

Anwendung eines bio-optischen Modells zur Erfassung von Benthos und Wassertiefen in Küstengewässern – ein Test mit simulierten EnMAP Daten

KATJA DÖRNHÖFER¹ & NATASCHA OPPELT²

Zusammenfassung: Kelpwälder sind benthische Bereiche in Küstengewässern, die dicht mit Braunalgen der taxonomischen Ordnung Laminariales bewachsen sind. Aufgrund ihrer Sensitivität gegenüber Umweltveränderungen stellen sie Indikatoren für die Bewertung des ökologischen Zustands von Küstengewässern dar. Klassische, punktuelle Tauchkartierungen reichen nicht aus um die notwendige zeitliche und räumliche Skala für ein Monitoring abzudecken. Hyperspektrale Fernerkundung und bio-optische Modelle stellen eine Möglichkeit dar dies zu unterstützen. Noch sind hyperspektrale Daten hauptsächlich flugzeugbasiert verfügbar. Im Rahmen der EnMAP Vorbereitungsmission ist das bio-optische Modell WASI-2D für das Helgoländer Sublitoral parametrisiert und auf eine simulierte EnMAP-Szene aus dem Jahr 2010 angewendet worden. Die Zielsetzung war die Ableitung von Bedeckungsgrad des Benthos (Laminariales, Fucales, Sediment) und Wassertiefen im Sublitoral um die Anwendbarkeit von WASI-2D und EnMAP Daten zur Kelpdetektion zu testen. Die räumlichen Ergebnisse wiesen plausible Verteilungsmuster der Substratbedeckung und Gradienten der Wassertiefen auf. Die Validierung mit Tauchtransekten zeigte jedoch geringe Übereinstimmungen mit den modellierten Ergebnissen.

1 Einleitung

Weitläufige und dichte Bestände von Braunalgen der taxonomischen Ordnung Laminariales, sog. Kelpwälder, bedecken felsige Untergründe in temperierten bis kalten, flachen Küstengewässern (STENECK et al. 2002). Aufgrund ihrer ökologischen Bedeutung und hohen Produktivität werden sie als das marine Gegenstück zu den terrestrischen, tropischen Regenwäldern bezeichnet. Ihre ökologische Bedeutung und Sensitivität gegenüber Umweltveränderungen haben Kelparten im Rahmen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und Meeresstrategierahmenrichtlinie zu einem Indikator für Eutrophierung und Auftreten nicht-heimischer Arten gemacht (BARTSCH & KUHLENKAMP 2004). Daher gibt es einen hohen Bedarf Kelparten quantitativ zu kartieren. Während Makroalgen der Ordnung Fucales im Eulitoral wachsen, kommen Laminariales unterhalb des mittleren Niederwasserpegels vor; daher sind ihre Habitate schwer zugänglich. Mit traditionellen Tauchkartierungen können großräumige und zeitlich kurze Veränderungen der Makroalgen nicht erfasst werden. Satellitenbasierte Fernerkundung ermöglicht es dagegen große Flächen mit höherer Repetition abzudecken. Aquatische, wasserbedeckte Vegetation aus Fernerkundungsdaten abzuleiten, ist aber immer noch eine herausfordernde Aufgabe (O'NEILL & COSTA 2013). Kelparten wachsen in optisch komplexen Gewässern, in denen verschiedene optisch aktive Wasserinhaltsstoffe (v.a. Gelbstoffe, Chlorophyll-a, Schwebstoffe), Substrate und Wassertiefen die geringe Reflexion des Wassers beeinflussen. Empirische Ansätze erreichen hier

