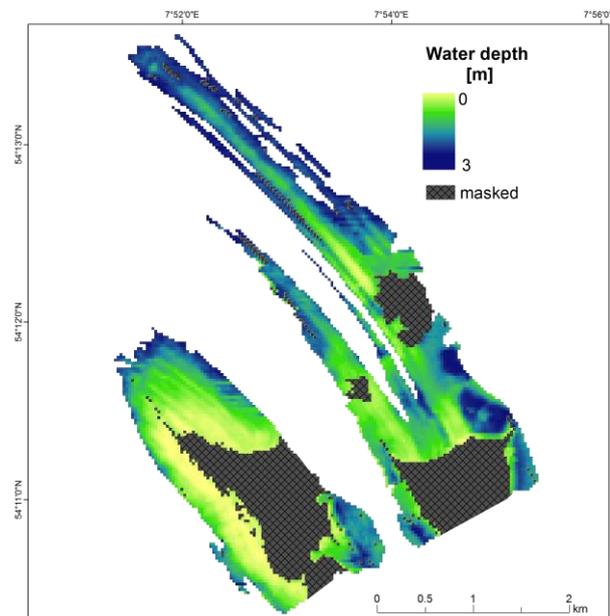


ABB. 10: BERECHNETE WASSERTIEFEN AUS DER ANWENDUNG BIO-OPTISCHER MODELLE DER SOFTWARE WASI-2D.

Da die absoluten Genauigkeiten der abgeleiteten Bathymetrie noch nicht groß genug sind, konnte die Fragestellung nach den Auswirkungen wechselnder Wasserstände auf die Klassifikationsergebnisse noch nicht genau geklärt werden.

2.1.6. ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENS ZUR NORMALISIERUNG DES WASSERSTANDES AUF ENMAP RASTERZELLENGRÖÖE

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in Hamburg erstellt Wasserstandsrechnungskarten für die deutsche Küste, die die räumliche Phasenverschiebung der Tide darstellen. Basierend auf diesen Karten haben wir zwei Programme entwickelt, welche in Kombination mit den zeitaktuellen Pegelmessungen für jedes EnMAP-Pixel im Untersuchungsgebiet zu einem gegebenen Zeitpunkt in Minuten-Schrittweite Informationen über die Tideschwankung berechnen können (tideapp; PNPapp). Anhand der Werte, die durch die Programme berechnet werden, ist es möglich, die aus den EnMAP-Daten abgeleitete Bathymetrie pixelweise auf ein einheitliches Bezugssystem (z.B. NN) zu korrigieren.

Die im Rahmen unserer Projektarbeit aus den EnMAP-Daten abgeleiteten bathymetrischen Karten sind im Verhältnis zu den sehr genauen Tidekarten zu ungenau, als dass eine Umrechnung auf NN zum aktuellen Zeitpunkt eine Verbesserung der Ergebnisse bewirkt hätte.

Die Programme tideapp und PNPapp werden daher als eine Option angesehen, bei künftigen Forschungsvorhaben die Qualität der Ergebnisse weiter zu verbessern.

2.1.7. ANWENDUNG EINES BIO-OPTISCHEN MODELLS IN KÜSTENNAHEN GEWÄSSERN ZUR ENTMISCHUNG VON ENMAP-MISCHPIXELN

Erste Analysen erfolgten – analog zu der Ableitung der Bathymetrie – mit dem Modell WATCOR auf den hochaufgelösten AISA eagle+ Daten. Die Ergebnisse zeigten, dass Bedeckungsgrade von Makroalgen auf Subpixelebene durch die Verwendung von bio-optischen Modellen abgeleitet werden können (Abbildung 11). Die Unterscheidung der Endmember Sediment und Laminaria (Kelp) lieferte zufriedenstellende Ergebnisse, weshalb dieser Ansatz mit einem anderen Modell auch auf den räumlich geringer aufgelösten EnMAP-Daten angewendet wurde.