¹ Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Geographisches Institut, Ludewig-Meyn-Str. 14, 24098 Kiel; E-Mail: [doernhoefer, oppelt]@geographie.uni-kiel.de

häufig ihre Grenzen; physikalisch basierte Ansätze wie bio-optische Modellierungen stellen eine weitere, vielversprechende Möglichkeit für ein Monitoring von flachen Küstengewässern dar. Bio-optische Modelle stellen durch die Strahlungstransfergleichung eine Beziehung zwischen den radiometrischen Größen und den inhärenten sowie apparenten optischen Eigenschaften des Wasserkörpers her. Der Wasserkörper selbst bestimmt die inhärenten optischen Eigenschaften wie Absorptions- und Streukoeffizienten der Wasserinhaltsstoffe; die apparenten optischen Eigenschaften wie der spektrale Reflexionsgrad und Attenuationskoeffizient hängen zusätzlich von der Geometrie und Stärke des einfallenden Lichtfeldes ab (ZIMMERMANN & DEKKER 2006). Eine inverse Modellierung des Reflexionssignals ermöglicht es die inhärenten optischen Eigenschaften abzuleiten, durch die Konzentrationen von Chlorophyll-a, Gelbstoffen und Schwebstoffen bestimmt werden. In optisch flachen Gewässern, in denen der Untergrund zum Reflexionssignal beiträgt, können zudem Informationen über die Wassertiefe und durch spektrale Entmischung auch über die Untergrundbedeckung gewonnen werden. Eine kürzlich für Inlandgewässer veröffentlichte, frei verfügbare Software, die es ermöglicht hyper- und multispektrale Daten von Gewässern basierend auf bio-optischen Modellen zu analysieren, ist der Water Colour Simulator WASI-2D (GEGE 2014).

Im Rahmen der EnMAP Vorbereitungsmission sind die Helgoländer Küstengewässer Untersuchungsgebiet für die Detektion mariner Makroalgen. Hierfür wurden zwei EnMAP Szenen aus AISA_{Eagle+} Daten simuliert. Anhand dieser Szenen sollte das Potential des Sensors zur Detektion sublitoraler Makroalgen untersucht werden. Darüber hinaus sollte getestet werden, inwieweit WASI-2D in Küstengewässern angepasst und angewendet werden kann.

2 Daten und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Die Studie wurde im Sublitoral der deutschen Hochseeinsel Helgoland durchgeführt. Der Einfluss von sedimentreichem Wasser aus den Wattgebieten sowie der Elbe führen zu einem zeitlich und räumlich stark variierenden Wasserkörper. Der Tidenhub liegt bei 2,53 m und der Salzgehalt liegt zwischen 30 und 34 psu. Die felsige Hauptinsel sowie die Sandinsel ‚Düne‘ sind von einem kleinräumig, strukturreichen Felsplateau umgeben. Kelps wachsen auf den erhöhten Felsrippeln des Sublitorals, während die schmalen Rinnen einen sedimentreichen, weichen Untergrund aufweisen. Am 6.8.2010 fand nahe Niedrigwasser (13:54 bis 14:20 Uhr, UTC+2) eine AISA_{Eagle+} Flugkampagne statt. Während dieser Kampagne sind von der Arbeitsgruppe Fernerkundung und Umweltmodellierung Kiel (Christian-Albrecht-Universität Kiel) und dem Alfred-Wegener-Institut Helgoland/ Bremerhaven *in situ* Messungen wie Entnahme und Analyse von Wasserproben, Messungen der Secchitiefe und des Unterwasser-Lichtfeldes durchgeführt worden. Die simulierten EnMAP Szenen (SEGL et al. 2012) wurden aus mit MIP atmosphärisch korrigierten (Modular Inversion and Processing System, HEEGE et al. 2003), georeferenzierten AISA_{Eagle+} Flugstreifen gewonnen. Die simulierten EnMAP Daten haben eine geometrische Auflösung von 30 x 30 m; spektral umfassen sie 55 Kanäle zwischen 423 und 726 nm und beinhalten Reflexion, definiert als $L_u/E_d \cdot \pi \cdot 10000$, wobei L_u die austretende Strahldichte und E_d

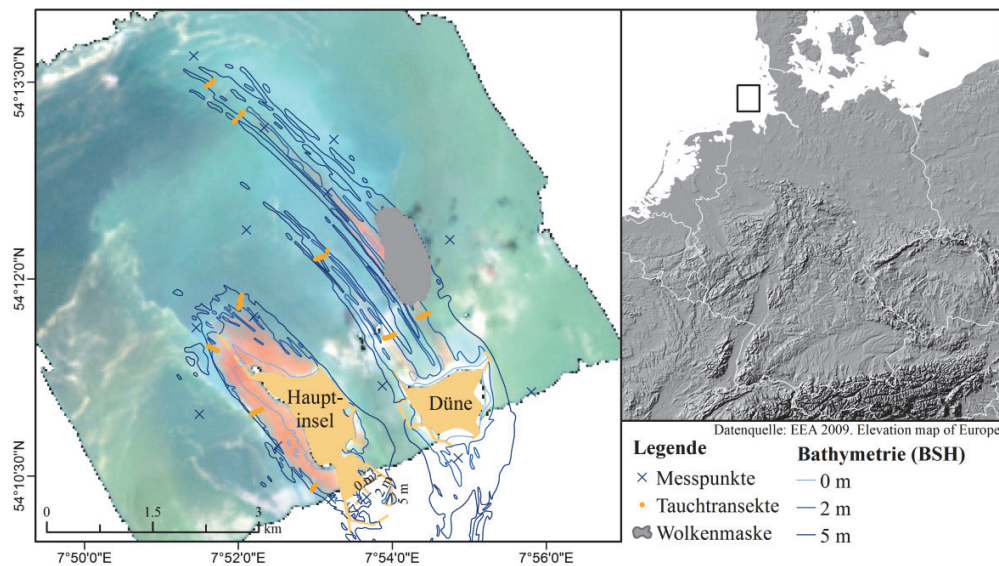


Abbildung 1: Das Untersuchungsgebiet Helgoland und die Datengrundlage. Hintergrund: EnMAP RGB-705-586-488 nm Darstellung.

die einfallende Bestrahlungsstärke ist. Die Unterscheidung von optisch tiefem und flachem Wasser erfolgte anhand der 5 m Tiefenlinie der offiziellen Seekarte (vgl. Abbildung 1). Die Fläche zwischen 0 und 5 m Wassertiefe wurde als optisch flaches Wasser weiter analysiert. Die Wasserproben wiesen geringe Konzentrationen von Chlorophyll-a ($0\text{-}3.8 \mu\text{g l}^{-1}$), suspendierten Schwebstoffen ($0\text{-}2.2 \text{mg l}^{-1}$) und Gelbstoffen ($0.17\text{--}0.61 \text{m}^{-1}$ bei 440nm) auf. Im August 2010 kartierten Forschungstaucher die Bedeckungsgrade von Sediment und Makroalgen sowie die Wassertiefe entlang von Transekten im Sublitoral. Entlang von ca. 150 m langen Transekten beschrieb der Taucher alle 6 m die Bedeckungsgrade der Substrattypen auf einer Fläche von $5 \times 6 \text{m}$ (OPPELT 2013). Die räumliche Genauigkeit dieser Methode liegt bei ca. 25 m (PEHLKE & BARTSCH 2008). Diese Tauchdaten bildeten die Grundlage zur Validierung der Modell-ergebnisse.