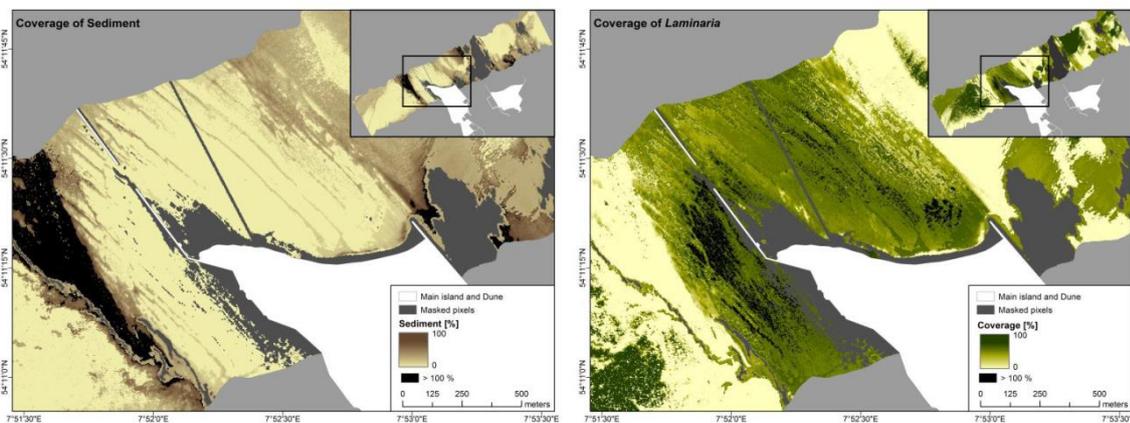


ABB 11: ERGEBNISSE AUS DER ANWENDUNG DER SOFTWARE MIP/WATCOR- ENTMISCHUNGS- ERGEBNISSE VON SEDIMENT UND LAMINARIA FÜR EINEN FLUGSTREIFEN AUS DEM JAHR 2010

Mit Hilfe der Software WASI-2D (Gege 2014) sind die 30x30 m aufgelösten, simulierten EnMAP Pixel (Datensatz 2010) für die Endmember Sediment und die vorherrschende taxonomische Ordnung der Laminariales entmischt worden. WASI-2D berücksichtigt in der spektralen Entmischung den Einfluss der Wassersäule auf das fernerkundlich gemessene Reflexionssignal der Wasseroberfläche. Die teilweise horizontalen Streifungen im Ergebnis resultieren aus der Initialisierung des Modellalgorithmus, welcher vom Entwickler (Gege 2014) kontinuierlich weiter entwickelt wird. Im Vergleich zu einer visuellen Abschätzung der Ausdehnung der Makrowalgenwälder aus EnMAP-Falschfarbendarstellungen und zur BSH Tiefenkarte zeigt sich ein plausibles Verteilungsmuster (Abbildung 12). In den flachen Bereichen existieren dichte Bedeckungen nahe 100 % von Laminariales. In den tieferen Bereichen sowie um die Düne beherrschen hohe Bedeckungsgrade nicht bewachsenen Untergrundes das Bild (Sediment). Allerdings zeigten sich die plausiblen Verteilungsmuster in einer quantitativen Validierung mithilfe von Tauchtransektdaten nicht. Bei einem 1:1 Vergleich der Bedeckungsgrade weisen Laminariales einen RMS-Fehler von 31 % und Sediment einen RMS-Fehler von 15 % auf.

Problematisch ist hierbei der Vergleich von *in situ* Messdaten, die nur einen kleinen Teil (< 10 %) eines EnMAP Pixels erfassen und zudem eine geringe räumliche Genauigkeit (25 m) (Pehlke und Bartsch 2008) haben. Trotz der niedrigen Gütemaße zeigt sich deutlich, dass die räumlich stark variablen Strukturen des Helgoländer Sublitorals in den entmischten EnMAP Pixeln plausibel wiedergegeben werden.