2.2 Bio-optische Modellierung mit WASI-2D

In WASI-2D werden mehrere implementierte bio-optische Modelle zur Verfügung gestellt (GEGE 2014). In dieser Arbeit wurde das Reflexionsmodell von ALBERT & MOBLEY (2003) zur inversen Modellierung des Strahlungstransfers im optisch flachen Wasser verwendet. WASI-2D modelliert ein Spektrum anhand konstanter und variabler Parameter, und vergleicht das modellierte mit dem gemessenen Spektrum eines Bildpixels. Die Modellierung eines Spektrums erfolgt iterativ und wird beendet, wenn das Residuum (hier: absolute Differenz $< 9.0 \cdot 10^{-5} \text{sr}^{-1}$) zwischen modelliertem Spektrum und Endmember-Spektrum unter einen Schwellenwert fällt oder eine maximale, vordefinierte Anzahl an Iterationen (hier: 2500) erreicht wird. Ein wichtiger Eingangsparameter sind vordefinierte Spektren des Untergrunds (sog. Endmember), die möglichst keinen Wassereinfluss haben sollen. Diese gehen in die lineare Entmischung der Pixel ein, die innerhalb der inversen Modellierung stattfindet. Daraus ergeben sich die Bedeckungsgrade des Benthos. Die Endmember-Spektren der beiden Makrolagen stammen aus

Labormessungen (UHL et al. 2013), das Sediment-Endmember wurde *in situ* am Strand mit einem ASD Laborspektrometer (LabSpec 5000) gemessen. Vor der eigentlichen Modellierung muss zudem ein Set an Modellparametern definiert werden, mit deren Hilfe z.B. die optischen Eigenschaften des Wasserkörpers oder die Aufnahmegeometrie definiert werden. Ein konstanter Parameter ist bspw. der Rückstreuungskoeffizient von Wasser $b_{b,w}$ bei 500 nm. Dieser wurde auf einen für Salzwasser typischen Wert gesetzt (vgl. Tabelle 1). Dadurch wurde die Rückstreuung von Wasser aufgrund des höheren Salzgehaltes erhöht. Die Wasserinhaltsstoff-Konzentrationen aus GEISLER et al. 2012 dienen zur Charakterisierung des Wasserkörpers, wobei Chlorophyll und Schwebstoffe aufgrund ihrer geringen gemessenen Variabilität als konstant gesetzt wurden. Variable Modellparameter, sog. Fitparameter, ändern ihre Werte von Pixel zu Pixel innerhalb eines definierten Wertebereichs um die größte Übereinstimmung zwischen modelliertem und gemessenem Spektrum zu erreichen. Fitparameter sollten Modellparameter sein, die innerhalb des Untersuchungsgebiets deutliche Variationen aufweisen. Die Wassertiefe, die Bedeckungsgrade der Endmember und die Absorption durch Gelbstoff wurden als variable Parameter festgelegt. Tabelle 1 fasst exemplarisch die Modellparameter des vorgestellten Modelldurchlaufs (set2-2010) zusammen.

Tabelle 1: Modellparameter des Durchlaufs set2-2010 für den Datensatz vom 6.8.2010.

Parameter	Startwert	Min.	Max.	Quelle
Fitparameter				
Wassertiefe [m]	0.5	0.1	5	Seekarte
Bedeckung <i>Laminaria digitata</i> [%]	55.5	0	100	UHL et al. 2013
Bedeckung <i>Fucus serratus</i> [%]	22.2	0	100	UHL et al. 2013
Bedeckung Sediment [%]	33.3	0	100	Feldmessung
Gelbstoff $a_{Y(440\text{ nm})}$ [m^{-1}]	0.12	0	3	GEISLER et al. 2012
Konstante Parameter				
$a_{Y(440\text{ nm})}$ exponent S [nm^{-1}]	0.014			GEGE 2014
Chlorophyll-a (Diatomeen) [$\mu g l^{-1}$]	2.0			GEISLER et al. 2012
Schwebstoffe [$mg l^{-1}$]	1.6			GEISLER et al. 2012
$b_{b,W(500\text{ nm})}$ Wasser [m^{-1}]	0.00144			MOREL 1997 in GEGE 2014

WASI-2D beinhaltet eine spektrale Datenbank (z.B. Absorptions-, Attenuations-, Streuungsspektren) in 1 nm Schritten im Wellenlängenbereich von 350 bis 1000 nm, deren Daten in die Strahlungstransfermodellierung eingehen (GEGE 2014). Um die Modellierung an die spektrale Auflösung von EnMAP anzupassen, sind die EnMAP spezifischen FWHM-Werte (Full Width at Half Maximum) und Zentralwellenlängen in WASI-2D integriert worden.