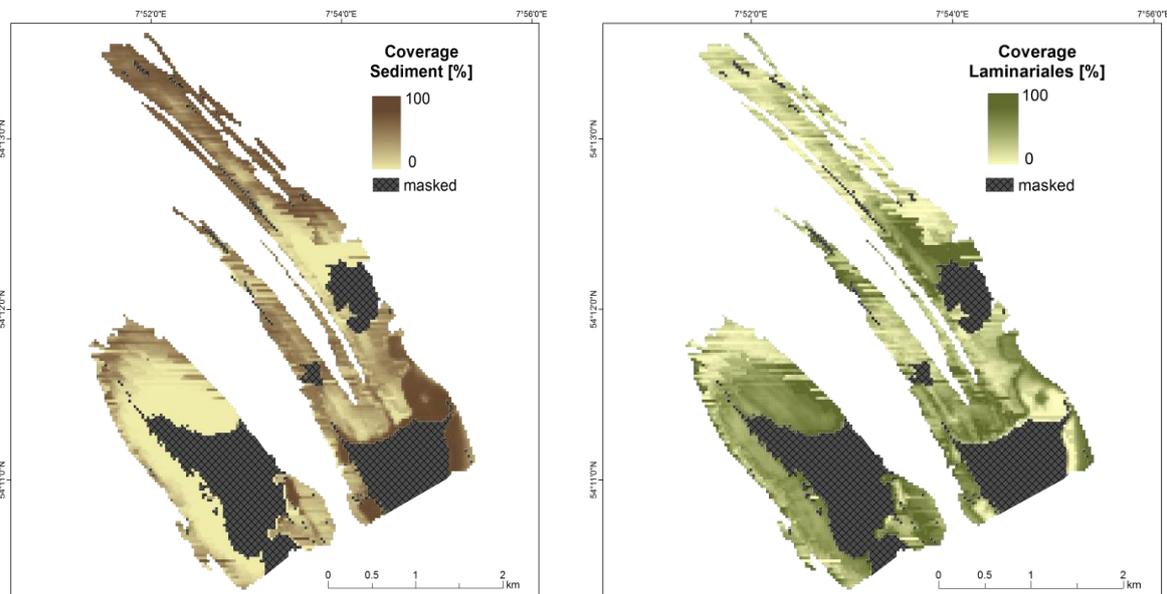


ABB 12: ERGEBNISSE AUS DER ANWENDUNG DER SOFTWARE WASI-2D. DIE SPEKTRALE ENTMISCHUNG DER ENDMEMBER LAMINARIALES UND SEDIMENT ERFOLGTE UNTER DER BERÜCKSICHTIGUNG DES EINFLUSSES DER WASSERSÄULE.

2.2. WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES

Position	Betrag in €
Personalkosten	72,654,27
Aufträge (z.B. FIELAX GmbH, EoMAP)	14000
Reisekosten	15209,73

TAB. 6: WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES

2.3. NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT

Den finanziell größten Posten des Projektes umfassten die Personalkosten. Der Umfang der geleisteten Arbeit entsprach den Anforderungen und die Ergebnisse des Projektes sind unter Berücksichtigung der Ausgangserwartungen angemessen. Das Projekt umfasste die systematische Aufarbeitung und Bewertung bisheriger Forschungen, die Begleitung und Kontrolle der Datenerhebung und -prozessierung, die Entwicklung eines neuen Konzeptes für die Klassifikation mariner Makrophyten, die Bewertung einzelner Faktoren sowohl der Untersuchungsgebiete (z.B. Bathymetrie, Wasserinhaltsstoffe) als auch der verwendeten Sensorik

(spektrale Auflösung, räumliche Auflösung), die Einarbeitung in die Programmiersprache IDL und die Umsetzung des neuen Verfahrens für die EnMAP-box. Ein weiterer Teil der Arbeit bestand in der Aufbereitung der Ergebnisse für Workshops und Konferenzen, sowie deren Präsentation. Im Hinblick auf den Verwertungsplan zu Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeiten, sowie der Vernetzung mit forschungstechnisch ähnlich ausgerichteten Einrichtungen, sind diese Arbeiten als notwendig einzustufen.

2.4. VORAUSSICHTLICHER NUTZEN, INSBESONDERE DER VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANS

Die Ergebnisse des Projektes sind als Grundlagenforschung für die Untersuchung von küstengebundenen Habitaten mittels hyperspektraler Satellitenfernerkundung zu betrachten. Aus Sicht der Projektbearbeiter zeigen die Ergebnisse einerseits das Potential der künftig verfügbaren Daten für die Fernerkundung von küstengebundenen Ökosystemen, aber es wurde auch deutlich, dass es vor allem in der Datenprozessierung noch weiteren Forschungsbedarf gibt.

- Die Erfahrungen aus dem Projekt KelpMAP leisten einen Beitrag für die künftige Erfassung von marinen Makrophyten auf globaler Skala. Dieses übergreifende Ziel ist im Hinblick auf den Klimawandel von besonderem Interesse.
- Die Ergebnisse zeigen, dass die trüben Küstenhabitats der Nord- und Ostsee durch EnMAP-Daten gemonitort werden können. Im Projekt zeigte sich, dass die Vorkommen sicher bis zu einer Tiefe von 3 m nachgewiesen werden können. Da die Sichttiefe (Secchi) mit 5 m bis 6 m ein noch größeres Potential verspricht, können durch künftige Forschungen die Tiefengrenzen für valide Ergebnisse eventuell noch erweitert werden.
- Über das Projekt konnte aufgezeigt werden, welche Prozessierschritte von Fernerkundungsdaten in küstengebundenen Habitats eines erhöhten Arbeitsaufwandes im Vergleich zu terrestrischen Anwendungen bedürfen. Diese Erfahrungen können in künftigen Projekten für ein verbessertes Zeitplanungsmanagement genutzt werden.
- Durch das entwickelte Klassifikationsverfahren in Kombination mit den künftigen hyperspektralen Satellitendaten sind Langzeitmonitoringvorhaben (z.B. in Helgoland) mit einem geringeren Aufwand an Personal und Zeit möglich, als bei vergleichbaren flugzeuggebundenen Kampagnen.
- Die Präsentation der Ergebnisse auf Konferenzen, bei Workshops und in wissenschaftlichen Artikeln hat dazu beigetragen, den wissenschaftlichen Diskurs zu fördern und es ist davon auszugehen, dass die theoretischen Ansätze (z.B. Ableitungen

und Steigungen anstelle von absoluten Reflexionen zu verwenden) auch weiterhin in der Community aufgegriffen werden.