Um aussagekräftige Karten von Substratbedeckungen und Wassertiefen zu erzeugen sind mehrere Modellsets getestet worden. Die maßgebliche Fitvariable waren die Endmember-Spektren der Substrattypen. Für dieses Shortpaper ist das set2-2010 des Datensatzes von 2010 ausgewählt worden (vgl. Tabelle 1).

2.3 Plausibilitätsprüfung und Validierung

Ein erster Indikator für einen guten Modelldurchlauf ist eine hohe Anzahl an Pixeln mit niedrigem Residuum. Die Werte der Fitparameter von Pixeln, die die maximale Anzahl an Iterationen erreicht haben, können aufgrund eines schlechten Fits fragwürdig sein (GEGER 2014). Die Plausibilität der Fitparameter wurde anhand ihrer räumlichen Muster analysiert: Laminariales sollen flächendeckend nördlich und westlich der Hauptinsel, in schmalen Streifen nördlich der Düne auftreten. Fucales wachsen ausschließlich im nahen Küstenbereich. Sediment weist hohe Bedeckungsgrade nahe der Düne auf. Hohe Makroalgenbedeckungen treten in geringen Wassertiefen auf, schmale Rinnen weisen größere Wassertiefen auf.

Um eine quantitative Validierung durchzuführen, sind kartierte Bedeckungsgrade und Wassertiefen mit den modellierten Ergebnissen in Streudiagrammen verglichen worden. Als Gütemaße sind der RMSE und das Bestimmtheitsmaß verwendet worden.

3 Ergebnisse und Diskussion

WASI-2D konnte Wassertiefen, Gelbstoffe und Bedeckungsgrade der Substrattypen aus den simulierten EnMAP Daten ableiten (vgl. Abbildung 2). Im vorgestellten Modellsetting (vgl. Tabelle 1) erreichten 18 % der Pixel die maximale Anzahl an Iterationen. Für diese Pixel konnte kein bestmöglicher Fit erreicht werden. Hohe Residuen traten v.a. in Küstennähe, nahe der Wolkenmasken und der Tiefenwassermaske auf. Erstere können durch Nachbarschaftseffekte beeinflusst, letztere können fälschlicherweise eingeschlossenes optisch tiefes Wasser sein. Stark sinkende Wassertiefenwerte zwischen 0 und 1 m nahe dem Bildrand deuten auf eine fälschliche Modellierung in diesem Bereich. Abgesehen von dieser Struktur verlief der Plausibilitätstest für die drei Substrattypen und die Wassertiefen positiv. Die Wassertiefe stieg von den Küstenbereichen langsam an. Rippel- und Rinnenstrukturen kamen zum Vorschein. Hohe Bedeckungsgrade nahe 100 % mit Laminariales traten nördlich und westlich der Hauptinsel auf. Um die Düne waren höhere Sedimentbedeckungen zu erkennen. Fucales zeigte Bedeckungsgrade von meist 0 %. Dies begründet sich damit, dass dieser hauptsächlich im Eulitoral auftritt, welches durch die Landmaske ausmaskiert ist (BARTSCH & KUHLENKAMP 2004). Die Absorption durch Gelbstoff ($a_{\lambda 440\text{nm}}$) lag im Mittel bei 0.2 m^{-1} . Der Vergleich mit den *in situ* gemessenen Bedeckungsgraden und Wassertiefen deutete im Gegensatz zur Plausibilität eine fehlgeschlagene Modellierung an. RMSE- und R^2 -Werte (vgl. Abbildung 2) lagen weit entfernt von jeglicher zuverlässiger Güte. Die Streudiagramme zeigten, dass die Wassertiefen deutlich unterschätzt, Sedimentbedeckungen überschätzt und Bedeckung mit Laminariales unterschätzt wurden (vgl. Abbildung 2). Ein Grund für die deutliche Unterschätzung der Wassertiefen kann in der Wuchsform der Kelparten liegen. Sie können bis zu 5 m lang werden und bilden dichte Bestände (BARTSCH & KUHLENKAMP 2004). Daher stellten die Wassertiefen in Pixeln mit hoher Laminarialesbedeckung eher die Tiefe zwischen der Wasseroberfläche und der oberen Makroalgenschicht dar als die Tiefe bis zum Untergrund. Folglich sind für eine aussagekräftige

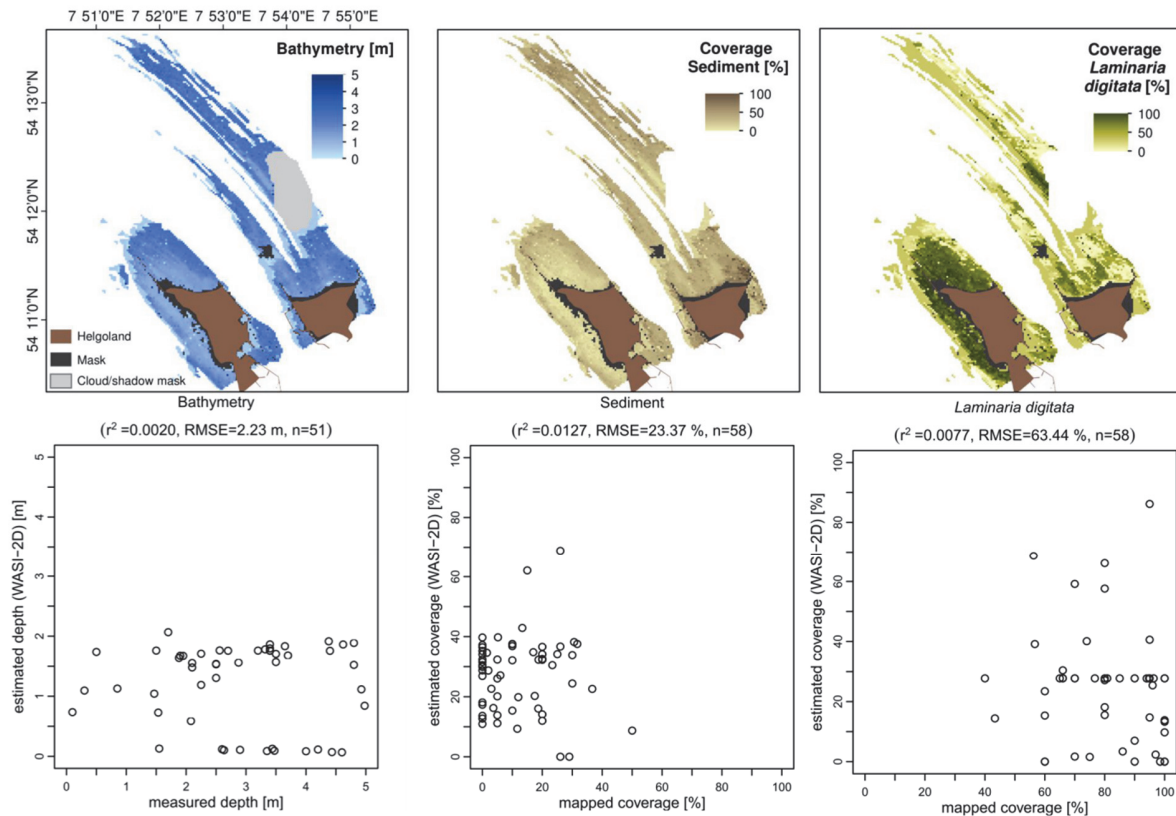


Abbildung 2: Räumliche Ergebnisse und Streudiagramme für die Fitparameter Wassertiefe, Bedeckungsgrad Laminariales und Sediment des Modelldurchlaufs set2-2010 (DÖRNHÖFER 2013).