- Als wegweisend kann die Herangehensweise verstanden werden, dass im Projekt versucht wurde, die Ergebnisse von Laborstudien auf die Realdaten eines Fernerkundungssystems zu übertragen. Intention war es dabei, unter Laborbedingungen die maximal möglichen Genauigkeiten einer Makroalgenentmischung zu ermitteln und nachfolgend die limitierenden Charakteristika von In-Situ-Daten vergleichend zu betrachten um ein geeignetes verfahren zu entwickeln.
- Die während der Projektphase erhobenen Fernerkundungs- und Geländedaten stehen in allen Prozessierungsstadien für zukünftige Analysen zur Verfügung und werden im Rahmen weiterer Projekte auch zukünftig noch genutzt.

2.5. WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES PROJEKTES DEM ZE BEKANNTGEWORDENE FORTSCHRITTE AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN

Dem ZE sind im Verlaufe des Projektes keine Fortschritte bekannt geworden, die projektrelevante Inhalte der hyperspektralen satellitengebundenen Fernerkundung entwickelt und/oder untersucht haben.

2.6. ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNG DES ERGEBNISSES NACH NR. 6

2.6.1. ERFOLGTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Oppelt, N.; Schulze, F.; Bartsch, I.; Doernhoefer, K.; Eisenhardt, I. (2012) Hyperspectral Classification Approaches for Intertidal Macroalgae Habitat Mapping: a Case Study in Heligoland. In: Optical Engineering, 51/111703, doi:10.1117/1.OE.51.11.111703

Oppelt, N.; Schulze, F.; Bartsch, I. (2012) Hyperspectral derivatives analysis for intertidal habitat mapping. SPIE Proc Vol. 8532 85320D-1 (SPIE Eur. Remote Sens., 23.-27.09.2012, Edinburgh (UK), CD-ROM, doi: 10.1117/12.965299.

Geisler, T.; Oppelt, T.; Heege, T. (2012) Accuracy variation of a water column correction approach based on bio-physical parameters for case 2 waters. SPIE Proc Vol. 8532 85320H-1 (SPIE Remote Sens.), 23.-27.09.2012, Edinburgh (UK), RD-ROM, doi:10.1117/12.973735.

Geisler, T.; Oppelt, N. (2010) Chances and difficulties of water quality ascertainment using hyperspectral remote sensing, Aquatic Ecosystems under Global Change (EcoChange) Conference, 8–13 September, Kiel

Uhl, F., Oppelt, N., Bartsch, I. (2013) Einfaches Verfahren zur Bestimmung von marinen Algengemeinschaften mit Hilfe von hyperspektraler Fernerkundung. Geoinformation in der Küste, 4, pp. 233-245.

Uhl, F.; Oppelt, N.; Bartsch, I. (2013) Spectral mixture of intertidal marine macroalgae around the island of Helgoland (Germany, North Sea). In: Aquatic Botany, Vol. 111, pp. 112-124, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquabot.2013.06.001>

Uhl, F.; Oppelt, N.; Bartsch, I. (2013) Mapping marine macroalgae in case 2 waters using CHRIS PROBA. Proc. ESA Living Planet Symposium (9.09.-13.09.2013, Edinburgh (UK)), ESA Special Proceedings SP-722 (CD-ROM).

Oppelt, N. (2013) Remote sensing of plant pigments in coastal aquatic systems. Proc Workshop "UAV based Remote Sensing Methods for Vegetation Monitoring (10-11 September, Cologne), forthcoming.

2.6.2. GEPLANTE/IN VORBEREITUNG BEFINDENDE VERÖFFENTLICHUNGEN

Uhl, F.; Oppelt, N.; Bartsch, I. (in Arbeit) Classification of kelp with high resolution sensors and moderate need of parameterization

Uhl, F.; Oppelt, N.; Tardek, F., Bartsch, I. (in Vorbereitung) The use of a flight planning program for airborne hyperspectral data quality improvement

2.6.3. UNVERÖFFENTLICHTE ARBEITEN

Dörnhöfer, K. (2013). Mapping benthic substrate composition in coastal waters using a bio-optical model – a case study with simulated EnMAP data. Masterarbeit unveröffentlicht