Validierung Validierungspunkte ohne Algenbedeckung notwendig. Aus den Streudiagrammen ging hervor, dass es keine Punkte mit Algenbedeckung < 50 % gibt.

Eine weitere Schwierigkeit des Validierungsdatensatzes stellt die Lagegenauigkeit von 25 m dar, was fast einem EnMAP Pixel entspricht (PEHLKE & BARTSCH 2008). Genauigkeitsangaben von *in situ* Messungen müssen in Validierungsanalysen berücksichtigt werden. Zudem wurden mit ca. vier Validierungspunkten pro Pixel max. 7 % der Fläche eines Pixels abgedeckt. Die Tauchkartierungen waren bisher an biologischen Kriterien ausgerichtet. Daher ist eine quantitative Validierung mit den vorhandenen Kartierdaten nicht möglich (OPPELT et al. 2014). Um Fernerkundungsprodukte mithilfe dieser Kartierungen adäquat zu validieren, müssen diese modifiziert werden; d.h. eine Kartierung von größeren (mind. dreifache Pixelgröße), wenn möglich homogenen Flächen (DEKKER et al. 2011) und Flächen, die nicht mit Makroalgen bewachsen sind.

Bei der Anwendung eines bio-optischen Modells ist eine akkurate Atmosphärenkorrektur der Fernerkundungsdaten unerlässlich (ODERMATT et al. 2012); die Prozessierung der Daten kann Einfluss auf die Güte der Modellergebnisse haben. Zudem gibt es weitere Möglichkeiten WASI-2D an die Helgoländer Küstengewässer anzupassen. Diese umfassen bspw. *in situ* Messungen von Absorptions-, Streuungs- und Schwächungsspektren der inhärenten und apparenten optischen Eigenschaften des Wasserkörpers.

4 Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit ist zum ersten Mal eine bio-optische Modellierung auf simulierten EnMAP Daten im Helgoländer Sublitoral durchgeführt worden. Zudem wurde das Model WASI-2D erstmals im Küstenbereich getestet. Eine qualitative Validierung zeigte glaubwürdige Ergebnisse. Der Vergleich mit *in situ* Kartierungen hat allerdings gezeigt, dass die vorhandenen Tauchkartierungen für eine quantitative Validierung nicht geeignet sind. Dennoch lässt die qualitative Validierung vermuten, dass der zukünftige Sensor EnMAP auf Basis der 30x30 m Pixel, kleinräumige Variationen von Strukturen im Sublitoral detektieren kann. Daher ist es wichtig Möglichkeiten der Modellverbesserung aufzugreifen. WASI-2D sollte durch bio-optische *in situ* Messungen weiter an Küstengewässer angepasst werden. Die Auswahl der Endmember-Spektren ist ein entscheidender Faktor. Der Aufbau einer spektralen Bibliothek für marine Makroalgen könnte zukünftige Modellierungen verbessern. Darüber hinaus ist eine angepasste Atmosphärenkorrektur für den Küstenbereich notwendig um bio-optische Modelle verlässlich anzuwenden. In der Gewässerfernerkundung sollten zudem Strategien erforscht werden, wie im Sublitoral Validierungsdaten gewonnen werden können, die der räumlichen Auflösung von Sensoren wie EnMAP gerecht werden.

5 Danksagung

Die Aufnahme der AISA_{Eagle+} Daten, die für die Simulation der EnMAP Szenen verwendet wurden, sind durch BIS Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung mbh und den Europäischen Fond für Regionalentwicklung im Rahmen des Projekts "Flexihyp" finanziert worden. Die Autoren danken Dr. Peter Gege (DLR Oberpfaffenhofen) für seine Unterstützung bei WASI-2D.

6 Literaturverzeichnis

- ALBERT, A. & MOBLEY, C., 2003: An analytical model for subsurface irradiance and remote sensing reflectance in deep and shallow case-2 waters. *Optics Express* **11** (22), S. 2873-2890.
- BARTSCH, I. & KUHLENKAMP, R., 2004: WRRL-Klassifizierungssystem WK Helgoland. Bericht im Auftrag des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. <http://epic.awi.de/11891/1/Bar2004g.pdf>. Abruf: 8 August 2013.
- DEKKER, A. G., PHINN, S. R., ANSTEE, J., BISSETT, P., BRANDO, V. E., CASEY, B., FEARN, P., HEDLEY, J., KLONOWSKI, W. & LEE, Z. P., 2011: Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. *Limnology and Oceanography Methods* **9**, S. 396-425.
- DÖRNHÖFER, K., (2013): Mapping benthic substrate composition in coastal waters using a bio-optical model - a case study with simulated EnMAP data. Masterarbeit, CAU zu Kiel.
- GEGE, P., 2014: WASI-2D: A software tool for regionally optimized analysis of imaging spectrometer data from deep and shallow waters. *Computers & Geosciences* **62**, S. 208-215.

- GEISLER, T., OPPELT, N. & HEEGE, T., 2012: Accuracy assessment of a water column correction approach in coastal case 2 waters. Unveröffentlichtes Manuskript.
- HEEGE T., BOGNER, A., HÄSE, C., ALBERT, A., PINNEL, N., & ZIMMERMANN, S., 2003: Mapping Aquatic Systems with a Physically Based Process Chain. 3rd EARSeL Workshop on imaging spectroscopy.
- ODERMATT, D., GITELSON, A., BRANDO, V.E. & SCHAEPMAN, M., 2012: Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* **118** (0), S. 116-126.
- O'NEILL, J. D. & COSTA, M., 2013: Mapping eelgrass (*Zostera marina*) in the Gulf Islands National Park Reserve of Canada using high spatial resolution satellite and airborne imagery. *Remote Sensing of Environment* **133**, S.152-167.
- OPPELT, N. (2013): Entwicklung eines EnMAP-Verfahrens zur Bestimmung von sublitoralen marinen Makrophyten: KELPMAP. Schlussbericht, Kiel. 32 S.
- OPPELT, N., DÖRNHÖFER, K. & UHL, F. (2014): Bio-optical modelling to monitor submerged coastal vegetation. Proc. of the Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. 22.-26.9.2014, Valencia, Spanien.
- PEHLKE, C. & BARTSCH, I., 2008: Changes in depth distribution and biomass of sublittoral seaweeds at Helgoland (North Sea) between 1970 and 2005. *Climate Research* **37** (2-3), S. 135-147.
- SEGL, K., GUANTER, L., ROGASS, C., KUESTER, T., ROESSNER, S., KAUFMANN, H., SANG, B., MOGULSKY, V. & HOFER, S., 2012: EeteS - The EnMAP End-to-End Simulation Tool. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* **5** (2), S. 522-530.
- STENECK, R. S., GRAHAM, M. H., BOURQUE, B. J., CORBETT, D., ERLANDSON, J. M., ESTES, J. A. & TEGNER, M. J., 2002: Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation* **29** (4), S. 436–459.
- UHL, F., OPPELT, N. & BARTSCH, I., 2013: Spectral mixture of intertidal marine macroalgae around the island of Helgoland (Germany, North Sea). *Aquatic Botany* **111**, S. 112-124
- ZIMMERMAN, R. & DEKKER, A., 2006: Aquatic Optics: Basic Concepts for Understanding How Light Affects Seagrasses and Makes them Measurable from Space. *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*, Darkum, A., Orth, R. & Duarte C. (Hrsg.), Springer Netherlands, S. 295-301.